

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

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



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

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Architecture

Option : Habitat et Ville Durables

**L'influence de la morphologie urbaine sur les ambiances thermiques
extérieures dans les zones semi-arides. « Cas de la ville de Batna ».**

Présentée par :

M^{me} Chetara Aïcha

Sous la direction du Professeur : BENABBAS Moussadek

Soutenue publiquement le: 12/11/2023

Mr	SEKHRI	Adel	MCA	Président	Université de Biskra
Mr	BENABBAS	Moussadek	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
M ^{me}	DJAGHROURI	Djamila	MCA	Co-directeur	Université de Biskra
Mr	BOUDJELLAL	Lazhar	MCA	Examineur	Université de Batna
Mr	YOUCEF	Kamel	MCA	Examineur	Université de Biskra

Année Universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

En l'honneur de Mon Père

À ma tendre mère

À mon mari

À mes chers enfants

Remerciements

Je tiens à exprimer nos remerciements les plus sincères et ma gratitude à Allah Tout-Puissant qui m'a donné l'occasion de poursuivre la recherche dans le domaine passionnant de l'architecture et de l'urbanisme. C'est seulement avec son aide que j'ai accompli ce travail.

Au terme de ce projet de recherche, réalisé au sein du département d'architecture, de l'université Mohamed Kheider, Biskra, le moment est venu de remercier tous ceux qui m'ont, à divers titres, aidés.

Je témoigne, en premier lieu, ma gratitude et mes plus sincères remerciements à mes encadrants, Mr Benabbas Moussadek et M^{me} Djaghrouri Djamila, qui ont accepté de diriger ce travail. Je leur suis reconnaissante pour leur disponibilité, leur conseils avisés, leur exigences et leur esprit critique. Leur contribution a été déterminante dans ce travail, marqué par leur complicité et leur bonne humeur.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui m'ont fait un immense honneur en acceptant de participer à l'évaluation de ce travail de thèse.

Je voudrai exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui m'ont fait bénéficier de leur expérience dans le domaine d'architecture et d'urbanisme, à tous mes professeurs depuis la première année de cette formation.

Merci également à mes amis, collègues et camarades de la formation doctorale pour leur bonne humeur permanente, leur gentillesse et pour ces moments de délire.

Je tiens à remercier aussi tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et accompagné durant de nombreuses années, ainsi que toutes les personnes qui m'ont apporté un soutien moral, de loin ou de près.

Table des matières

Dédicaces.....	I
Remerciements	II
Sommaire.....	III
Liste des figures.....	XII
Liste des tableaux	XVII
Liste des graphes	XXI

Chapitre introductif

Introduction générale	1
Problématique.....	4
Hypothèses de la recherche.....	5
Objectifs de la recherche	5
Méthodologie et outils de la recherche.....	8
Structure de la thèse	11

Partie théorique

Chapitre I : Le microclimat urbain sous l'influence de la morphologie urbaine

Introduction	14
I.1. Le climat urbain.....	15
I.1.1. Les échelles spatiales du climat	15
I.1.1.1. Macro-climat.....	16
I.1.1.2. Més-oclimat	16
I.1.1.3. Topo-climat.....	16
I.1.1.4. Microclimat.....	17
I.1.2. Les facteurs climatiques	17
I.1.2.1. Les facteurs cosmiques	17
I.1.2.2. Les facteurs géographiques.....	18
I.1.3. Les éléments du climat.....	18
I.1.4. Exploration du microclimat et du phénomène d'îlot de chaleur urbain.....	18
I.1.4.1. Définition de l'îlot de chaleur urbain.....	19
I.1.5. Les niveaux d'îlot de chaleur urbain	20
I.1.5.1. Les îlots de chaleur surfaciques	20
I.1.5.2. Les îlots de chaleur atmosphériques	21
I.1.6. La température et les différents types d'îlots de chaleur urbains.....	22
I.1.7. Les facteurs influençant le microclimat et la formation de l'îlot de chaleur urbain	22
I.1.7.1. Les facteurs physiques incontrôlables	23
I.1.7.2. Les facteurs physiques contrôlables	23
I.2. La morphologie urbaine	23
I.2.1. Définition de la morphologie urbaine	25
I.3. La forme urbaine	26

I.3.1. Définition de la forme urbaine	26
I.3.2. Les aspects classiques de la forme urbaine	27
I.3.2.1. L'approche de la forme urbaine comme forme des tissus urbains	27
I.3.2.2. L'approche de la forme urbaine comme forme des tracés urbains	27
I.3.3. Les nouveaux aspects explorés de la forme urbaine	27
I.3.3.1. L'approche de la forme urbaine comme forme du paysage urbain	27
I.3.3.2. L'approche de la forme urbaine comme forme sociale ou spacio-sociale (Space syntaxe)	27
I.3.3.3. L'approche de la forme urbaine comme forme bioclimatique	28
I.4. Les indicateurs morphologiques	28
I.4.1. Les indicateurs morphologiques à l'échelle de la ville	28
I.4.2. Les indicateurs morphologiques à l'échelle du tissu urbain (échelle du quartier).....	31
I.4.2.1. La compacité urbaine	31
I.4.2.2. La densité urbaine	33
I.4.2.3. La densité surfacique (densité bâtie)	35
I.4.2.4. La densité volumique	37
I.4.2.5. Le coefficient d'occupation des sols (COS)	38
I.4.2.6. Le coefficient d'emprise des sols (CES)	39
I.4.2.7. La densité végétale	41
I.4.2.8. La minéralisation	42
I.4.2.9. La rugosité urbaine	42
I.4.2.10. La porosité urbaine	44
I.4.2.11. La sinuosité urbaine	46
I.5. Les indicateurs morphologiques à l'échelle de l'espace public	46
I.5.1. La géométrie urbaine	46
I.5.2. L'espace public	46
I.5.3. La géométrie de la rue	47
I.5.4. Les formes géométriques d'une rue	48
I.5.4.1. La rue canyon	48
I.5.4.2. La rue dièdre	49
I.5.4.3. La rue dégagée	50
I.5.5. Les indicateurs géométriques	50
I.5.5.1. Le prospect (ratio H/L)	50
I.5.5.2. Le facteur de vue du ciel (FVC)	53
I.6. Les indicateurs physiques	59
I.6.1. L'albédo moyen des surfaces	59
Conclusion	62

Chapitre II : Les ambiances thermiques dans les espaces urbains extérieurs

Introduction	64
II.1. La notion de l'ambiance de manière générale	64
II.1.1. La dimension physique	65
II.1.2. La dimension humaine	65
II.1.3. La dimension spatiale	65

II.1.4. La dimension temporelle	65
II.2. Les approches « quantitative et qualitative » de l’ambiance	66
II.2.1. L’approche quantitative	66
II.2.2. L’approche qualitative	66
II.3. Les éléments constitutifs des ambiances	66
II.4. La notion de l’ambiance thermique	67
II.4.1. Les différents types d’ambiance thermique	67
II.4.1.1. Ambiance thermique froide	67
II.4.1.2. Ambiance thermique neutre	67
II.4.1.3. Ambiance thermique chaude	67
II.5. La notion de confort thermique.....	68
II.5.1. Paramètres influençant le confort thermique	69
II.5.2. Les paramètres objectifs relatifs à l’environnement	70
II.5.2.1. Le confort et la température moyenne radiante (TMR °C)	70
II.5.2.2. Le confort et la température de l’air (Ta °C).....	71
II.5.2.3. Le confort et l’humidité relative de l’air (HR %).....	72
II.5.2.4. Le confort et la vitesse du vent (m/s)	73
II.5.3. Les paramètres subjectifs relatifs à l’individu	75
II.5.3.1. Le métabolisme et l’activité physique :.....	75
II.5.3.2. La vêtue (habillement)	75
II.5.4. Les échanges thermiques avec l’ambiance	76
II.5.4.1. La conduction	77
II.5.4.2. La convection	77
II.5.4.3. Le rayonnement	78
II.5.4.4. L’évaporation	79
II.5.4.5. La respiration	79
II.6. L’évaluation du confort thermique en milieu urbain.....	79
II.6.1. Approche qualitative (subjective).....	80
II.6.2. Approche quantitative (objective).....	81
II.7. Caractérisation du confort thermique à travers des aspects.....	81
II.7.1. L’aspect physique	81
II.7.2. L’aspect physiologique	82
II.7.3. L’aspect psychologique	82
II.8. Les indices du confort thermique en milieu urbain	83
II.8.1. Le vote moyen prévisible « Predicted mean vote » (PMV).....	84
II.8.2. La température physiologique équivalente « Physiologically Equivalent Temperature » (PET)	86
II.8.3. L’indice universel de climat thermique « Universal Thermal Climate Index » (UTCI)	89
II.8.4. L’indice de température effective standard (SET* et OUT-SET*)	92
II.8.4.1. L’indice SET*	92
II.8.4.2. L’indice de la température effective extérieure « Outdoor Effective Temperature » « Out-SET* ».....	93
II.8.5. Le modèle COMFA	94

II.8.6. L'indice de la température perçue « Perceived temperature » « PT »	96
II.9. Les indices empiriques.....	97
II.9.1. Le vote de sensation effective « Actual Sensation Vote » « ASV ».....	98
II.9.2. La sensation thermique « thermal sensation » « TS »	98
II.9.3. Le vote de sensation thermique « Thermal Sensation Vote » « TSV »	100
II.10. Les indices thermiques basés sur des équations linéaires (Indices directs)	100
II.10.1. La température effective « Effective Temperature » « ET » et ses dérivées	101
II.10.2. Indice de la chaleur « Heat Index » « HI »	101
II.10.3. L'indice Humidex « H »	102
II.10.4. L'indice « Wet Bulb Globe Temperature Index » (WBGT).....	103
Conclusion.....	104

Chapitre III : Etat de l'art et positionnement épistémologique

Introduction	106
III.1. La ville et le développement urbain durable	107
III.2. Le concept du développement durable	107
III.3. Contexte et état de l'art.....	108
III.4. Les recherches de références	108
III.4.1. L'étude de Zhou et Chen (2018): Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon	109
III.4.1.1. Description et objectif d'étude	109
III.4.1.2. Méthode adoptée	109
III.4.1.3. Les résultats de l'étude	110
III.4.2. L'étude de Hamel et Mazouz (2005): The compact city: a urban shape for sustainable city, in arid areas.....	113
III.4.2.1. Description et objet d'étude.....	113
III.4.2.2. La méthode adoptée.....	114
III.4.2.3. Résultats de l'étude.....	115
III.4.3. L'étude de Baghaeipoor et Nasrollahi (2019) : The Effect of Sky View Factor on Air temperature in High-rise Urban Residential Environments	116
III.4.3.1. Description et objectif d'étude	116
III.4.3.2. La méthode adoptée.....	116
III.4.3.3. Les résultats obtenus	117
III.4.4. L'étude de Deng et wong (2019) : Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts	117
III.4.4.1. Description et objectif de l'étude.....	117
III.4.4.2. Méthode adoptée	118
III.4.4.3. Les résultats obtenus	120
III.4.5. L'étude de Achour-Younsia et Kharrat (2015) : Outdoor Thermal Comfort : Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate - Case Study Tunis, Tunisia	121
III.4.5.1. Description et objectif de l'étude	121
III.4.5.2. La méthode adoptée.....	121
III.4.5.3. Les résultats obtenus	122

III.5. Les approches et les méthodes d'évaluation de l'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique extérieur.....	123
III.5.1. Les mesures	123
III.5.1.1. La méthode de mesures à distance (par télédétection)	122
III.5.1.2. La méthode de mesures fixes	124
III.5.1.3. La méthode de mesures instantanées in situ	124
III.5.2. La méthode de simulation numérique (modèles numériques développés).....	125
III.5.3. La modélisation par discrétisation spatiale par maillage	126
III.5.3.1. Le modèle RayMan	126
III.5.3.2. Le modèle SkyHelios	127
III.5.3.3. Le modèle ENVI-met	128
III.5.3.4. Le modèle SOLENE-microclimat	129
III.5.3.5. Le logiciel Lady bug tools	130
III.5.4. La modélisation par paramétrisation	131
III.5.5. La modélisation paramétrique 2D	132
III.5.5.1. Le modèle SM2U (Sub-Meso Soil Model Urban).....	132
III.5.5.2. Le modèle LUMPS (Local-Scale Urban Meteorological pre-processing Scheme).132	
III.5.6. La modélisation paramétrique 3D	132
III.5.6.1. Le modèle TEB.....	132
III.5.6.2. Le logiciel SOLWEIG.....	133
III.6. Positionnement méthodologique	134
III.6.1. L'approche adoptée dans l'étude de l'influence de la morphologie urbaine sur le climat urbain.....	134
III.6.1.1. La première méthode (La télédétection).....	135
III.6.1.2. La deuxième méthode (Les mesures in situ)	136
III.6.1.3. La troisième méthode (La simulation numérique)	136
Conclusion.....	137

Partie pratique

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Introduction	139
IV.1. Présentation générale de la ville de Batna : (Localisation géographique et analyse climatique de la ville de Batna)	140
IV.2. Les paramètres climatiques de la ville de Batna	143
IV.2.1. Température de l'air	144
IV.2.2. Humidité relative	145
IV.2.3. Précipitations.....	145
IV.2.4. Vitesse du vent.....	146
IV.2.5. L'insolation	147
IV.3. Détermination des isothermes de la ville de Batna	148
IV.3.1. Indice d'aridité « I » (de Martonne 1923)	148
IV.4. Analyse urbaine de la ville de Batna	150

IV.4.1. La morphogenèse de la ville de Batna à travers les différentes périodes.....	150
IV.4.1.1. La période coloniale (période d'implantation).....	150
IV.4.1.2. La période post coloniale (Après 1962)	154
IV.4.1.3. L'urbanisation actuelle	156
IV.4.2. Classification des morphologies urbaines de la ville de Batna	157
IV.5. Méthodologie du travail	160
IV.5.1. Données de télédétection et méthodologie du travail (première partie).....	160
IV.5.1.1. Caractéristiques spatiales et spectrales des données d'images satellites utilisées dans l'étude	162
IV.5.2. Le prétraitement des images satellitaires.....	163
IV.5.3. Extraction d'information	163
IV.5.3.1. Les indicateurs morphologiques calculés.....	163
IV.5.3.2. L'occupation du sol	165
IV.5.3.3. Température de surface du sol (LST).....	166
IV.6. Interprétation des résultats.....	169
IV.6.1. L'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol.....	169
IV.6.2. L'évolution spatio-temporelle de la température de surface du sol (LST)	171
IV.7. La deuxième partie du chapitre	173
IV.7.1. Présentation des sites d'investigation.....	174
IV.7.2. Critères de choix des sites d'étude.....	174
IV.7.3. Critères de choix des points de mesure.....	176
IV.7.4. Le corpus d'étude et le processus méthodologique	178
IV.7.5. Analyse morphologique des tissus urbains choisis comme sites d'étude.....	178
IV.7.6. Présentation du premier site d'investigation.....	178
IV.7.7. Présentation du deuxième site d'investigation	181
IV.8. Le protocole de déroulement de la campagne de mesures	182
IV.8.1. Les instruments de mesure (description des appareils de mesure).....	183
IV.8.2. Les paramètres climatiques mesurés	184
IV.8.2.1. La température de l'air	185
IV.8.2.2. La température moyenne radiante	185
IV.8.2.3. L'humidité relative	186
IV.8.2.4. La vitesse du vent	186
IV.9. Interprétation des données mesurées pour chaque type de tissu urbain	186
IV.9.1. Premier site d'investigation : Cité 500 logements.....	186
IV.9.2. Résultats d'évaluation des indicateurs morphologiques.....	188
IV.9.2.1. Le ratio H/L.....	188
IV.9.2.2. Le facteur de vue du ciel (FVC).....	188
IV.9.3. Résultats des données climatiques mesurées	189
IV.9.3.1. La variation de température de l'air	189
IV.9.3.2. La variation d'humidité relative	190
IV.9.3.3. La variation de vitesse du vent	191
IV.9.3.4. La variation de température moyenne radiante	191
IV.9.4. Le deuxième site d'étude : Lotissement Kemouni	192
IV.9.5. Les résultats des indicateurs morphologiques et géométriques.....	192

IV.9.5.1. Le ratio H/L.....	193
IV.9.5.2. Le facteur de vue du ciel (FVC).....	194
IV.9.6. Résultats des données climatiques mesurées.....	194
IV.9.6.1. La variation de température de l'air.....	195
IV.9.6.2. La variation d'humidité relative.....	195
IV.9.6.3. La variation de vitesse du vent.....	196
IV.9.6.4. Température moyenne radiante.....	197
IV.10. Synthèse de l'analyse des résultats des deux quartiers.....	197
Conclusion.....	198

Chapitre V: Simulation numérique (Logiciel ENVI-met)

Introduction.....	200
V.1. La simulation numérique.....	201
V.1.1. Le Logiciel de simulation (ENVI-met).....	201
V.1.2. Le modèle ENVI-met : est-il un modèle fiable.....	203
V.1.3. Aperçu sur l'interface du logiciel ENVI-met version 4.4.6 pro.....	205
V.1.3.1. Les fonctions de chaque fenêtre dans ENI-met.....	206
V.1.4. Les données d'entrée et les données de sortie.....	208
V.1.4.1. Les entrées (Inputs).....	208
V.1.4.2. Les données de sortie « Outputs ».....	209
V.2. Etude de l'état actuel.....	209
V.3. Déroulement de la simulation.....	210
V.4. Modélisation géométrique des zones d'étude.....	210
V.5. Les données d'entrée de la simulation.....	212
V.6. Les étapes de simulation.....	213
V.7. Validation du modèle de simulation (logiciel ENVI-met 4.4.6).....	213
V.8. Etude comparative entre les deux sites d'étude.....	215
V.8.1. Effet de la densité et la compacité urbaine sur les indicateurs géométriques calculés.....	215
V.8.1.1. Effet de la densité urbaine sur le ratio H/L.....	215
V.8.1.2. Effet de la densité urbaine sur le facteur de vue du ciel (FVC).....	216
V.8.2. Effet des indicateurs géométriques sur les paramètres climatiques simulés.....	217
V.8.2.1. Effet de FVC et H/L sur la température de l'air et la température moyenne radiante.....	217
V.8.2.2. Effet du ratio H/L et du FVC sur le flux du rayonnement solaire direct.....	223
V.8.2.3. Effet du FVC et le ratio H/L sur l'humidité relative.....	225
V.8.2.4. Effet du FVC et le ratio H/L sur la vitesse du vent.....	228
V.8.3. Caractérisation du confort thermique à l'échelle des deux quartiers.....	231
V.8.3.1. L'impact de la morphologie urbaine sur le PMV (vote moyen prévisible).....	232
V.8.3.2. L'impact de la morphologie urbaine sur la PET (Température Effective Physiologique).....	235
V.8.3.3. L'impact de la morphologie urbaine sur l'UTCI (Indice Thermique Universel).....	238
V.8.4. Corrélation entre les indices thermiques (PMV, PET, et UTCI) et les paramètres microclimatiques.....	241

V.8.4.1. Corrélation entre PMV, PET, UTCI et la température de l'air :	241
V.8.4.2. Corrélation entre PMV, PET, UTCI et l'humidité relative	242
V.8.4.3. Corrélation entre PMV, PET, UTCI et la vitesse du vent	243
V.8.4.4. Corrélation du PMV, PET et UTCI avec la température moyenne radiante (TMR)	244
Conclusion.....	244

Chapitre VI: Optimisation du confort thermique extérieur par simulations paramétriques

Introduction	246
VI.1. Présentation du protocole du modèle d'optimisation simulé	246
VI.2. Les étapes de création du modèle d'optimisation du confort thermique extérieur	248
VI.3. Etudier l'impact de la densité et de la hauteur du cadre bâti sur les indicateurs géométriques, les paramètres climatiques et les indices du confort thermique extérieur.....	249
VI.3.1. Présentation des différents scénarios réalisés.....	250
VI.3.1.1. Les scénarios de l'optimisation selon l'échelle horizontale (X et Y).....	250
VI.3.1.2. Les scénarios de l'optimisation selon l'échelle verticale (Z).....	250
VI.3.2. L'optimisation de la forme urbaine suivant l'échelle horizontale (X et Y)	251
VI.3.3. L'optimisation selon l'échelle verticale (Z)	252
VI.4. Interprétation des résultats de simulation obtenus	257
VI.4.1. L'impact de l'effet de la densité surfacique simulée sur les indicateurs géométriques (FVC et le ratio H/L)	257
VI.4.2. L'impact de l'effet combiné de la densité surfacique et de la hauteur des constructions simulées sur les indicateurs géométriques (FVC et ratio H/L).....	259
VI.4.3. Le cas de l'effet de la densité surfacique	261
VI.4.4. Le cas de l'effet combiné de la hauteur en fonction de la densité surfacique.....	263
VI.5. Corrélation de la densité surfacique et les indicateurs géométriques (FVC, et H/L)....	265
VI.6. Corrélation de l'effet combiné de la densité surfacique et de la hauteur des constructions	266
VI.7. L'influence de la densité surfacique et de la hauteur sur les paramètres microclimatiques	267
VI.7.1. L'effet sur la température de l'air	267
VI.7.1.1. L'effet de la densité surfacique sur la température de l'air.....	267
VI.7.1.2. L'effet de la hauteur sur la température de l'air.....	269
VI.7.2. L'effet sur l'humidité relative	273
VI.7.2.1. L'effet de la densité surfacique sur l'humidité relative.....	273
VI.7.2.2. L'effet de la hauteur sur l'humidité relative.....	274
VI.7.3. L'effet sur la vitesse du vent	277
VI.7.3.1. L'effet de la densité surfacique sur la vitesse du vent.....	277
VI.7.3.2. L'effet de la hauteur sur la vitesse du vent.....	279
VI.7.4. L'effet sur la température moyenne radiante (TMR)	282
VI.7.4.1. L'effet de la densité surfacique sur la température moyenne radiante (TMR)	282
VI.7.4.2. L'effet de la hauteur sur la température moyenne radiante (TMR)	284
VI.7.5. L'effet sur le flux du rayonnement solaire direct.....	287
VI.7.5.1. L'effet de la densité surfacique sur le flux du rayonnement solaire direct	287

VI.7.5.2. L'effet de la hauteur sur le flux du rayonnement solaire direct	288
VI.8. L'influence de la densité surfacique sur le confort thermique extérieur.....	291
VI.9. L'influence de la hauteur sur le confort thermique extérieur.....	292
Conclusion	295
Conclusion générale (Recommandations et perspectives de la recherche).....	297
Bibliographie.....	301
Annexes.....	319
Résumé.....
Abstract.....
ملخص.....

Liste des figures

Figure 0.1: Les variables de la recherche illustrant l'interaction entre la morphologie des formes urbaines, le microclimat urbain et le confort thermique en extérieur. (Source : Auteure, 2017).....	7
Figure 0.2: Schéma figurant la structure conceptuelle de recherche. (Source : Auteure, 2017)	8
Figure 0.3: Le plan de la thèse. (Source : Auteure, 2017).....	13
Figure I.1: Illustration des différentes échelles spatiales intervenant dans l'étude du climat et de l'atmosphère : l'échelle méso-climatique (a), l'échelle locale (b) et micro-climatique (c). (Source : Leroyer,2006).....	16
Figure I.2: L'évolution de température de l'air suivant la densité du cadre bâti formant une sorte d'îlot. Source : (ADEM, 2012).....	20
Figure I.3: L'îlot de chaleur urbain à Paris. (Source: Elioth, 2017)	22
Figure I.4: Différents profils de la forme : formes compactes, connexes, simplement connexes ou non.(Source : Maignant, 2005).....	29
Figure I.5: Coefficient de compacité « Cf » pour diverses morphologies de bâtiments. (Source : Tiberiu et al, 2008)	32
Figure I.6: Calcul de la densité brute et nette. (Source : IAURIF - Juin 2005).....	34
Figure I.7: Trois formes urbaines différentes avec même densité. (Source : COLLECTIVITES VIABLES.ORG 2013. Vivre en Ville, inspiré de Urban Task Force, 1999).....	35
Figure I.8: Les trois tissus urbains étudiés (Centre, Marval, ZHUN).(Source : Boukhezer, 2002)	36
Figure I.9: Les trois quartiers étudiés. (Source : Boukhezer, 2002).....	37
Figure I.10: Trois formes bâties avec un même COS, (COS=1). (Source : Adam, 2010).	39
Figure I. 11: Trois formes bâties avec un même CES, (CES= 0.5). (Source : Adam, 2010).	40
Figure I.12: Les paramètres géométriques d'une rue. (Source : Boucheriba, 2021).....	40
Figure I.13: Variation des vitesses du vent pour trois types de sites de densité différentes. (Source : Gandemer et Guyot, 1976).....	42
Figure I.14: Les cinq catégories de rugosité. (Source : L'annexe nationale de l'eurocode EN 1991-1-4).	43
Figure I.15: Le coefficient de rugosité en fonction de la catégorie du terrain et de la hauteur Z. (Source : L'annexe nationale de l'eurocode EN 1991-1-4).....	44
Figure I.16: La porosité urbaine affectant le degré de ventilation dans la zone urbaine. (Source : Oke, 1988)	45
Figure I.17: Le profil d'une rue.(Source : www.sante-environnement.be)	47
Figure I.18: Forme de la rue canyon.(Source : Izard, 2000)	48
Figure I.19: Principe d'entraînement des polluants dans une rue « Canyon ». (Source : www.atmo.franche-comte.org).....	49
Figure I.20: Canyon urbain. (Source : Nunez et Oke, 1977).....	49

Figure I.21: Forme de la rue dièdre. (Source : Izard, 2000)	50
Figure I.22: Forme de la rue dégagée. (Source : Izard, 2000)	50
Figure I.23: Profil de la circulation du vent selon le ratio H/L du site.(Source : Santamouris, 2001).....	51
Figure I.24: Phénomène du piégeage radiatif.(Source : Ringenbach, 2004).....	51
Figure I.25: Le quartier Seffarine dans le centre de la Médina. (Source : Johansson, 2006)	52
Figure I.26: Le quartier Adarissa au sud de la nouvelle ville. (Source : Johansson, 2006)	52
Figure I.27: L'exposition au soleil et l'effet d'ombrage variant en fonction des différentes valeurs du rapport H/L. (Source : Reiter, 2007)	53
Figure I.28: Le facteur de vue du ciel pour différents profils de rues. (Source : Ait-Ameur, 2002.).....	54
Figure I.29: Les paramètres géométriques nécessaires pour le calcul du FVC dans un espace bordé d'un seul côté. (Source : Erell et al., 2011)	55
Figure I.30: Les paramètres géométriques nécessaires pour le calcul du FVC pour une place circulaire. (Source : Erell et al., 2011).....	56
Figure I.31: Les paramètres géométriques nécessaires pour le calcul du FVC pour une cour de forme rectangulaire. (Source : Erell et al., 2011)	56
Figure I.32: Estimation du FVC à l'aide de l'outil informatique le SIG. (Source : Erell et al., 201).....	57
Figure I.33: Photos Fish-Eye prises aux quatre stations respectivement de gauche à droite : (1) espace ouvert, (2) espace semi ouvert, (3) et (4) espaces de type canyon.(Source : Boucheriba et al., 2010)	57
Figure I.34: Représentation des coupes schématiques des divers profils géométriques des stations 1, 2, 3, et 4. (Source : Boucheriba et al., 2010)	58
Figure I.35: Les albédos en milieu urbain. (Source : http://www.notre-planete.info , 2019) ...	59
Figure I.36: Propriétés réfléchissantes des matériaux de revêtements.(Source : Guide des actions adaptatives au changement climatique, OID, 2021)	61
Figure I.37: Thermographie infrarouge des divers revêtements testés dans les travaux de (Doulos, et al., 2004). (Source Doulos et al., 2004).....	62
Figure II.1: Les différents paramètres influençant sur le confort thermique en générale. (Source : Energie plus, 2019).....	69
Figure II.2: Les paramètres affectant le confort thermique extérieur. (Source : Redha et al., 2018)	70
Figure II.3: La vitesse du vent moyenne indicative selon les différents usages des espaces pour la ville de Londres. (Source : vizea.fr)	74
Figure II.4: Les différents types d'échanges thermiques entre le corps humain et l'environnement. (Source : Depecker et al., 1989).....	77
Figure II.5: Quelques indices de confort pour les ambiances intérieures et extérieures. (Source : WALTHER Et GOESTCHEL, (Sans Date))	83
Figure II.6: L'échelle du PMV selon Michael Bruse. (Source : www.Envi-met.info)	84

Figure II.7 : Quelques indices de confort pour les ambiances intérieures et extérieures. (Source : WALTHER Et GOESTCHEL, (Sans Date))	87
Figure II.8: Les paramètres fondamentaux de l'UTCI. (Source : Fiala et al., 2012).....	91
Figure II.9: Mise en place des quatre conditions climatiques expérimentales. (Source : Cheng et al., 2012)	99
Figure III.1: Cartes montrant la répartition des zones lacustres (Bloc Gris) En 1965 (A) et 2008 (B) dans la zone bâtie de Wuhan. (Source : Zhou et Chen, 2018).	109
Figure III.2: Concept du cas de haute densité (A) et du cas de haut bâtiment (B). (Source : Zhou et Chen, 2018)	110
Figure III.3: Carte de la distribution de la température de l'air dans le Cas forte densité (A), et le Cas grande hauteur (B) à 20h00. (Source : Zhou et Chen, 2018).....	111
Figure III.4: Carte de la distribution de la vitesse du vent pour le Cas forte densité (A) et le Cas grande hauteur (B) à 20:00. (Source : Zhou et Chen, 2018).	112
Figure III.5: Le site urbain simulé par ENVI-met. (Source : Baghaeipoor et Nasrollahi, 2019)	116
Figure III.6: Les cartes des valeurs de FVC et de la T air. (Source : Baghaeipoor et Nasrollahi, 2019).....	117
Figure III.7: Typologie des bâtiments et disposition des lieux de l'unité de la parcelle. (Source : Deng et Wong, 2019)	118
Figure III.8: Plans et sections de l'ensemble du site urbain pour la simulation numérique. (Source : Deng et Wong, 2019).....	119
Figure III.9: Les 64 scénarios urbains élaborés à partir de 16 scénarios de base. (Source : Deng et Wong, 2019)	119
Figure III.10: Les différents tissus sélectionnés; (a) Médina, (b) coloniale, (c) lotissement. (Source: Achour-Younsia et Kherrat, 2005).....	121
Figure III.11: La télédétection spatiale. (Source : Durand, 2019)	123
Figure III.12: station météorologique. (Source : echo2.epfl.ch/edrologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html).....	124
Figure III.13: Les instruments de mesures mobiles. Source : (Ahmadi Venhari et al, 2019).	125
Figure III.14: Les échelles de la simulation urbaine. (Source : Azam, 2021).....	125
Figure III.15: Le calcul du SVF et la modélisation de l'environnement urbain avec le modèle Rayman. (Source : Matzarakis et al., 2007).	127
Figure III.16: Fenêtre principale de skyhelios montrant une scène 3D. (Source : Matzarakis et al, 2021).....	128
Figure III.17 : Cas d'étude sur les stratégies d'adaptation au climat simulées Avec ENVI-met, 2019. (Source : www.Envi-met.com).....	129
Figure III.18: Le Modèle SOLENE-climat. (Source : Morille, 2018).....	130
Figure III.19 : Ladybug Tools. (Source : https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools)	131
Figure III.20: Les étapes de la démarche d'investigation. (Source : Gigan et Ducheman, 2020)	135

Figure III.21: Les démarches appliquées pour le présent travail de recherche. (Source : Auteure, 2021) 137

Figure IV.1: La situation géographique de la wilaya de Batna. (Source : d.maps.com (Réadapté par auteure)).....	141
Figure IV.2: Les limites administratives de la wilaya de Batna. (Source : www.google.com/search (Réadaptée par auteure)).....	141
Figure IV.3 : La ville de Batna. (Source : PDAU, 2017).	142
Figure IV.4: Les zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie. (Source : Ministère de L'habitat, Recommandations Architecturales, ENAG, 1993, (Réadaptée par Auteure))	143
Figure IV.5: Le zonage climatique de l'Algérie selon Borel. (Source : El Hassar et al., 2002, (Réadapté par auteure))	143
Figure IV.6: Carte du noyau colonial. (Source : PDAU, 1998).	151
Figure IV.7: Anciennes photos du centre-ville de Batna. (Source: Revue Info-Batna et Delcamp.net).....	151
Figure IV.8: Ancienne photo de Batna (Quartier des indigènes). (Source : Delcamp.net)....	152
Figure IV.9: Carte de Batna entre 1844 – 1923. (Source : PDAU de Batna, 1998).....	152
Figure IV.10: Carte de Batna entre 1923 – 1945. (Source : PDAU de Batna, 1998).....	153
Figure IV.11: Carte de Batna entre 1945 – 1962. (Source : PDAU de Batna, 1998).....	154
Figure IV.12: La méthodologie du travail. (Source : Auteure, 2021)	160
Figure IV.13: Le Processus de travail. (Source : Auteure, 2021).....	162
Figure IV.14: L'évolution spatio-temporelle de la ville de Batna pour les périodes 1986, 2000, 2019, (la tache urbaine en blanc). (Source : Auteure, 2021).....	170
Figure IV.15: Cartes des températures de surface du sol (LST) pour la commune et ville de Batna En 1986. (Source : Auteure, 2021).....	171
Figure IV.16: Cartes des températures de surfaces du sol (LST) pour la commune et la ville de Batna en 2000. (Source : Auteure, 2021)	172
Figure IV.17: Les cartes de température de surface du sol (LST) pour la ville de Batna (1986, 2000, 2019). (Source : Auteure, 2021)	172
Figure IV.18: Les deux sites d'étude. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par auteure, 2019)	176
Figure IV.19: Les stations de mesure retenues pour l'investigation. (Source: Google Earth Pro, réadaptée par auteure, 2019).....	177
Figure IV.20: Les stations de mesure retenues pour l'investigation. (Source : Goole Earth Pro, réadaptée par auteure, 2019).....	177
Figure IV.21: Les voies de desserte + un équipement dans la cité 500 logements. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par auteure, 2019).....	180
Figure IV.22: Les différents secteurs + les équipements du lotissement Kemouni. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par auteure, 2019).....	181
Figure IV. 23 :Thermomètre 38 mm plat globe gris. (Source : Thorsson et al., 2007).....	185
Figure V.1: Diagramme de flux des données. (Source : Knodel, 2012).....	202

Figure V.2: Différents scénarios par ENVI-met pour atténuer l'effet de l'UHI. (Source : Mahdavi et al., 2014).....	203
Figure V.3 : Corrélation positive entre les valeurs mesurées et les résultats de simulation. (Source : Morkinyo et al., 2018).....	204
Figure V.4: Zones de modèle représentées dans Google Earth et ENVI-met Spaces. (Source : Sinsel et al., 2021)	204
Figure V.5: Corrélation entre les valeurs (température de l'air, humidité relative et vitesse du vent) observées et simulées dans le parc (Golha) in Mashhad City. (Source : karimi Afshar et al.,2018).....	205
Figure V.6: L'icône et l'interface du logiciel ENVI-met 4 avec licence science. (Source : Guide ENVI-met 4, 2021).....	205
Figure V.7: L'interface de la fenêtre Monde ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021).....	206
Figure V.8: L'interface de la fenêtre Spaces ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021).....	206
Figure V.9 : L'interface de la fenêtre ENVI-guide ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021).....	207
Figure V.10: L'interface de la fenêtre ENVI-core. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)	207
Figure V.11: L'interface de la fenêtre de BIO-met. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)	207
Figure V.12: L'interface de la fenêtre de Leonardo, ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021).....	208
Figure V.13: Les étapes de simulation pour les deux tissus urbains (les 500 logements en particulier). (Source : Auteure, 2021).....	213
Figure VI.1: Le protocole d'amélioration adopté. (Source : Auteure, 2021)	247
Figure VI.2: Les étapes de création du modèle de simulation. (Source : Auteure, 2021).....	248
Figure VI.3: Scénario cas de base 17% (Source : Auteure).	251
Figure VI.4: Scénario (a) cas 34% (Source : Auteure).....	251
Figure VI.5: Scénario (b) cas 51% (Source : Auteure).....	252
Figure VI.6: Scénario (c) cas 68% (Source : Auteure).....	252
Figure VI.7: Scénario N°01 cas de densité 17% Hauteur 30m (Source : Auteure).....	253
Figure VI.8: Scénario N°02 cas de densité 17% Hauteur 45m (Source : Auteure).....	253
Figure VI.9: Scénario N°03 cas de densité 17% Hauteur 60m (Source : Auteure).....	253
Figure VI.10: Scénario N°04 cas de densité 34% Hauteur 30m (Source : Auteure).....	254
Figure VI.11: Scénario N°05 cas de densité 34% Hauteur 45m (Source : Auteure).....	254
Figure VI.12: Scénario N°06 cas de densité 34% Hauteur 60m (Source : Auteure).....	254
Figure VI.13: Scénario N°07 cas de densité 51% Hauteur 30m (Source : Auteure).....	255
Figure VI.14: Scénario N°08 cas de densité 51% Hauteur 45m (Source : Auteure).....	255
Figure VI.15: Scénario N°09 cas de densité 51% Hauteur 60m (Source : Auteure).....	255
Figure VI.16: Scénario N°10 cas de densité 68% Hauteur 30m (Source : Auteure).....	256
Figure VI.17: Scénario N°11 cas de densité 68% Hauteur 45m (Source : Auteure).....	256
Figure VI.18: Scénario N°12 cas de densité 68% Hauteur 60m (Source : Auteure).....	256

Liste des tableaux

Tableau I.1: Les trois indices de formes géométriques simples : Indices de Miller, Morton et Gravélius. (Source : Maignant, 2005)	30
Tableau I.2: Les valeurs de la température de l'air ambiant, la température radiante et le PMV. (Source: Boucheriba et al, 2010)	58
Tableau I.3: Albédos selon les types de surfaces. (Source: Parlow, 2011)	60
Tableau II.1: La Température Perçue (Index Humidex) et le degré d'inconfort perçu en relation à la température de l'air et aux taux d'humidité, (Source : Boussoualim, 2002).	72
Tableau II.2: Echelle Beaufort. (Source : Szöcs, 2005)	73
Tableau II.3: Production d'énergie métabolique pour différents types d'activités. (Source : AFNOR, ISO 7730, 2005.	75
Tableau II.4: Isolement thermique de combinaisons vestimentaires types. (Source : AFNOR, ISO 7730, 2005)	76
Tableau II.5: Les échelles de sensation thermique selon Fanger et Michael Bruse. (Source : Traité par l'auteur, 2020)	84
Tableau II.6: Classes de la perception thermique et le niveau du stress physiologique indiquées par la PET pour un individu moyen. (Source : SAHABI-ABED Et KERROUCHE, 2017), (Réadapté par l'auteur)	90
Tableau II.7: Différentes catégories de l'UTCI selon le stress thermique. Source : (Boko et al., 2013), (Réadapté Par l'auteur).	92
Tableau II.8: La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique. Source : (Parsons, 2003), Réadapté par l'auteur.	93
Tableau II.9 : Les valeurs du budget énergétique et les sensations thermiques. Source : (Cantini et al., 2019), (Réadapté par l'auteur).	95
Tableau II.10 : Échelle à sept points pour l'évaluation de la sensation thermique prédite qui ont été appliquées aux résultats du budget COMFA. Source : (Kenny et al., 2009).	96
Tableau II.11: Les valeurs de la température perçue et les niveaux de stress thermique. (Source : Musy, 2008).	97
Tableau II.12: L'échelle d'évaluation de l'indice de chaleur (HI). (Source : Emmanuel et al., 2016)	102
Tableau II.13: Les valeurs limites de l'indice Humidex. (Source : Centre Canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2004).	103
Tableau II.14: Valeurs de référence de l'indice WBGT pour différents niveaux d'activité de personnes qui sont acclimatées et non acclimatées à la chaleur. les valeurs suivantes sont obtenues pour des études en milieu extérieur avec une vitesse de vent supérieur à 0,1. (Source : Emmanuel et al., 2016).	104
Tableau III.1: Paramètres du cas (valeurs moyennes dans la zone bâtie de Wuhan). (Source : Zhou et Chen, 2018).	110
Tableau III.2: Les échantillons choisis. (Source : Hamel, 2005).	113

Tableau III.3 : Les indicateurs de densité et de compacité du cadre bâti. (Source : Hamel, 2005)	114
Tableau IV.1: Les moyennes mensuelles de la température d'air de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)	144
Tableau IV.2: Les moyennes mensuelles de l'humidité relative de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)	145
Tableau IV.3: Les moyennes mensuelles des précipitations de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)	146
Tableau IV.4: Les moyennes mensuelles des vitesses du vent de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)	146
Tableau IV.5: Les moyennes mensuelles d'insolation de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)	147
Tableau IV.6 : Isothermes déterminant les différentes zones thermiques de l'année 2018. (Source : Auteure, 2019)	148
Tableau IV.7: L'indice d'aridité (Source : Auteur)	149
Tableau IV.8: Récapitulatif sur les typologies des tissus urbains dans la ville de Batna. (Source : Auteure, 2019)	157
Tableau IV.9: Dates d'acquisition et caractéristiques des données des images utilisées. (Source: Auteure, 2021)	161
Tableau IV.10: Les caractéristiques spécifiques du capteur Landsat 5TM. (Source: Auteure, 2021)	162
Tableau IV.11: Les caractéristiques spécifiques du capteur Landsat 8 OLI/TIRS. (Source, Auteure, 2021)	163
Tableau IV.12: Les valeurs de densité pour différentes périodes. (Source: Auteure, 2021)	164
Tableau IV.13: Les valeurs de l'indice de compacité Gravelius pour différentes périodes étudiées. (Source: Auteure, 2021)	165
Tableau IV.14: Les caractéristiques climatiques et morphologiques des tissus urbains choisis (Source: Auteure, 2021)	175
Tableau I.15: Les valeurs de la densité et de la compacité urbaines pour la cité 500 logements. (Source: Auteure, 2019)	180
Tableau IV.16: Les valeurs de la densité et de la compacité urbaines pour le lotissement Kemouni. (Source: Auteure, 2019)	182
Tableau IV.17: L'instrument Testo 480 data Logger utilisé dans la campagne de mesures. (Source: Auteure, 2019)	184
Tableau IV.18: Les indicateurs morphologiques et géométriques retenus pour chaque station. (Source: Auteure, 2019)	187
Tableau IV.19: Les indicateurs morphologiques et géométriques retenus pour chaque station. (Source: Auteure, 2019)	192

Tableau V.1 : Les matériaux utilisés dans la modélisation des deux tissus à l'état initiale. (Source : Auteure, 2021)	211
Tableau V.2: Les paramètres d'entrée introduits dans la simulation ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, 2021).....	212
Tableau V.3: Les valeurs du ratio H/L pour les quatre stations de chaque tissu urbain. (Source : Auteure, 2021).....	215
Tableau V.4: La carte des valeurs du FVC pour le quartier 500 logements et le quartier Kemouni. (Source : Auteure, 2021).....	216
Tableau V.5: Comparaison entre les valeurs des températures de l'air des deux sites. (Source : Auteure, 2021).....	217
Tableau V.6: Comparaison entre les valeurs des températures moyennes radiantes des deux sites. (Source : Auteure, 2021)	220
Tableau V.7: Comparaison entre les valeurs de rayonnement solaire pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)	223
Tableau V.8: Comparaison entre les valeurs des humidités relatives des deux sites. (Source : Auteure, 2021).....	225
Tableau V.9 : Comparaison entre les valeurs des vitesses du vent pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021).....	228
Tableau V.10: Les valeurs moyennes des paramètres microclimatiques simulés. (Source : Auteure, 2021).....	230
Tableau V.11: Les valeurs moyennes du PMV. (Source: Auteure, 2021).....	232
Tableau V.12: Comparaison entre les valeurs du PMV pour les deux sites. (Source: Auteure, 2021).....	233
Tableau V.13: Les valeurs moyennes du PET. (Source : Auteure, 2021).....	236
Tableau V.14: Comparaison entre les valeurs de PET pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)	236
Tableau V.15: Les valeurs moyennes d'UTCI. (Source : Auteure, 2021)	238
Tableau V.16: Comparaison entre les valeurs d'UTCI pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)	239
Tableau VI.1: Les valeurs du facteur de vue du ciel en fonction de densité pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	257
Tableau VI.2: Les valeurs de FVC dans chaque scénario de simulation. (Source : Auteure, 2021)	259
Tableau VI.3: Les indicateurs morphologiques et géométriques pour différents scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	264
Tableau VI.4 : Cartes des températures de l'air à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	268
Tableau VI.5: Cartes des températures de l'air à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	271
Tableau VI.6: Les cartes des humidités relatives à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	274

Tableau VI.7: Les cartes des humidités relatives à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	276
Tableau VI.8 : Les cartes des vitesses du vent à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021).....	278
Tableau VI.9: Les cartes des vitesses du vent à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021).....	280
Tableau VI.10 : Les cartes des températures moyennes radiantés (TMR) à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	283
Tableau VI.11: Les cartes des températures moyennes radiantés (TMR) à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	286
Tableau VI.12: Les cartes de rayonnement solaire direct à 14h00 pour les quatre Scénarios Simulés. (Source : Auteure, 2021).....	288
Tableau VI.13: Les cartes de rayonnement solaire direct à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	289
Tableau VI.14: Les d’UTCI à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	292
Tableau VI.15: Les d’UTCI à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	294

Liste des graphes

Graphe II. 1: Variation du PPD en fonction du PMV. (Source : ASHAE, 2009)	85
Graphe II. 2: Corrélation entre les valeurs de la PET et de la TMR. (Source : Matzarakis, 2006)	88
Graphe III.1: Intensité diurne moyenne de l'ICU de la zone bâtie pour le cas 1965 et le cas 2008. (Source : Zhou et Chen, 2018).....	111
Graphe III.2: Les écarts absolus des paramètres mesurés dans les différents quartiers par rapport à la station météorologique. (Source : Hamel et Mazouz, 2005).....	113
Graphe III.3 : Les valeurs de corrélation des flux simulés. (Source : Lindberg et al., 2018)..	134
Graphe IV. 1: Les moyennes mensuelles de la température de l'air de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019).....	144
Graphe IV. 2: Les moyennes mensuelles de l'humidité relative de 2009 à 2018). (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna)	145
Graphe IV. 3: Les moyennes mensuelles de précipitations de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019).....	146
Graphe IV. 4: Les moyennes mensuelles des vitesses du vent de 2009 à 2018. (source : auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de batna, 2019)	147
Graphe IV. 5: Les moyennes mensuelles de précipitations de 2009 à 2018. Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019.	147
Graphe IV. 6: Indice d'aridité de la ville de batna de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)	149
Graphe IV. 7: L'évolution de l'emprise du sol moyenne de l'habitat collectif dans la ville de Batna. (Source : Benamouma, 2019).....	179
Graphe IV. 8: Les valeurs du ratio H/L en fonction des stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)	188
Graphe IV. 9: Les valeurs du FVC en fonction des stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)	189
Graphe IV. 10: Comparaison entre les températures de l'air mesurées au niveau des quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))	190
Graphe IV. 11: Comparaison entre les humidités relatives mesurées pour les quatre stations pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019)).....	190
Graphe IV. 12: Comparaison des vitesses du vent mesurées pour les quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))	191

Graphe IV. 13: Comparaison des températures moyennes radiantés pour les quatre stations. (Source : Auteure, (23/07/2019)).....	192
Graphe IV. 14: Les différentes valeurs du ratio H/L en fonction des quatre stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)	194
Graphe IV. 15: Les différentes valeurs du FVC en fonction des quatre stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)	194
Graphe IV. 16: Comparaison entre les températures de l'air mesurées pour les quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019)).....	195
Graphe IV.17: Comparaison entre les humidités relatives mesurées pour les quatre stations pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019)).....	196
Graphe IV.18: Comparaison des vitesses du vent mesurées pour les quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, 23/07/2019)).....	196
Graphe IV.19: Comparaison des températures moyennes radiantés pour les quatre stations. (Source : Auteure, 23/07/2019)).....	197
Graphe V.1: Corrélation entre les différents paramètres climatiques mesurés et simulés. (Source : Auteure, 2021).....	214
Graphe V.2: Comparaisons entre les deux sites simulés (Source : Auteure, 2021).	231
Graphe V.3: Corrélation entre le PMV, la PET, l'UTCI, et la température de l'air. (Source : Auteure, 2021).....	242
Graphe V.4: Corrélation entre le PMV, la PET, l'UTCI et l'humidité relative. (source : Auteure, 2021).....	243
Graphe V.5: Corrélation entre PMV, PET, UTCI, et vitesse du vent. (Source : Auteure, 2021)	243
Graphe V.6: Corrélation entre température moyenne radiante et PMV, PET, et UTCI. (Source : Auteure, 2021).....	244
Graphe VI.1: Corrélation entre la densité surfacique et la compacité urbaine (coefficient de forme, et rapport surfaces exposées/ surfaces non exposées). (Source : Auteure, 2021).	265
Graphe VI.2: Corrélation entre la densité surfacique et le facteur de vue du ciel (FVC), et le ratio H/L. (Source : Auteure, 2021).....	265
Graphe VI.3 : Corrélation entre la hauteur des constructions et le facteur de vue du ciel (fvc). (Source : Auteure, 2021)	267
Graphe VI.4: Comparaison entre les températures de l'air moyennes des quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	268
Graphe VI.5: Comparaisons entre les températures de l'air pour les hauteurs 15m, 30m, 45m, et 60m pour au niveau de chaque cas de densité surfacique. (Source : Auteure, 2021).....	270
Graphe VI.6: Comparaison entre les humidités moyennes des quatre stations pour chaque scénario simulé. (Source : Auteure, 2021)	273
Graphe VI.7 : Comparaisons entre les humidités relative pour les hauteurs 15m, 30m, 45m, et 60m pour au niveau de chaque cas de densité surfacique. (Source : Auteure, 2021).....	275
Graphe VI.8: Comparaison entre les vitesses du vent moyennes des quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	278

Graphe VI.9: Comparaison entre les vitesses du vent moyennes des douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	280
Graphe VI.10: Comparaison entre les valeurs moyennes des températures radiantes des quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	283
Graphe VI.11: Corrélation entre la température moyenne radiante et le degré de densité. (Source : Auteure, 2021).....	284
Graphe VI.12: Comparaison entre les valeurs moyennes des températures radiantes des douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)	285
Graphe VI.13 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour les différents cas de densité (17%, 34%, 51%, 68%). (Source : Auteure, 2021)	291
Graphe VI.14: Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 17% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021).....	293
Graphe VI.15: Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 34% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021).....	293
Graphe VI.16 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 51% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021).....	293
Graphe VI.17: Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 68% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021).....	293

Chapitre Introductif



Introduction générale

La ville, en tant que phénomène d'urbanisation complexe, résulte à partir des réactions de multiples facteurs, notamment historiques, sociaux, économiques, politiques, technologiques et environnementaux. Représentant l'expression la plus élaborée de la pensée humaine, la ville demeure en perpétuelle évolution. Selon les données de l'ONU (2019), plus de 55% de la population mondiale se situe actuellement en regroupement urbain, et cette proportion devrait atteindre 68% d'ici 2050. Cette croissance urbaine pose un défi environnemental majeur en raison du réchauffement climatique, des émissions de gaz à effet de serre, de la pollution de l'air et de l'îlot de chaleur urbain, phénomène où les températures locales sont plus accentuées qu'aux alentours des villes (Oke, 1982; Voogt, 2004).

Face à la croissance continue de la complexité urbaine et à son impact important sur l'environnement et les conditions de vie, les défis environnementaux des zones urbaines sont devenus une préoccupation centrale dans la planification des villes durables. L'élévation de la température ambiante dans les localisations urbaines, suscite une inquiétude particulière, dans ce contexte, la préservation de l'environnement est désormais une préoccupation centrale, partagée par l'ensemble des acteurs urbains, soulignant l'importance d'une vision durable dans le développement urbain (El Hozayen, 2013).

La morphologie urbaine, à travers les différentes formes qu'elle revêt, se positionne comme un élément fondamental du paysage urbain. Elle constitue une composante essentielle dans la création de microclimats variés, exerçant ainsi une influence directe sur le confort thermique des individus dans les espaces publics extérieurs. La morphologie urbaine impacte de manière significative le confort thermique en modifiant les paramètres climatiques, l'exposition au soleil et aux vents, ainsi que la qualité de l'air. En période de canicules et de vagues de chaleur, les espaces urbains peuvent devenir inconfortables, voire même dangereux pour la santé des usagers.

Les structures bâties au sein du tissu urbain ayant un impact considérable dans la modification des paramètres microclimatiques à l'échelle locale, perturbent la distribution des flux d'air et amplifient les échanges thermiques entre les surfaces. Le bilan énergétique thermo-radiatif des espaces extérieurs est étroitement lié à la nature et à la morphologie de l'agencement des bâtiments, par conséquent, les espaces urbains extérieurs, tels que les places, les rues, les parcs et les jardins, remplissant diverses fonctions sociales, économiques, environnementales et paysagères, en dépit de leur rôle primordial dans la qualité de vie et le confort thermique des habitants, ces espaces font face à des défis résultant de l'urbanisation rapide et du changement

climatique. La question du confort thermique en milieu urbain est devenue de plus en plus préoccupante de nos jours.

Dans un environnement chaud et aride, des analyses ont démontré que l'accroissement du rapport H/L (Hauteur du bâtiment / largeur de la rue) réduit la température de l'air. En parallèle, l'orientation joue un rôle crucial dans la régulation des flux d'énergie solaire, qu'ils soient directs ou diffus, ainsi que la durée d'ensoleillement. Cette durée diminue progressivement avec l'augmentation du rapport H/L. La configuration géométrique des formes urbaines, caractérisée par la hauteur des bâtiments par rapport à leur distance, influe sur le pourcentage du rayonnement solaire direct, atteignant les surfaces du bâti, ainsi que sur les flux émis vers le ciel, avec des longueurs d'onde importantes. De plus, les constructions urbaines impactent les flux d'air, avec une réduction de la vitesse constatée, pour un rapport H/L élevé. La rétention des émissions infrarouges, combiné à une ventilation insuffisante de la rue, intensifie l'effet d'îlot de chaleur, amplifiant ainsi l'inconfort thermique des piétons (Oke, 1976). Les surfaces sombres et absorbantes de chaleur, comme l'asphalte et le béton, ont la capacité d'absorber et de retenir la chaleur du soleil, contribuant ainsi à l'élévation de la température de l'air (Mensouri et al., 2017). Cependant, ces configurations peuvent également proposer des solutions efficaces pour réguler le microclimat urbain lorsqu'elles sont bien adaptées. Elles peuvent assurer une augmentation des surfaces ombragées tout en limitant l'exposition directe au rayonnement solaire.

Les modifications des paramètres microclimatiques ont des conséquences instantanées sur le ressenti thermique des utilisateurs en espaces extérieurs. Des analyses antérieures ont mis en pleine vue la relation entre la géométrie des rues et les paramètres climatiques, ainsi que le confort thermique en milieu urbain.

La compréhension de l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat urbain et le confort climatique dans les espaces urbains extérieurs est essentielle pour la conception de villes durables et résilientes face aux changements climatiques. Les urbanistes, les architectes et les décideurs doivent intégrer ces considérations lors de la conception de nouveaux projets urbains ou de la rénovation des espaces existants, en incorporant des caractéristiques urbaines favorisant la régulation climatique, surtout dans les climats hostiles.

Les tissus urbains, riches par leurs variations de formes urbaines et leurs typologies, présentent un environnement difficile à gérer vu le nombre important des variables microclimatiques présentes à l'extérieur. Bien que plusieurs études soulignent le rôle prédominant de la morphologie urbaine dans le contrôle du microclimat, en préconisant la

densité et la compacité urbaines comme des éléments déterminant (Johansson et Yahia, 2010), peu ont démontré de manière concluante les performances environnementales d'une ville dense et compacte.

Dans un cadre urbain, les variations de la configuration spatiale des bâtiments entraînent des modifications dans les paramètres climatiques tels que la chaleur atmosphérique et surfacique, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent, ces ajustements peuvent directement impacter le confort thermique en extérieur et le bien-être des usagers. Toutefois, une attention particulière doit être accordée à l'analyse de l'environnement thermique extérieur, car ce dernier nécessite la combinaison de plusieurs approches pour son évaluation (Maurus Baruti et al., 2019).

Ainsi, la ville, dans sa quête de durabilité et d'adaptation aux effets du changement climatique, cherche à développer des stratégies de mitigation, notamment par la modulation de la morphologie des formes urbaines, afin de minimiser les radiations solaires reçues par les différentes surfaces (sol et façades) tout en favorisant la création de zones ombragées.

Cette investigation vise à étudier les liens existants entre la morphologie des formes urbaines et les microclimats, en mettant particulièrement l'accent sur l'évaluation quantitative du confort thermique et du bien-être individuel dans les espaces urbains extérieurs. De plus, elle s'efforcera de démontrer comment la morphologie urbaine, à travers les indicateurs de densité et de compacité urbaine, influence les microclimats urbains à différentes échelles, dans le but ultime de proposer des configurations spatiales adaptées pour garantir des niveaux de confort thermique extérieur agréables durant les périodes de surchauffes estivales.

Notre étude se concentre sur l'étude de la ville de Batna, désormais réputée comme l'une des villes les plus chaudes de l'Algérie.

Notre approche vise à évaluer les niveaux de confort climatique estival dans ses espaces. Par la suite, notre démarche se focalisera sur l'amélioration des niveaux de confort climatique dans les espaces extérieurs de Batna, en mettant en œuvre un processus de régulations microclimatiques basées sur l'optimisation de la forme urbaine.

Problématique

L'urbanisme actuel est confronté au défi de réconcilier l'évolution inévitable des villes avec la préservation d'un environnement climatique de haute qualité thermique. Les problèmes climatiques imposent aux villes la nécessité de repenser leur conception urbaine afin de réaliser un développement durable. Aujourd'hui, la morphologie urbaine doit agir avec un enjeu prépondérant dans l'optimisation de la qualité d'environnement vis-à-vis des villes en établissant des liens étroits avec le milieu naturel.

La morphologie urbaine se caractérise par une structure complexe qui donne lieu à la formation de divers microclimats, influençant ainsi le confort thermique des individus. Cette influence découle de son impact sur la circulation de l'air et la rétention de la chaleur. Les paramètres clés utilisés pour analyser les propriétés physiques de la canopée urbaine, comprennent la densité de construction, la compacité urbaine, les hauteurs moyennes des constructions, les espacements et les arrangements des bâtiments, le rapport d'aspect H/L, le facteur de vue du ciel (FVC), l'orientation des rues, ainsi que d'autres paramètres physiques, comme l'albédo des surfaces et le métabolisme urbain résultant des flux de chaleur anthropiques, qui sont des composants essentiels de la morphologie urbaine et qui ont un impact, positif ou négatif, sur le climat et le confort thermique dans les zones urbaines.

Dans les zones urbaines à climat semi-aride, telle la ville de Batna, les problèmes climatiques se font particulièrement ressentir lors de la saison estivale, caractérisée par un climat plus rigoureux et des variations temporelles de sensations thermiques en extérieur. Les spécifications morphologiques de la ville, en association avec les indicateurs mentionnés précédemment, performe un rôle majeur sur la modulation des paramètres microclimatiques tels que la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température moyenne radiante. Ces éléments contribuent directement à la création d'environnements urbains extérieurs inconfortables sur le plan thermique.

Dans cette perspective, notre analyse se focalise sur la morphologie des formes urbaines ainsi que sur la géométrie des espaces, en examinant leur impact sur la formation des microclimats urbains. Nous cherchons à comprendre comment la morphologie urbaine peut aggraver ou atténuer les problèmes associés à la surchauffe urbaine estivale. Cette approche revêt une importance particulière dans les régions chaudes et arides, où les habitants font souvent face au stress thermique en raison du manque de fraîcheur et d'ombre à l'extérieur. Cette réalité les pousse à délaisser les espaces extérieurs au profit d'un refuge à l'intérieur,

souvent accompagné d'une utilisation intensive de la climatisation, entraînant une consommation d'énergie accrue.

Dans ce cadre, les questions fondamentales qui guident notre problématique sont les suivantes :

- Comment la forme urbaine, le microclimat et le confort thermique extérieur sont-ils influencés par la morphologie urbaine?
- De quelles manières et par quels moyens peut-on arriver à trouver une conception urbaine appropriée du cadre bâti dans un climat semi-aride afin d'atteindre des niveaux de confort thermique extérieur souhaitables ?

Hypothèses de la recherche

À travers la littérature, de nombreuses recherches ont démontré le rôle déterminant de la morphologie urbaine dans la génération des microclimats dans les villes. Les études effectuées ont montré l'efficacité des anciennes villes compactes et denses dans la modération du climat en zones arides et chaudes (Ali-Toudert et al., 2005 ; Johansson, 2006 ; Hamel, 2005). Cependant, peu de recherches se sont concentrées sur la morphologie urbaine pour optimiser la forme urbaine dans un climat similaire au nôtre.

Par conséquent nos hypothèses sont les suivantes :

- La géométrie urbaine des espaces extérieurs est déterminée par les indicateurs morphologiques qui influencent la morphologie des formes urbaines. Cette régulation favorise la formation de microclimats distincts d'un espace à un autre, ceci comme hypothèse principale.
- Optimiser la forme urbaine dépendrait de la morphologie urbaine, qui se reflète dans la densité surfacique bâtie, la compacité urbaine et la hauteur des constructions. Cette optimisation contribuerait à améliorer le confort thermique extérieur des espaces urbains dans les zones chaudes et sèches, étant la sous-hypothèse.

Objectifs de la recherche

Dans le sujet actuel du changement climatique, il est devenu primordial de limiter les effets de ce changement sur le climat des villes en améliorant les conditions thermiques extérieures des espaces urbains. Cette préoccupation constitue un défi à relever dans le contexte des objectifs du développement durable, visant à créer des villes durables et résilientes.

Les espaces urbains extérieurs, à l'échelle d'une ville, désignent l'ensemble des espaces utilisés par les citoyens et représentent des éléments essentiels du paysage urbain. Ce sont des espaces de vie offrant une perspective sur la ville, englobant tous les espaces libres (espaces de voisinage, espaces pré-habitation, places, trottoirs, rues, espaces verts, etc.). Ils favorisent les échanges, les rencontres et diverses activités ludiques. Afin de permettre aux usagers d'utiliser pleinement ces espaces, il est indispensable qu'ils offrent un certain niveau de qualité thermique.

Notre travail vise à améliorer le confort thermique dans les espaces extérieurs. À cette fin, le travail s'est structuré sur les objectifs suivants :

- L'objectif fondamental de notre recherche est d'étudier comment optimiser la morphologie des formes urbaines en tenant compte de l'évolution actuelle des villes.
- Élaborer une base de données de paramètres climatiques (température de l'air, humidité relative de l'air et vitesse de l'air).
- Analyser l'évolution urbaine de la ville de Batna pour différentes périodes pour étudier les conséquences de l'évolution urbaine sur le climat local.
- Localiser les îlots de chaleur surfaciques dans la ville de Batna pour différentes périodes.
- Identifier les indicateurs morphologiques et géométriques influençant sur (formes urbaines, microclimat et confort thermique extérieur) au niveau de la ville, des tissus urbains, et des espaces extérieurs.
- Examiner les configurations urbaines des différents tissus urbains contemporains pour étudier leurs effets sur le microclimat urbain.
- Démontrer que le microclimat d'une zone semi-aride telle que Batna peut être régulé par le choix judicieux des formes urbaines optimales en fonction des besoins actuels de la ville.

L'analyse conceptuelle de notre recherche

L'analyse conceptuelle permet d'identifier les concepts de base de notre thématique de recherche et également les différentes variables.

D'après la figure (0.1), les variables issues de notre thématique sont les suivantes :

- La variable principale (indépendante) : la morphologie urbaine ;
- La variable intermédiaire : le microclimat urbain ;
- La variable dépendante : le confort thermique.

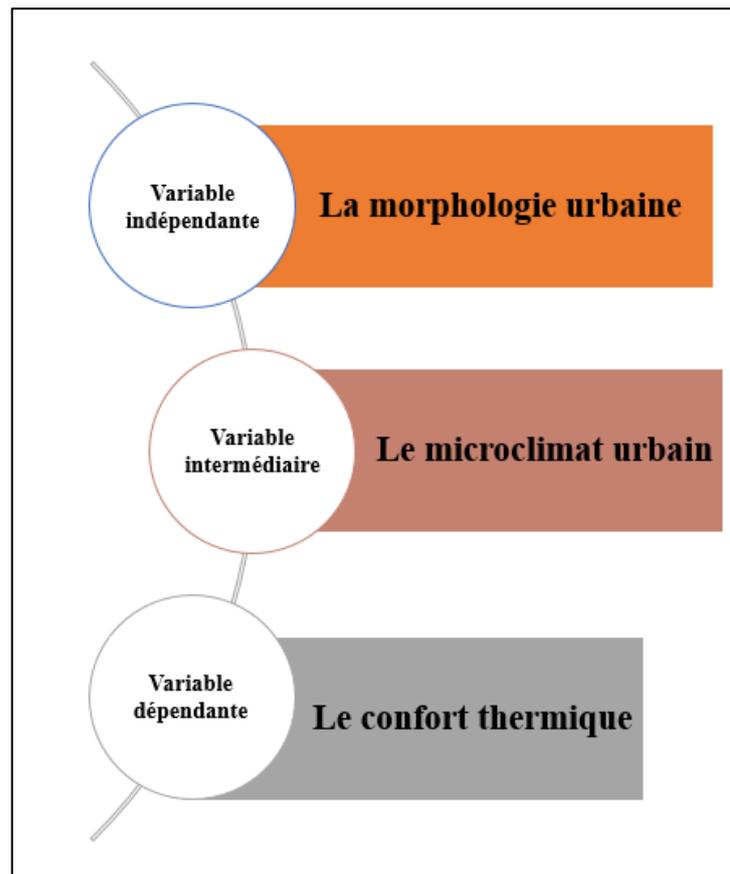


Figure 0. 1: Les variables de la recherche illustrant l'interaction entre la morphologie des formes urbaines, le microclimat urbain et le confort thermique en extérieur. (Source : Auteure, 2017)

Ensuite, et dans le but de comprendre ces variables et leurs interactions, nous tenterons de les décomposer par un schéma (figure 0.2) montrant chaque variable avec ses indicateurs mesurables ainsi que la technique de mesure utilisée :

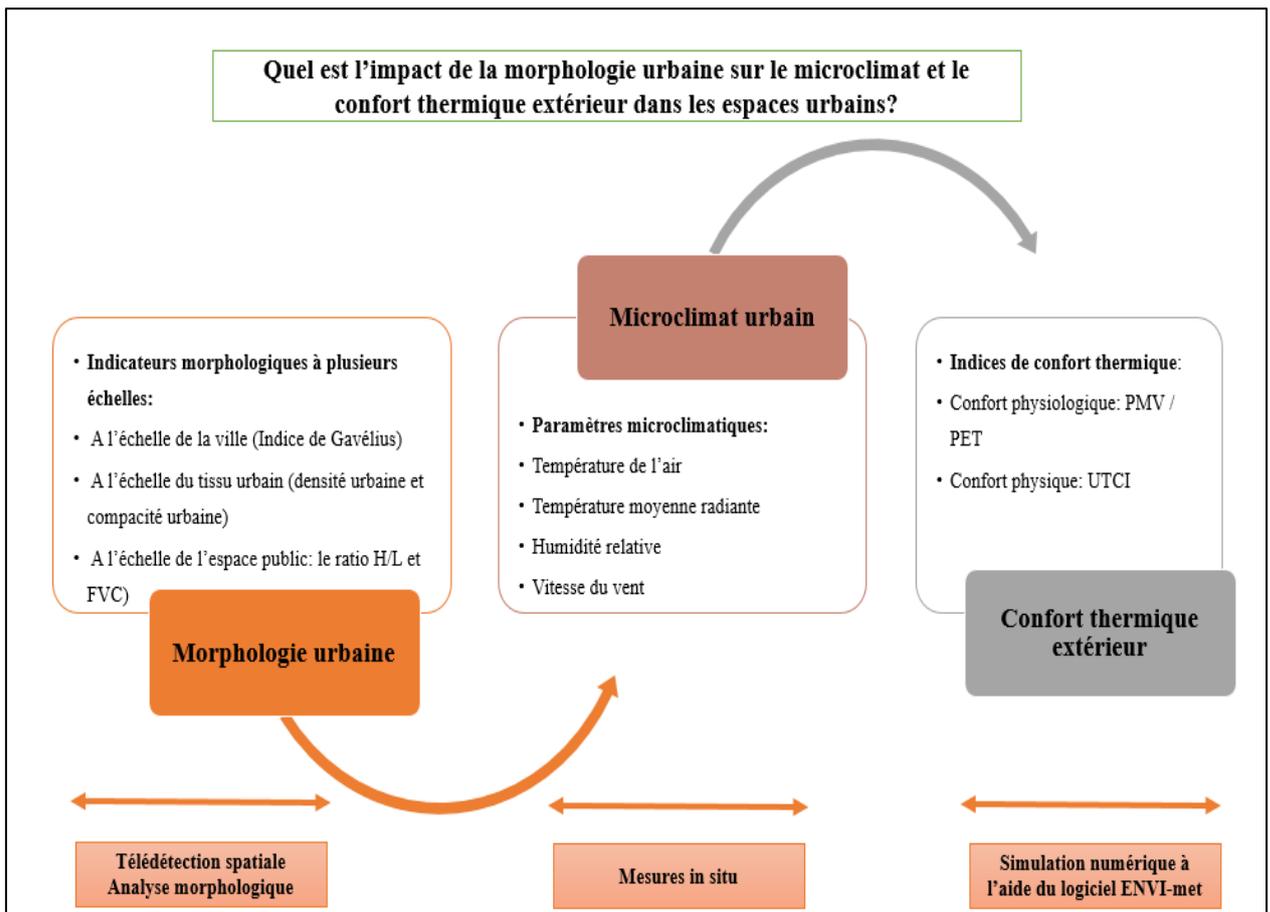


Figure 0. 2: Schéma figurant la structure conceptuelle de recherche. (Source : Auteure, 2017)

Méthodologie et outils de la recherche

« La méthodologie est un outil de démonstration ayant pour finalité de confirmer ou d'infirmer les hypothèses » (Bouchaib, 2002).

Le thème de recherche abordé porte sur l'influence de la morphologie urbaine sur le climat urbain et l'usage de l'espace extérieur. Pour atteindre l'objectif défini, une méthodologie de travail a été déployée en deux grandes parties : la partie théorique et la partie pratique, les deux parties sont présentées comme suit :

La partie théorique

Cette partie sera consacrée à la présentation des différents concepts relatifs à la morphologie urbaine, au microclimat, et au confort thermique dans les espaces urbains extérieurs, à travers une revue de littérature. Elle sera principalement orientée vers la documentation et la consultation des travaux antérieurs évoquant la même thématique que la nôtre, à travers un maximum d'ouvrages, articles, thèses, mémoires, certains sites et documents sur internet.

- **partie pratique**

Cette partie présente l'apport personnel du chercheur, par laquelle les hypothèses énoncées précédemment seront confirmées ou infirmées. Suivant notre objectif de recherche, la partie pratique sera appuyée sur la combinaison de plusieurs méthodes scientifiques. Elle sera répartie comme suit :

L'utilisation de la télédétection spatiale pour évaluer l'impact de la morphologie urbaine sur le climat urbain de la ville de Batna

Cette approche est devenue un sujet d'actualité de nos jours, et les apports de la télédétection sont d'une grande importance dans le domaine de l'urbanisme et de la climatologie urbaine.

L'étude débutera par une analyse de l'effet des changements de la composition et de la configuration spatiale de la ville de Batna sur la répartition spatiale de la température de surface du sol (LST) et le climat urbain.

Cette section est scindée en deux parties, la première a pour base d'analyser les variations spatio-temporelles de la tache urbaine de la ville de Batna à l'aide des cartes d'occupation du sol et du calcul des indices morphologiques permettant d'estimer l'évolution de l'espace urbain.

Les cartes d'occupation du sol ont été élaborées à partir d'une classification des images du logiciel d'observation de la terre Google Earth Pro, cette étape permet de générer des cartes et de calculer les superficies et les périmètres des espaces bâtis et non bâtis.

La deuxième partie consiste à estimer la température de surface du sol (LST) et les îlots de chaleur urbains surfaciques de la ville de Batna. L'ensemble des données employées constitue une série chronologique d'images satellitaires du capteur Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI/TIRS. Les images ont été téléchargées depuis le site web United States Geological Survey (USGS) sous forme de données géo-référencées avec une résolution spatiale de 30 mètres par pixel. Les images ont été collectées sur une durée de 15 ans, couvrant les années de 1986 à 2000 à 2019 et pendant la même saison (saison sèche le mois de juillet pour les trois périodes). Les cartes de la température de surface du sol (LST) ont été produites par le logiciel ArcGIS (10.2.1). Les cartes de la température de surface du sol (LST) nous ont permis de localiser les îlots de chaleur urbains surfaciques de la ville de Batna en relation avec la morphologie urbaine.

L'évaluation du confort thermique des tissus urbains de la ville de Batna

Après avoir détecté la distribution spatiale des îlots de chaleur urbains surfaciques dans la ville de Batna, deux tissus urbains ont été choisis pour l'investigation in situ selon des critères morphologiques et climatiques pour déterminer le confort thermique dans les espaces extérieurs. Les deux tissus urbains sont des quartiers résidentiels. Le premier est un quartier d'habitat collectif de grands ensembles et le deuxième est un quartier d'habitat individuel sous forme de lotissement.

Afin d'estimer le confort thermique dans les tissus sélectionnés, deux méthodes seront utilisées :

a. Les mesures in situ : Cette méthode consiste à prendre des mesures sur le terrain, au niveau des stations de mesure, choisies suivant des indicateurs géométriques bien déterminés.

Les paramètres microclimatiques mesurés dans chaque station sont : la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent). L'ensemble de ces paramètres sont les principaux facteurs qui influencent le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

La campagne de mesures sera déroulée pendant la période estivale du mois de juillet (le 23 juillet 2019), considérée comme journée type pour l'investigation (journée chaude, ensoleillée et peu ventée). Les mesures seront effectuées par l'appareil mobile équipé de différentes sondes (Testo 480).

b. La simulation numérique (logiciel ENVI-met 04) : La seconde méthode employée est l'approche de la modélisation et de la simulation numérique en 3D. C'est une méthode pratique, rapide et fiable, qui permet de prédire avec précision la distribution spatiale des paramètres physiques tels que la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent, ainsi que d'estimer le confort thermique extérieur à travers des indices thermiques (PMV, PET et UTCI).

Les mesures prises lors de la campagne de mesures permettront la validation du logiciel ENVI-met 04.

Cette partie sera également organisée en deux phases principales :

- La première phase consiste à la modélisation et la simulation de l'état réel des deux quartiers choisis précédemment pour l'investigation dans le but de la quantification du confort thermique dans leurs espaces extérieurs. Cette modélisation permettra d'établir une

comparaison morphologique, géométrique et microclimatique entre les deux sites simulés. Les résultats de simulation seront utilisés pour vérifier les résultats des méthodes déjà utilisées.

- La deuxième phase concerne l'optimisation de la forme urbaine afin d'améliorer le confort thermique dans les espaces extérieurs. Le logiciel ENVI-met 04 sera l'outil idéal pour effectuer des séries de simulation à travers différents scénarios d'aménagements urbains afin d'aboutir à de nouveaux résultats de recherche.

L'objectif primordial de notre recherche est l'amélioration des niveaux du confort climatique à travers l'optimisation de la forme urbaine. Cet objectif ne peut être atteint que si une combinaison des méthodes scientifiques susmentionnées est appliquée. L'évaluation du climat urbain à plusieurs échelles apporte une large compréhension de l'impact de la morphologie urbaine sur les ambiances thermiques extérieures, notamment sur le confort thermique.

Structure de la thèse

Notre recherche sera menée suivant deux grandes parties (théorique et pratique), chaque partie est composée de plusieurs chapitres, le travail est structuré de la manière suivante :

- **La première partie :** Cette partie repose sur un fondement théorique des concepts et des notions nécessaires pour la compréhension de notre thématique, elle comporte plusieurs chapitres :
 - **Le premier chapitre :** Traite des différents concepts sur le climat, le microclimat, le phénomène d'îlot de chaleur urbain, et les facteurs influençant le microclimat en milieu urbain. Il aborde également les concepts de morphologie urbaine et forme urbaine avec un bref historique sur leur évolution et l'identification des indicateurs morphologiques à différentes échelles spatiales. Ce chapitre présente la relation existante entre le climat urbain et la morphologie urbaine à travers les indicateurs morphologiques et géométriques ayant un impact sur le microclimat urbain.
 - **Le deuxième chapitre :** Porte sur la notion de confort thermique extérieur et les multiples indices de confort thermique adaptés à l'environnement extérieur. Ces indices sont classés en trois catégories selon leur méthode de calcul : les modèles de bilan énergétique, les indices empiriques et les indices fondés sur des équations linéaires.

- **Le troisième chapitre :** Il met l'accent sur l'état de l'art qui décrit de nombreuses études précédentes qui ont abouti à des approches et à des données présentées dans cette étude analysant l'interaction entre morphologie urbaine, microclimat et confort thermique dans les espaces urbains extérieurs à différentes échelles spatiales (échelle de la ville, échelle du tissu urbain et échelle de l'espace public). Ce chapitre tend également à présenter les différentes méthodes de caractérisation de l'interaction entre morphologie et climatologie urbaine sous une démarche d'investigation.

- **La deuxième partie :** Cette partie est composée de trois chapitres. Elle s'appuiera sur une approche d'investigation à travers la combinaison de plusieurs méthodes : la télédétection, la prise des mesures ponctuelles in situ et la simulation numérique. Les chapitres sont présentés comme suit :

- **Le premier chapitre** de cette partie, la ville de Batna est mise en évidence dans cette section, en présentant sa situation géographique, en effectuant une analyse bioclimatique pour pouvoir démontrer son appartenance au climat semi-aride à travers plusieurs données climatiques récoltées de la station météorologique de l'aéroport de Batna, et en réalisant une brève analyse des morphologies urbaines composantes la ville de Batna et de tirer les principales caractéristiques de chaque morphologie urbaine.

Ce chapitre établit également le processus méthodologique adopté pour répondre aux objectifs visés. Le processus méthodologique dans ce chapitre repose sur deux méthodes : la première est la technique de télédétection qui vise à évaluer l'impact de l'urbanisation de la ville de Batna sur son climat urbain. Cette évaluation s'effectue en analysant les variations de la température de surface du sol (LST) induites par les changements de l'étendue urbaine sur trois périodes distinctes (1986, 2000 et 2019). Les cartes d'usage du sol et les cartes de température de surface du sol (LST) sont générées pour illustrer ces variations.

La deuxième méthode utilisée dans ce chapitre est les mesures instantanées in situ, à travers une campagne de mesures microclimatiques.

- **Le deuxième chapitre** consiste en la simulation numérique qui reproduit les milieux urbains investigués dans le but d'évaluer l'environnement thermique urbain. Selon les résultats de simulation, une étude comparative sera réalisée entre les deux sites simulés.

Ce chapitre mettra en évidence les caractéristiques morphologiques et géométriques des espaces ayant un stress thermique extrême et des niveaux de confort climatique inférieurs, en comparaison avec des espaces ayant des niveaux de confort thermique supérieurs.

- **Le troisième chapitre** cherche à améliorer la qualité des ambiances thermiques extérieures et les niveaux de confort climatique des espaces urbains. Il envisage une optimisation de l'ensemble de la forme urbaine identifiée comme inconfortable par des séries de scénarios qui seront simulés à l'aide de l'outil informatique ENVI-met 04.

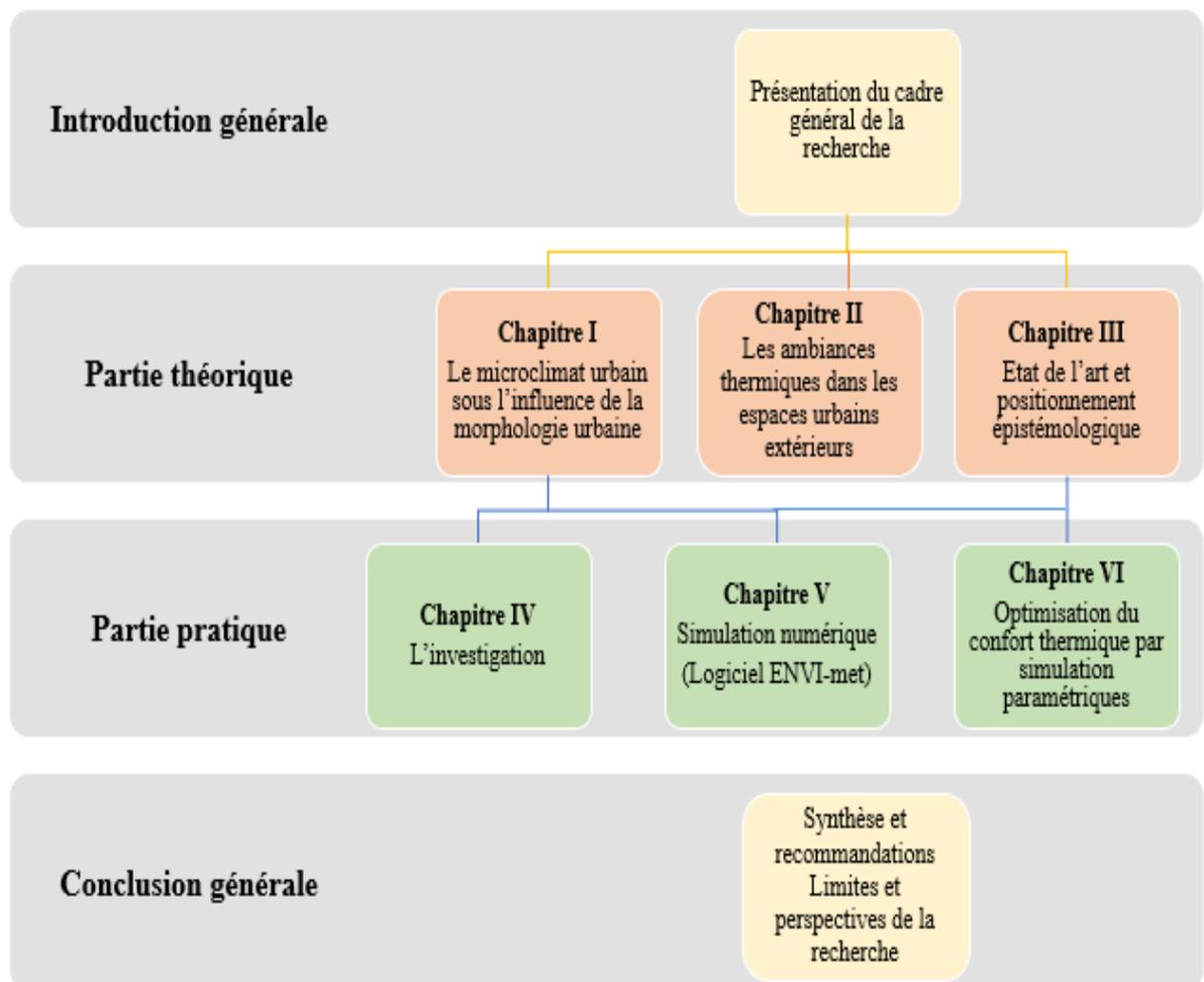


Figure 0. 3: Le plan de la thèse. (Source : Auteure, 2017)

Chapitre I : Le microclimat urbain sous l'influence de la morphologie urbaine

« Le climat influence la vie sur terre- celle de la faune et celle de la flore et, à plus long terme, modèle les reliefs terrestres. Le froid, la chaleur, la pluie, la sécheresse, le vent conditionnent les rythmes de vie des hommes, déterminant la nourriture, la façon de se vêtir, l'habitat et les déplacements de chacun sur la planète » (Chémery Laure)



« La climatologie urbaine est aujourd'hui un domaine de recherche investi à la fois par les climatologues et les géographes, mais également par les architectes et les urbanistes. Ceci permet de mettre en place une démarche pluridisciplinaire et d'intégrer à la pratique de l'aménagement urbain et de l'architecture des éléments de climatologie urbaine. Climatologues, géographes et aussi urbanistes et architectes réfléchissent ainsi ensemble ou parallèlement à l'intérêt de prendre en compte le climat urbain dans l'aménagement, l'urbanisme et l'architecture. Plus que le développement de nouveaux outils permettant de prendre en compte le climat urbain dans la conception urbaine, il s'agit aujourd'hui d'abord de promouvoir et d'organiser une meilleure synergie entre les différentes actions menées en faveur de l'environnement.» (Colombert et al., 2012)

Introduction

Depuis un certain temps, les études sur les liens entre le climat et la ville ont attiré l'attention des climatologues et des chercheurs. De nombreux écrits ont étudié cette question, certains remontant à l'Antiquité, comme le décrit Yashino (1990/1991), dans son article écrit sur la climatologie urbaine, l'auteur incite que les premiers travaux dans ce domaine sont ceux du célèbre architecte et ingénieur romain Marcus Vitruve (75-25 av. J.-C) a démontré que l'urbanisme et les conditions climatiques sont liés. L'auteur mentionne également les études de l'Indien Manasara Silpasatra (date inconnue av. J.-C.) qui a pris en considération les conditions de luminosité et de ventilation dans les rues.

D'autres auteurs tels qu'Horace (65-68 av. J.-C.) et Circa (3 av. J.-C. - 65) ont également décrit le climat de Rome à travers la pollution atmosphérique. Cependant, l'intérêt pour le climat urbain n'est réapparu qu'aux 12^{ème} et 13^{ème} siècles, dont témoignent les écrits de Sir John Evelyn sur l'incendie de Londres. Il réalise pratiquement le même travail qu'Horace et Circa, mais sur le climat londonien, en ajoutant des informations sur la température atmosphérique, les courants aérien et le smog. On trouve également les travaux de Cotte (1774), qui décrit le climat parisien, et ceux de Howard en 1818 et 1833 sur la ville de Londres. Leurs investigations sont basées sur des observations.

La climatologie urbaine a émergé à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle, avec l'avènement de mesures instrumentales et l'adoption de méthodes plus sophistiquées, notamment la télédétection au cours du 20^e siècle.

De nos jours, la ville se développe rapidement et se présente comme un espace avec une morphologie de formes urbaine variée qui reflète l'histoire urbaine, architecturale et sociale d'une époque spécifique. La dimension spatio-temporelle est au cœur de cette dynamique, car les formes qui définissent cet espace surgissent dans l'espace et évoluent au fil du temps. Ainsi, chaque idéologie politique importante a créé une forme urbaine unique (AUCAME, 2008). En outre, les mutations spatio-temporelles ont un impact important sur le climat présent des villes, et leur incidence sur les conditions climatiques se manifeste de manière croissante.

Dans tous les domaines de recherche, le climat est devenu une préoccupation majeure pour les spécialistes impliqués dans l'étude des changements climatiques. Les experts de l'urbanisme doivent exploiter les interactions entre le climat et son environnement naturel et urbain afin de fonder des milieux intérieurs et extérieurs confortables et adaptés aux conditions climatiques locales.

Ce chapitre présente dans un premier temps une analyse bibliographique des trois concepts clés. Ensuite la forme urbaine, qui balise notre thématique de recherche, est définie avec ses différents profils dans les tissus urbains. Par la suite, la distinction entre densité et compacité urbaines est mise en lumière. Enfin, les indicateurs principaux caractérisant la densité et la compacité des formes urbaines sont identifiés et analysés. Cette étape revêt une importance particulière pour appréhender ces notions et effectuer leur calcul.

I.1. Le climat urbain

I.1.1. L'étymologie du mot « climat » trouve son origine dans le terme grec « κλίμα » (KLIMA), décrivant l'inclinaison des rayons solaires et son impact sur la circulation atmosphérique. (Fellous, 2005).

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 1981), la définition du climat consiste en une moyenne calculée sur une période de 30 ans englobant l'ensemble des paramètres météorologiques tels que la température, la pression, les précipitations et les vitesses du vent. Ces paramètres définissent le comportement de l'atmosphère en un lieu géographique spécifique.

I.1.1. Les échelles spatiales du climat

Le climat se manifeste à différentes échelles caractérisées par des interactions atmosphériques et climatiques spécifiques (Guyot, 1997). Les climatologues ont interprété ces niveaux phénoménologiques en les organisant selon des échelles climatiques emboîtées. Ainsi, selon Oke (1987), le climat comprend quatre échelles, les plus petites dépendant des plus grandes. Cette classification est essentielle pour appréhender la variabilité climatique aux diverses résolutions spatiales et temporelles :

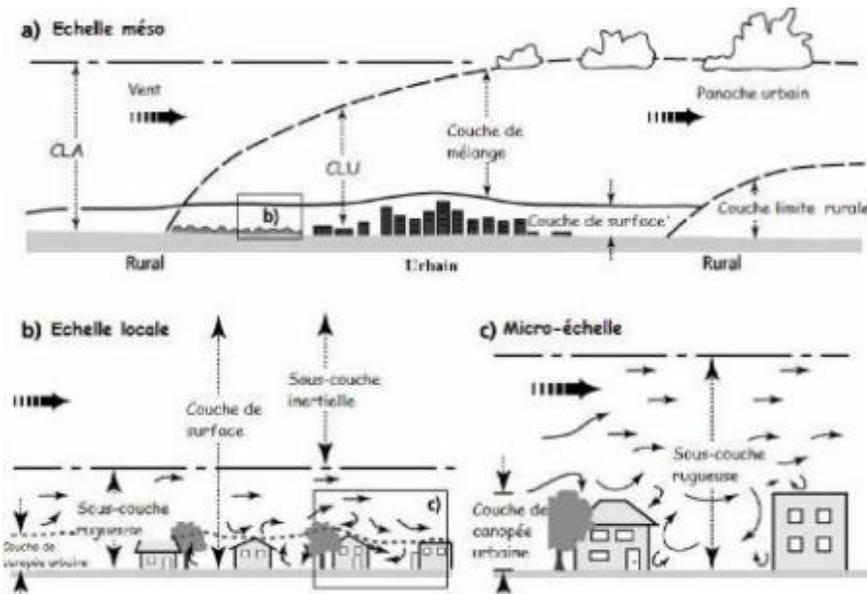


Figure I. 1 : Illustration des différentes échelles spatiales intervenant dans l'étude du climat et de l'atmosphère : l'échelle méso-climatique (a), l'échelle locale (b) et micro-climatique (c). (Source : Leroyer, 2006)

I.1.1.1. Macro-climat (climat global) : Le macroclimat correspond à la modification du climat général par les facteurs géographiques tels que l'altitude ou la position par rapport à un relief majeur (Ansiaux, 1946). Il décrit les grandes fluctuations climatiques et saisonnières sur une distance de plusieurs millions à plusieurs dizaines de millions de kilomètres et sur une période d'un à six mois.

I.1.1.2. Més-o climat (climat régional) : Il s'étend de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Selon Rampp (1937), cité par Ansiaux (1946), des événements météorologiques spécifiques peuvent survenir en raison de modifications plus ou moins importantes d'un ou plusieurs composants constitutifs du macroclimat. La topographie locale, la présence d'étendues importantes construites, les surfaces boisées telles que les forêts et l'état des marais ou vastes étendues d'eau sont les principales causes de ces modifications. Son développement en temps réel est d'environ une journée, soit 24 heures (Oke, 1987).

I.1.1.3. Topo-climat (climat local) : Souvent confondu avec le microclimat, correspond à un climat local à l'échelle d'une ville ou d'une petite vallée, principalement lié à l'altitude et aux irrégularités du relief. Il concerne des superficies de taille en un ou plusieurs dizaines de kilomètres.

I.1.1.4. Microclimat (climat urbain) : Ce concept englobe les réactions du cadre bâti avec les phénomènes climatiques locaux, entraînant des changements microclimatiques en milieu urbain. Il représente l'ensemble des paramètres météorologiques générés par l'urbanisation, au niveau de la hiérarchie urbaine allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. À ce niveau, la morphologie du bâti exerce une influence significative sur le microclimat, avec des effets positifs ou négatifs (Troche et al., 2007).

I.1.2. Les facteurs climatiques

La climatologie englobe l'ensemble des manifestations météorologiques décrivant l'état atmosphérique moyen dans un lieu spécifique. Elle exerce une influence significative sur la ville à travers une variété de facteurs, impactant les conditions de vie des gens tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la ville. Elle a un impact direct sur le bien-être thermique à la fois à l'intérieur et à l'extérieur. Parce que la construction urbaine altère les caractéristiques climatiques antérieures, la ville elle-même contribue également à la modification du climat. Kedissa (2010) souligne que le climat local change après la construction de la ville. Cependant, deux éléments importants l'affectent :

I.1.2.1. Les facteurs cosmiques

Ces éléments, également appelés facteurs orbitaux ou planétaires, sont des forces externes qui agissent sur la planète Terre et contribuent à la modification du climat global. Plusieurs de ces éléments sont distincts :

- **L'atmosphère** : Elle est le centre de tous les phénomènes qui ont pour conséquence la création du temps et des climats. Elle filtre et participe aux différents échanges avec la Terre.
- **Le mouvement planétaire terrestre** : Les rayonnements solaires induisent l'alternance jour/nuit, les variations saisonnières, et provoquent d'importants écarts thermiques sur les façades continentales.
- **La latitude** : Les régions terrestres sont inégalement pourvues d'énergie solaire, celle-ci dépendant de l'élévation du soleil à l'horizon. Cette répartition inégale explique la diversité des climats. Les régions polaires, très déficitaires, ont un climat froid, tandis que les régions équatoriales et tropicales, excédentaires, ont un climat chaud.

I.1.2.2. Les facteurs géographiques

Sont des facteurs manifestant à la surface du globe, on distingue :

- **Le relief :** L'altitude induit une variation du climat en altérant la répartition zonale, du fait d'un abaissement des températures et d'une exposition différenciée des versants au rayonnement solaire et aux précipitations.
- **Les courants marins :** Les masses océaniques, par leurs variations thermiques contrastées avec les continents, interagissent avec les climats côtiers en contribuant aux précipitations continentales.
- **La végétation :** La végétation attire de l'humidité à l'atmosphère par évapotranspiration, favorisant la condensation et élèvent les précipitations.

I.1.3. Les éléments du climat

Les éléments du climat sont des paramètres météorologiques, désignant l'ensemble des conditions climatiques et atmosphériques (l'internaute.fr), les facteurs météorologiques sont ainsi des éléments quantifiables du climat. Ils facilitent de caractériser la qualité climatique d'une région à une époque donnée. Mesurables par des instruments (stations météorologiques), leurs valeurs varient spatialement et temporellement. Les variables météorologiques prépondérantes comprennent le flux radiatif du soleil, la température et l'humidité de l'air ambiant, les apports pluviométriques et les vents.

I.1.4. Exploration du microclimat et du phénomène d'îlot de chaleur urbain

« La singularité du climat urbain est observée depuis l'Antiquité, jusqu'à l'échelle des quartiers intra-urbains » (Bodin, 1576).

Dominant la vie quotidienne des habitants et leurs activités, ce climat subit des modifications selon l'environnement urbain qui agit comme facteur modificateur via la morphologie, les surfaces imperméabilisées ou végétalisées, ainsi que les activités anthropiques. Ces dernières décennies, l'urbanisation rapide, caractérisée par l'expansion des surfaces imperméables au détriment des espaces végétalisés (Foissard et al., 2013; Tabeaud, 2010), expose les villes à des microclimats où les températures sont nettement plus élevées qu'en milieu rural, traduites par la manifestation d'îlots de chaleur (Oke, 1982).

La propriété cardinale du climat urbain réside dans le phénomène d'îlot de chaleur urbain, largement étudié en climatologie des espaces urbanisés. Néanmoins, Luke Howard a été le premier à remarquer ce phénomène dans la ville de Londres entre 1818 et 1833, grâce à son

livre intitulé « Le climat de Londres ». Sur une période de neuf ans, il a mené une série de mesures météorologiques dans la capitale anglaise pour étudier les températures atmosphériques, les pluviométries, le brouillard et le smog.

Les travaux de Howard ont montré des températures nocturnes plus élevées de 3,7°C en milieu urbain londonien comparé aux zones rurales environnantes. Une étude complémentaire d'Akbari et al. (2001) sur une trentaine de villes californiennes a révélé des températures urbaines inférieures de 2,5°C en moyenne aux zones rurales avant 1940. Cette augmentation s'explique par la croissance démographique et l'urbanisation rapide, se traduisant par une densification du tissu urbain.

Une étude réalisée par l'ADEUS (2014) à Strasbourg a mis en évidence un différentiel de température de surface pouvant aller jusqu'à 17°C entre une zone d'activité et un espace naturel périphérique.

Par ailleurs, des travaux conduits par Hassani et Drogue (2020) sur la métropole messine ont révélé un îlot de chaleur urbain d'approximativement 3°C en moyenne dans les espaces fortement urbanisés, pouvant s'accroître jusqu'à 7,1°C lors d'épisodes caniculaires. Néanmoins, une végétation abondante permet d'atténuer ces conséquences, à l'opposé des plans d'eau qui n'apparaissent pas jouer de rôle rafraîchissant nocturne. En période estivale, la différence de chaleur entre le centre-ville et les environs de la ville est généralement de 2°C à plus de 12°C (Voogt, 2002; Greuillet et Galsomiès, 2013).

I.1.4.1. Définition de l'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain est une manifestation distinctive des zones urbaines, se manifestant sous la forme d'un dôme thermique, entraînant des écarts de températures significatives vis-à-vis les environnements urbains denses et les zones rurales adjacentes. Ce phénomène est particulièrement évident pendant la nuit, lorsque les vents sont faibles et que le ciel est dégagé.

L'îlot de chaleur est causé par divers facteurs liés à la ville, qui augmentent la demande d'énergie, en particulier pour la climatisation en été. Même si ce phénomène est observé tout au long de l'année, il atteint son point culminant en été (3,4°C) par rapport à l'hiver (2,5°C) (Cantat, 2004). Cette disparité a un impact négatif sur le bien-être intérieur et extérieur, créant un stress thermique qui a un effet négatif sur la santé.

La conformation de la ville, sa taille, ses matériaux de construction, la manifestation de végétation ou son absence et les sources de chaleur artificielles, sont les principaux facteurs des

variations de chaleur entre les milieux urbains et ruraux (Oke, 1987; Givoni, 1998; Santamouris, 2007; Santamouris, 2014). La configuration urbaine joue un rôle important dans la formation de microclimats spécifiques à chaque environnement, qu'ils s'agissent de la ville ou des quartiers (Ait-Ameur, 2002).

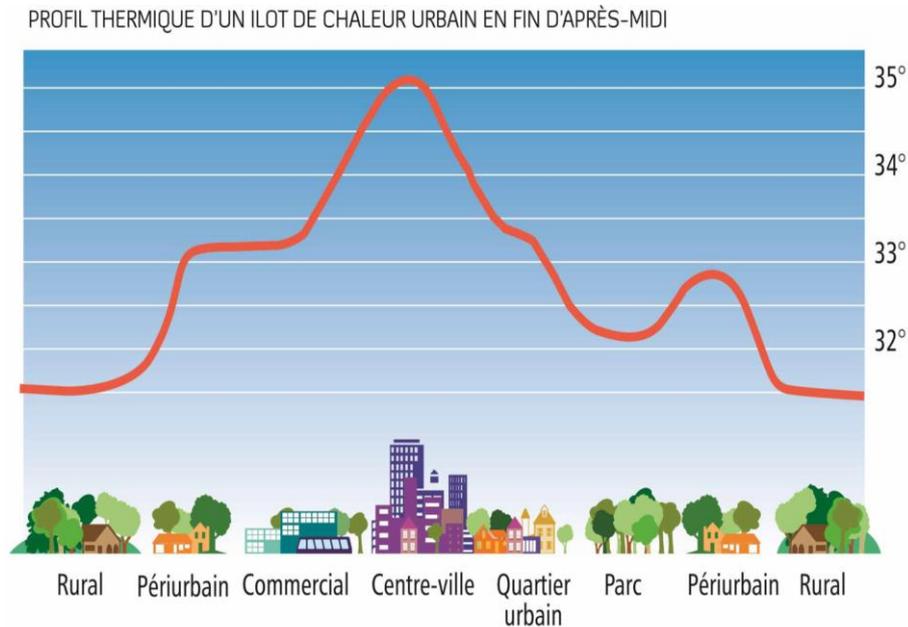


Figure I. 2 : L'évolution de température de l'air suivant la densité du cadre bâti formant une sorte d'îlot. (Source : ADEM, 2012)

I.1.5. Les niveaux d'îlot de chaleur urbain

Trois niveaux regroupant les îlots de chaleur urbains sont classés en deux catégories en fonction de l'échelle verticale considérée (Tong et al., 2017) :

I.1.5.1. Les îlots de chaleur surfaciques

Les îlots de chaleur à la surface du sol ou Surface Layer (SL) ont été étudiés plus en détail grâce aux avancées technologiques en climatologie urbaine et à la télédétection. Les chercheurs ont réussi à recueillir des données en mesurant les températures surfaciques, ce qui leur a permis de générer des images thermiques. Cette technique a révélé l'existence des îlots de chaleur surfaciques (Voogt, 2004).

La couche de surface est particulièrement sensible aux changements climatiques, et des facteurs tels que la présence ou l'absence de surface végétale affectent l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain dans cette couche. Les matériaux de construction, les surfaces minéralisées, communément appelées « imperméables », et la géométrie du canyon urbain sont également

des paramètres considérés comme ayant une forte influence sur les îlots de chaleur urbains (Arnfield, 2003; Boukhabla, 2015).

I.1.5.2. Les îlots de chaleur atmosphériques

Les climatologues ont classé deux types d'îlots de chaleur urbains en fonction des tranches d'atmosphère (Kastendeuch et al., 2010) :

➤ **Les îlots de chaleur de la canopée urbaine ou Urban Canopy Layer (UCL) :** Ils sont constitués de volumes d'atmosphère appartenant à l'intervalle entre la surface terrestre et la cime des arbres ou des toits des immeubles. Cette couche est fortement influencée par les activités humaines (Oke, 1976).

Il s'agit d'une couche où les gens vivent et exercent leurs activités, et par conséquent, les habitants ressentent plus la formation d'îlots de chaleur urbains dans les canopées urbaines. Il agit directement sur leur confort thermique et est souvent observé plus fréquemment que les deux types d'îlots de chaleur atmosphérique. Contrairement à l'îlot de chaleur urbain de surface, l'îlot de chaleur atmosphérique est principalement observé la nuit ; il est souvent peu marqué en fin de matinée et tout au long de la journée, devenant plus prononcé après le coucher du soleil en raison du dégagement progressif de la chaleur emmagasinée par les infrastructures urbaines. Il est devenu une référence incontournable dans les discussions sur le microclimat urbain (Van Hov et al., 2015).

➤ **Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine ou Urban Boundary Layer (UBL) :** Positionnés au-dessus de la canopée urbaine (CU), les îlots de chaleur surfaciques, comme évoqué dans le rapport de l'EPA de 2008 sur l'îlot de chaleur (Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies: Urban Heat Island Basics), sont généralement présents jour et nuit, mais ils ont tendance à être plus forts pendant la journée lorsque le soleil brille, et ils sont plus importants en période estivale.

En revanche, les îlots de chaleur urbains atmosphériques, toujours selon le même rapport, sont souvent faibles en fin de matinée et tout au long de la journée, s'intensifiant davantage après le coucher du soleil en raison de la libération progressive de la chaleur stockée dans l'infrastructure urbaine. Ils peuvent également être observés au niveau de la canopée urbaine ou au niveau de la couche limite urbaine par vent faible et ciel clair, faisant référence à la température de l'air (Oke, 1987; Oke, 1982; Voogt, 2002).

I.1.6. La température et les différents types d'îlots de chaleur urbains

Les fluctuations de la chaleur atmosphérique au sein d'un environnement urbain sont clairement perceptibles, présentant des variations d'une zone à une autre, dépendant de la façon dont les espaces sont ouverts ou fermés. Ces variations de température sont liées aux apports solaires et à l'écoulement du vent, des paramètres naturels, mais elles sont également influencées par des facteurs artificiels tels que les consommations énergétiques (éclairage public, chauffage, climatisation, etc.) et la nature du tissu urbain (densité du tissu, types de matériaux de construction, orientation, etc.). C'est cette combinaison de facteurs qui contribue à rendre la ville généralement plus chaude que les zones rurales. La chaleur atmosphérique est couramment mesurée par des capteurs mobiles, qui réalisent des relevés ponctuels pour évaluer les variations de température entre le centre urbain et la périphérie rurale. Ces mesures visent à quantifier l'intensité des îlots de chaleur atmosphériques.

Cependant, les îlots de chaleur surfaciques s'expriment grâce à la chaleur de surface, considérée comme une donnée disponible au niveau planétaire via des mesures satellites. Les recherches ont démontré que les disparités de température à la surface sont fréquemment plus marquées que les variations observées à l'échelle de la température de l'air.

Bien que les degrés de chaleur et les prises thermiques de surface soient liés, cette corrélation dépend de nombreux facteurs, et il n'existe actuellement pas de relation standardisée entre ces deux données (Sadek, 2022).

I.1.7. Les facteurs influençant le microclimat et la formation de l'îlot de chaleur urbain

La formation de l'îlot de chaleur urbain nous amène à nous interroger sur les causes de son apparition, classées sous deux grandes catégories selon l'étude de Rizwan et al. (2007), qui regroupe plusieurs travaux antérieurs : les facteurs physiques contrôlables et incontrôlables :

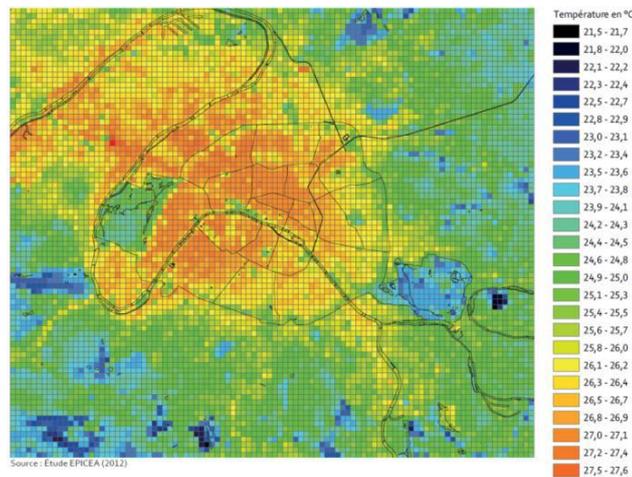


Figure I. 3 : L'îlot de chaleur urbain à Paris. (Source : Elioth, 2017)

I.1.7.1. Les facteurs physiques incontrôlables : Sont des éléments naturels variables ayant des effets temporaires, tels que la vitesse des vents, le rayonnement solaire et la couverture nuageuse.

I.1.7.2. Les facteurs physiques contrôlables : Sont des éléments stables ayant un effet permanent. Ils englobent la morphologie des espaces, la géométrie des rues, le revêtement du sol et les matériaux de construction, les espaces végétalisés et minéraux, ainsi que les sources de chaleur anthropiques.

I.2. La morphologie urbaine

Le terme **morphologie urbaine** possède un sens très vaste en fonction du champ d'application. Entre les deux guerres mondiales, il a fait son apparition chez les géographes allemands et britanniques, l'essence de l'idée de la morphologie a été initialement introduite dans les écrits du grand poète et philosophe Goethe en 1790, l'expression elle-même ayant été principalement utilisée dans les biosciences. Récemment, on observe une utilisation croissante de ce terme dans des domaines tels que la géographie, la géologie, l'urbanisme, et d'autres domaines.

La morphologie urbaine a évolué au fil du temps, et plusieurs périodes ont marqué son développement. Parmi ces périodes, on peut citer :

- **La période 1920 - 1930 :** Développement dans le cadre de l'architecture régionaliste et l'urbanisme culturaliste.
- **La période 1930 - 1960 :** L'urbanisme fonctionnaliste rejette les analyses morphologiques centrées sur l'analyse de l'existant, et l'apparition de nouveaux critères pour la composition urbaine fondés sur la (morphologie du projet).
- **La période 1960 - 1970 :** La renaissance de l'approche morphologique s'érige en critique des dérives du courant moderne et de l'urbanisme fonctionnelle, remettant en question ce dernier.

Nous distinguons quatre écoles de l'approche morphologique :

- **L'école italienne** depuis 1950 connue par l'approche typo-morphologique, qui combine l'analyse de la structure urbaine et de la typologie d'architecture, à l'intersection du domaine de l'urbanisme et l'architecture. Cette approche a été apparue vers les années 1950 avec les premiers travaux de Saverio Muratori ensuite développée à travers ses successeurs Aldo Rossi, Carlo Aymonino et Gianfranco Caniggia. L'approche typo-morphologique aborde la structure urbaine, englobant la trame viaire, le parcellaire, les limites, et la typologie des édifices, incluant

la position du construit dans la parcelle, l'arrangement interne. Elle s'intéresse particulièrement à :

- **La morphologie** : En examinant les constituants qui forment la structure urbaine dans sa genèse historique (site d'implantation, le tracé des voies, plan de la ville).
- **La typologie** : Dans le but de décrire et de classer les caractéristiques uniques des constituant d'un ensemble ou d'un phénomène, elle cherche à les analyser.
- **Le type** : Le terme désigne une catégorie regroupant des unités qui partagent des caractéristiques architecturales et urbaines similaires. La dénomination des types s'effectue par l'identification d'éléments invariants coprésents, également, elle repose sur l'analyse des différences et des variations remarquées dans les caractéristiques du bâti et de la forme urbaine.

➤ **L'école française de Versailles** est un mouvement architectural et urbain né en France dans les années 1960. Philippe Panerai, architecte-urbaniste, est l'un des premiers théoriciens de l'école française de morphologie urbaine, l'architecte Jean Castex et le sociologue Jean-Charles Depaule, ce sont les principaux auteurs qui furent introduire l'approche typomorphologique en France, fondée sur les acquis de l'école italienne et muratorienne, l'approche morphologique adopte une nouvelle perspective, explorant les typologies des éléments, l'évolution urbaine, l'organisation de l'espace urbain, ainsi que le repérage et la lisibilité dans le contexte urbain.

➤ **L'école britannique** depuis 1960, c'est à travers des géographes britanniques tels que M.R.G. Conzen et J. W. R. Whitehand que l'avancement a donné lieu à l'élaboration de méthodes d'analyse de la réalité construite des villes et des villages. Selon l'école britannique, la forme de la ville a un impact direct sur les interactions sociales, la qualité de vie des habitants et l'utilisation de l'espace public. Cette école s'intéresse également à la façon dont les villes se développent et évoluent au fil du temps, en considérant en compte les changements sociaux, économiques et politiques qui influencent la vie urbaine. Elle s'appuie sur des outils d'analyse spatiale et de cartographie pour étudier la morphologie urbaine.

➤ **L'école nord-américaine** La morphologie urbaine est un courant de pensée qui s'est développé en États-Unis et au Canada dans la période de 1960 et 1970. Ce courant met la focalisation sur l'analyse morphologique de ville, en visant la structure physique et spatiale de l'environnement urbain des villes nord-américaines. Les principaux théoriciens de l'école nord-

américaine sont Kevin Lynch, Allan Jacobs, Homer Hoyt, et Ernest W. Burgess. Ils ont développé des méthodes pour étudier la structure de la ville et ont émis des recommandations pour l'aménagement urbain en se basant sur une meilleure compréhension de la configuration urbaine.

À partir des années 1970, la morphologie urbaine s'enrichit des contributions de l'histoire de l'architecture, se mêlant aux approches structuralistes, phénoménologiques, et à celle de la sémiologie.

I.2.1. Définition de la morphologie urbaine

La morphologie urbaine est définie comme la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que des espaces que celui-ci crée (Nikolopoulou, 2004).

D'après Allain (2004), cette configuration urbaine englobe l'examen de la forme et de la structure physique de la ville. En complément de l'examen de sa constitution tissulaire progressive, elle propose l'investigation et le déchiffrement des paysages urbains, permettant d'appréhender la variété des configurations rencontrées dans une zone urbanisée, issues d'un ensemble d'interconnexions complexes. Cette discipline se rattache à une pluridisciplinarité, notamment l'histoire, la géographie et l'architecture.

Selon Carlo Aymonino, tel que cité dans le dictionnaire architectural, cette morphologie est l'étude des causalités, c'est-à-dire du « pourquoi », qui contribuent au développement et à la transformation de la structure des villes. Cependant, Levy (2005) considère la morphologie urbaine comme un élément constitutif important de l'urbanisme, permettant la compréhension de la transformation et de l'évolution logique du paysage urbain, soit du « comment ». La morphologie urbaine traite simultanément du champ de l'aménagement urbain (urban planning) et de celui de la composition urbaine (urban design).

Alors que Hillier (1987) voit la morphologie urbaine comme l'étude des objets (bâtiments, ville, etc.). De par sa nature tangible et spatiale, elle impose une étude et une saisie dans un environnement étendu, prenant en considération les éléments historiques, sociétaux et psychologiques.

Selon les définitions précédentes, la morphologie urbaine désigne une forme urbaine ou son étude, englobant la formation, l'évolution, la transformation et les configurations de la ville. Elle résulte des circonstances historiques, politiques, culturelles et principalement architecturales dans lesquelles la ville a émergé et évolué, constituant ainsi le résultat d'un développement spontané ou planifié sous l'influence des autorités politiques. La morphologie

urbaine offre donc un moyen de décrypter l'histoire d'une ville à travers sa structure (Allain, 2004).

Actuellement, la morphologie urbaine représente un défi pour les concepteurs des villes, en particulier en ce qui concerne le climat et le microclimat urbain. Elle nécessite d'être examinée d'un point de vue environnemental, économique et socioculturel, en tenant compte des particularités et des originalités de chaque ville ou région (Hamel, 2005).

I.3. La forme urbaine

Le concept de « forme urbaine » et de « morphologie urbaine » est souvent confondu, et plusieurs spécialistes les considèrent comme synonymes, mais suite à la définition précédente de la morphologie urbaine selon Carlo Aymonino qui distingue la forme urbaine de la morphologie urbaine en la définissant comme : « L'étude de la description et la classification des causes qui contribuent à la formation et à la modification de la structure physique de la ville ». Cela met en lumière la non-synonymie entre ces deux concepts. La première est l'objet d'étude de la deuxième, ce qui élimine toute confusion entre les deux concepts (Villadiego Bernal, 2014).

I.3.1. Définition de la forme urbaine

Elle se réfère à l'environnement bâti résultant de l'agencement des aménagements réalisés à différentes échelles (agglomération, quartier, rue et bâtiment), en lien avec l'appropriation humaine du territoire. Elle se manifeste à travers les modes de vie qu'elle induit et se caractérise par : le tissu urbain englobant la trame viaire, le parcellaire et les îlots ; la structure bâtie définie par l'implantation et la nature du site, les gabarits et volumes des édifices ; les paramètres de densité et de compacité ; la répartition des activités et équipements ; ainsi que les réseaux annexes complémentaires au maillage viaire. La configuration urbaine reflète ainsi la relation structurale physique de la ville et l'utilisation humaine des locaux urbains à diverses échelles spatiales (collectivitesviables.org/sujets/formes-urbaines.aspx).

D'après Allain (2004), cette forme urbaine se définit comme étant la manifestation visuelle et partielle du système urbain. C'est une partie de la ville qui désigne un tissu particulier, caractérisé par la combinaison de formes pleines qui présentent le cadre bâti (les bâtiments) et de formes concaves qui présentent le non-bâti ou bien les vides urbains comme les places, les rues, et les espaces verts. Cette dernière peut être étudiée à travers deux échelles : micro-urbaines (l'échelle de l'espace public et du tissu urbain) à travers des indicateurs dits

indicateurs morpho-climatiques (Ait-Ameur, 2002), et à une échelle macro-urbaine (échelle de la ville) (Maignant, 2005).

Comme le souligne Fischler, cité par Maignant (2005), la conception de la forme urbaine va au-delà d'une simple considération esthétique ou d'une question de composition architecturale. Cette notion, évoquant les liens de transport, les espaces verts et la ségrégation spatiale, requiert également une évaluation basée sur des critères d'efficacité, de durabilité et d'équité. Par ses références aux processus sociaux qui sous-tendent l'étalement urbain, la forme urbaine doit être interprétée comme le résultat d'un ensemble complexe d'actions, d'un système de forces. Depuis l'existence des villes, la forme urbaine suscite des débats et des innovations, bien que les termes qui la décrivent demeurent souvent imprécis.

Dans la littérature scientifique, les formes prennent divers aspects. Les plus anciennes ont été étudiées par l'approche typo-morphologique des trois écoles citées antérieurement, les formes des tissus et les formes des tracés. Cependant, d'autres aspects ont également été explorés (Lévy, 2005).

I.3.2. Les aspects classiques de la forme urbaine

I.3.2.1. L'aspect de la forme urbaine comme forme des tissus urbains : Elle se base sur l'analyse des liens qui relie les différents éléments composent l'espace urbain, tels que les parcelles, les voies, les espaces libres et les structures bâties.

I.3.2.2. L'aspect de la forme urbaine comme forme des tracés urbains : Elle se réfère à la géométrie du plan de la ville, comprenant des modèles tels que le plan en damier, le plan radioconcentrique ou le plan organique. Elle englobe également la composition urbaine et ses implications.

I.3.3. Les nouveaux aspects explorés de la forme urbaine

I.3.3.1. L'aspect de la forme urbaine comme forme du paysage urbain : Elle permet de comprendre l'espace urbain sous un aspect visuel, en tenant compte de sa tridimensionnalité (volume, gabarit) et de sa matérialité plastique (texture, couleur, style...).

I.3.3.2. L'aspect de la forme urbaine comme forme sociale ou spacio-sociale (Space syntax) : Elle consiste à analyser le milieu urbain dans sa structuration via différents regroupement sociaux, ethniques, démographiques ou encore dans sa répartition des activités et des fonctions urbaines. L'espace architectural constitue toujours un cadre de l'action sociale visant à prévenir les problèmes de nature sociale (Hillier et Hanson, 1987).

I.3.3.3. L'approche de la forme urbaine comme forme bioclimatique : Il s'agit d'examiner l'emplacement urbain dans son contexte environnemental, En tenant compte du microclimat urbain, de ses variations géographiques selon les quartiers et de sa diversité selon les types de tissus (ouvert, fermé, vertical), en fonction de l'orientation (héliothermique) et des caractéristiques du site (eau, relief, végétation) (Escourrou, 1980 ; Escourrou, 1991).

Cette dimension initie un débat important sur les transports et les formes urbaines (formes étalées ou formes compactes) dans le contexte du développement durable, en plus des problèmes énergétiques et de leurs enjeux sur le climat.

Selon Lévy (2005), ce registre de forme est lié aux autres registres, particulièrement avec celui des tissus et des tracés urbains, car les éléments qui les composent agissent comme des facteurs modifiant le microclimat urbain et influent donc sur les paramètres du confort (température, vent, rayonnement...) (Athamena, 2012).

I.4. Les indicateurs morphologiques

Les formes urbaines, qui reflètent la réalité sociale et économique de chaque époque, déterminent la morphologie urbaine, définie par des indicateurs portant sur le bâti et les espaces libres urbains. Elle combine à la fois la notion de géométrie urbaine et les matériaux de surface (Tsoka, 2011). Ces indicateurs morphologiques des formes urbaines en milieu urbain interagissent avec les paramètres microclimatiques tels que la température atmosphérique, la température de surface, le rayonnement solaire et l'écoulement de l'air, transformant ainsi le microclimat urbain des villes et influant directement sur les ambiances thermiques des espaces urbains extérieurs.

Ces indicateurs morphologiques sont classés selon deux principales échelles (Ait-Ameur, 2002 ; Ahmed Ouameur, 2007) : L'analyse de la forme s'effectue à différentes échelles, notamment au niveau du tissu urbain et au niveau de l'espace public. Étant donné que cette recherche se concentre sur l'analyse du comportement morpho-climatique à l'échelle locale (la ville et le quartier) et à l'échelle intermédiaire (la rue), elle s'appuiera donc sur des indicateurs morphologiques au niveau de la ville, ainsi que sur des indicateurs morphologiques et géométriques au niveau du tissu urbain et de l'espace public.

I.4.1. Les indicateurs morphologiques à l'échelle de la ville

Étudier la ville dans sa globalité, c'est percevoir son développement urbain au fil du temps, qui donne naissance à plusieurs formes sur le plan spatio-temporel. Ces formes peuvent

nous renseigner sur l'histoire de la ville, sur son étalement urbain et ses orientations, ainsi que sur sa densité et sa compacité selon des indices géométriques. Ces configurations ont également une incidence sur le climat local de la ville, modifiant ainsi son confort thermique.

Pour parvenir à mesurer la morphologie de la ville, plusieurs indicateurs quantitatifs de formes ont été mis en place. Par exemple, ces indicateurs portent sur la relation entre la surface et son périmètre, offrant une idée de la compacité d'une forme.

Une forme est considérée comme compacte lorsqu'elle forme une entité unique sans interruption. La présence d'une interruption indique que la forme est connexe. Une structure comportant divers points nécessite un cheminement entre eux, ce chemin n'est pas forcément rectiligne, mais exige une continuité dans le substrat, tel que la terre ferme et une île. Dans ce cas, il ne s'agit pas d'une seule forme, mais de deux, représentant un type connexe. Par conséquent, tout cheminement reliant deux points de la forme lui est attribué (Maignant, 2005).

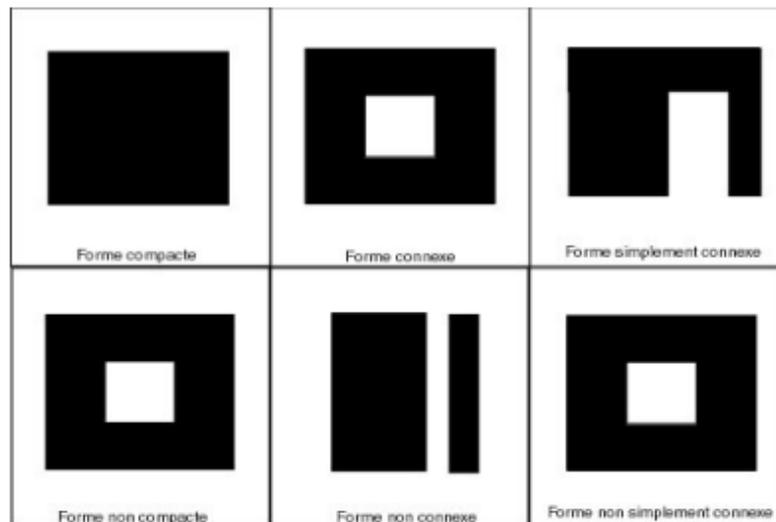


Figure I. 4 : Différents profils de la forme : formes compactes, connexes, simplement connexes ou non. (Source : Maignant, 2005)

➤ Les indices de la forme urbaine

On fait allusion ici aux trois indices classiques de Gravelius, Miller et Morton, définis comme des indices permettant de caractériser et de comparer différentes formes entre elles. Ainsi, ces trois indices fournissent des informations sur la compacité des formes (une forme plus compacte se traduit par un indice se rapprochant de 1).

Ces indices morphologiques de forme sont calculables à travers des formules mathématiques. Dans les trois équations de ces trois indices, « S » représente la superficie de la forme, « P » désigne le périmètre, et le « T » correspond à l'étendue de la forme ou à la plus grande longueur parmi les différentes directions.

Les données nécessaires pour le calcul de ces trois indices sont obtenues par les systèmes d'information géographiques (SIG).

Les formules de calcul pour chaque indice (Tableau I.1) :

Indice de Miller :

$$I_{\text{Miller}} = \frac{4\pi S}{P^2} \quad (I.1)$$

Indice de Morton:

$$I_{\text{Morton}} = \frac{S}{\pi(Q5T)^2} \quad (I.2)$$

Indice de Gravelius :

$$I_{\text{Gravelius}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad (I.3)$$

Tableau I. 1 : Les trois indices de formes géométriques simples : Indices de Miller, Morton et Gravelius.
(Source : Maignant, 2005)

Forme géométrique	Indice de Miller $I_{\text{Miller}} = \frac{4\pi S}{P^2}$	Indice de Morton $I_{\text{Morton}} = \frac{S}{\pi(Q5T)^2}$	Indice de Gravelius $I_{\text{Gravelius}} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$
Cercle	1	1	1
Hexagone (côté = a)	$\frac{\sqrt{3}\pi}{6} = 0.90$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0.83$	$\frac{3\sqrt{2}}{\sqrt{3\pi}\sqrt{3}} = 1.05$
Carré (côté = c)	$\frac{\pi}{4} = 0.78$	$\frac{2}{\pi} = 0.63$	$\frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1.12$
Rectangle (longueur =L et largeur = l)	$\frac{\pi L \cdot l}{(L + l)^2} = 0.69$	$\frac{4}{\pi} \cdot \frac{L \cdot l}{L^2 + l^2} = 0.51$	$\frac{L + l}{\sqrt{\pi L \cdot l}} = 1.20$
Ligne	0	0	Non défini

En prenant comme exemple l'indice de compacité de Gravelius, qui est largement utilisé pour quantifier la configuration spatiale de l'étalement urbain, on obtient un aperçu de la répartition et de l'organisation des bâtiments dans le milieu étudié. Cet indice permet également une visualisation des surfaces compactes et étendues.

Cet indice morphique correspond au rapport du périmètre urbain à celui d'un cercle de même superficie. Selon la littérature, les valeurs faibles de cet indice indiquent le caractère compact de l'urbanisation, tandis que les valeurs élevées montrent une extension linéaire ou morcelée (Honvo et Dossou-Yovo, 2021).

I.4.2. Les indicateurs morphologiques à l'échelle du tissu urbain (échelle du quartier)

I.4.2.1. La compacité urbaine : Selon le Dictionnaire de l'Académie française, le mot « compact » se dit « d'un objet dont les parties sont étroitement liées à l'ensemble ». C'est l'une des lignes directrices du développement durable et de la densification des villes existantes, luttant contre l'étalement urbain. Elle se réfère de manière plus morphologique au rapport entre les surfaces bâties et non bâties d'un espace, qui limite les vides et les discontinuités pour favoriser les liens physiques et sociaux. Cette approche introduit l'idée de courtes distances, de mixité urbaine et sociale, ainsi que d'optimisation entre les acteurs de la ville.

Par extension, cette notion est devenue la qualité centrale de toute forme urbaine visant à une utilisation parcimonieuse des ressources naturelles.

La compacité d'un tissu urbain renvoie à l'idée de proximité urbaine, facilitant les possibilités de contacts et d'échanges (CAT-MED, 2012). La morphologie urbaine compacte participe également à la création d'environnements à la fois denses et conviviaux, respectant l'échelle humaine et favorisant l'émergence d'une ville caractérisée par des distances courtes. Ce mode d'occupation du territoire s'avère être une réponse aux défis posés par l'étalement urbain. La compacité urbaine vise ainsi à promouvoir des milieux de vie durables conjuguant intensité urbaine et qualité de vie, tout en limitant l'expansion spatiale non maîtrisée des zones urbanisées. Cette approche cherche à répondre aux enjeux posés par les dynamiques de périurbanisation extensive (Collectivités viables.org, 2013).

À l'échelle du bâti, la compacité représente le rapport entre le volume d'un ensemble urbain et sa surface d'enveloppe en contact avec l'extérieur (Maïzia, 2010 cité par Arantes et al., 2016). L'indicateur de compacité (C) évalue la surface de l'enveloppe extérieure des bâtiments exposée aux effets climatiques extérieurs. Pour le caractériser, on distingue deux sous-indicateurs : la compacité utile et la compacité nette.

L'indicateur de compacité utile (C_{ut}) : dénotée étant le rapport entre la surface d'échange de l'enveloppe des bâtiments et le mètre carré de surface de plancher. Il s'agit d'une grandeur adimensionnelle, avec des valeurs typiques oscillant entre 0,5 et 1,3 pour des bâtiments standards (Tsoka, 2011). La surface d'enveloppe considérée comprend les façades verticales exposées aux conditions extérieures. Une valeur plus basse du C_{ut} indique une compacité plus élevée, rendant les constructions moins vulnérables aux influences externes (Adolphe, 2001). La compacité utile est mesurée par l'équation suivante :

$$C_{ut} = \sum_i^N \frac{A_{ext,i}}{S_{pl,i}} \quad (I.4)$$

Avec :

A_{ext} : la surface extérieure d'enveloppe non contiguë d'un bâtiment ;

S_{pl} : la surface de plancher ;

N : le nombre des bâtiments du projet.

L'indice de compacité nette est calculé individuellement pour chaque bâtiment, tandis que le coefficient moyen de compacité, noté C_f , est déterminé pour un ensemble urbain, conformément à la définition de Traisnel (1986) : Le coefficient de compacité pour un ensemble urbain est la somme des coefficients de compacité des structures. Il est défini comme le rapport : la surface d'enveloppe extérieure non adjacente du bâtiment et son volume, élevé à la puissance $2/3$. On peut calculer ce coefficient de compacité moyenne à travers l'équation suivante :

$$C_f = \sum_i^N \frac{A_{ext,i}}{V_i^{2/3}} \quad (I.5)$$

Avec :

A_{ext} : Surface extérieure d'enveloppe non contiguë d'un bâtiment

V : Volume du bâtiment

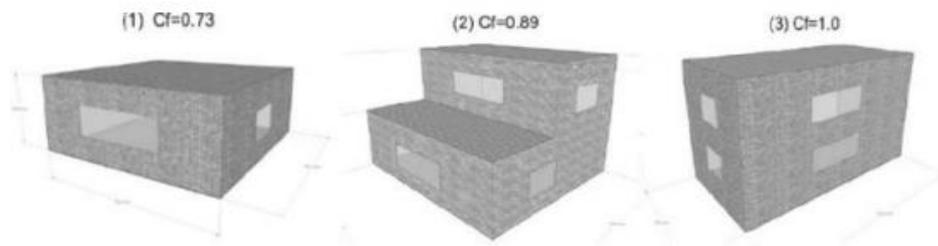


Figure I.5 : Coefficient de compacité « C_f » pour diverses morphologies de bâtiments. (Source : Tiberiu et al., 2008)

Le coefficient de compacité moyenne (C_f), permet de caractériser la compacité globale d'un tissu urbain en sommant les compacités nettes de chaque bâtiment selon leur degré d'isolation ou de mitoyenneté. Ce facteur par rapport au facteur de forme classique (A_{ext}/V) à l'avantage de ne pas accorder une importance excessive aux bâtiments de grande taille par rapport aux petits. Cela permet d'éviter de pondérer le facteur de forme moyen d'un tissu par sa surface de plancher lorsqu'il est calculé (Musy, 2006 ; Tsoka, 2011). Il convient de noter qu'une forme compacte est caractérisée par une faible valeur du coefficient de compacité moyenne C_f .

I.4.2.2. La densité urbaine

Dernièrement, le concept de densité a ouvert un grand débat parmi les spécialistes, devenant une question d'actualité avec des répercussions sur le développement urbain durable, l'environnement, le climat, et les problèmes posés par l'étalement urbain.

Le terme « densité » a un sens multidisciplinaire, comme l'explique Touati (2015) : « Terme souvent imprécis utilisé dans les domaines de l'urbanisme, de l'économie urbaine ou de la géographie, la densité urbaine exprime un rapport théorique entre une quantité (nombre d'habitants, nombre d'emplois, de logements ou encore un nombre de m² de plancher par exemple) et l'espace occupé (surface de terrain brute ou nette). ».

Selon le Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, la densité se dénote comme le rapport entre un indicateur statique (quantité) tel que la population, le logement, l'emploi, l'activité, etc., et une surface. Bien qu'il n'y ait pas une densité urbaine unique, il existe plusieurs catégories en fonction du domaine d'application :

- Une densité de construction ou densité bâtie, un terme utilisé généralement par les architectes et les urbanistes.
- Une densité de population, un terme utilisé par les géographes.
- Une densité de circulation
- Une densité d'équipements
- Une densité d'activités

D'après Hattab et Ziane (2003), la densité a toujours été au cœur de la pratique urbaine, jouant un rôle essentiel dans de nombreux dispositifs d'urbanisme, notamment ceux liés aux instruments d'aménagement et d'urbanisme.

➤ **Les formes de la densité urbaine**

On peut néanmoins distinguer deux densités résidentielles distinctes (Fouchier, 1997) : la densité nette et la densité brute. La différence entre ces deux densités réside dans le choix de l'échelle de référence utilisée dans le calcul du COS et du CES.

- **La densité nette :** La densité nette se réfère exclusivement aux surfaces parcellaires effectivement allouées à l'affectation considérée, incluant l'emprise du bâti, les espaces libres intra-parcellaires ou intra-îlots, ainsi que les dessertes internes. Son évaluation s'opère à l'échelle de la parcelle ou de l'îlot. Un calcul de densité nette est également envisageable à l'échelle d'un quartier ou d'une entité urbaine en ne sommant que les surfaces dévolues à l'habitation, excluant ainsi les équipements, la trame viaire, les espaces végétalisés et les secteurs dédiés aux activités.

- **La densité brute** : La densité brute englobe la totalité du territoire pris en considération, incluant sans exception les équipements collectifs (qu'ils soient bâtis ou non), les espaces verts, la voirie principale et les infrastructures érigées pour répondre aux besoins de la population résidant dans les logements construits dans l'espace considéré. La disparité entre la densité brute et la densité nette découle du choix de la surface de référence employée dans le calcul.

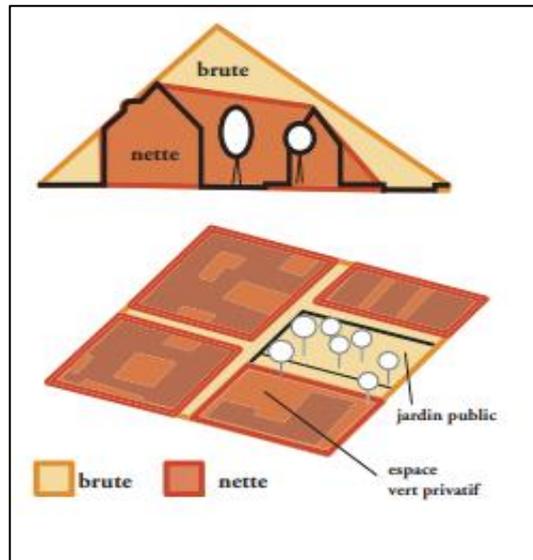


Figure I. 6 : Calcul de la densité brute et nette. (Source : IAURIF - Juin 2005)

Dans le même contexte, on peut distinguer d'autres significations données à la notion de densité, telles que la densité perçue et la densité réelle, deux termes opposés l'un par rapport à l'autre. Une étude menée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme visait à comprendre comment la densité est perçue par les habitants en réalisant une enquête à Paris sur quatre quartiers de densités différentes. 227 personnes ont été interrogées. Les résultats ont montré que la hauteur des bâtiments des grands ensembles est un indicateur de la perception de la densité. Elle donne souvent l'impression que la densité bâtie est élevée et semble oppressante, alors qu'elle est souvent inférieure à celle des quartiers anciens avec un tissu continu et resserré, et une hauteur de construction quasiment identique. Cette situation procure un sentiment d'intimité et de bien-être. Ainsi, la perception positive et le bien-vivre de la forte densité sont liés principalement à la convivialité et à l'animation créée par la diversité de population et d'activités (AUCAM, 2008).

On peut également dire que la densité perçue par rapport à la densité réelle est une appréciation subjective liée à la perception des usagers. Les éléments physiques de l'environnement urbain l'influencent principalement, les aspects cognitifs individuels et les facteurs socioculturels.

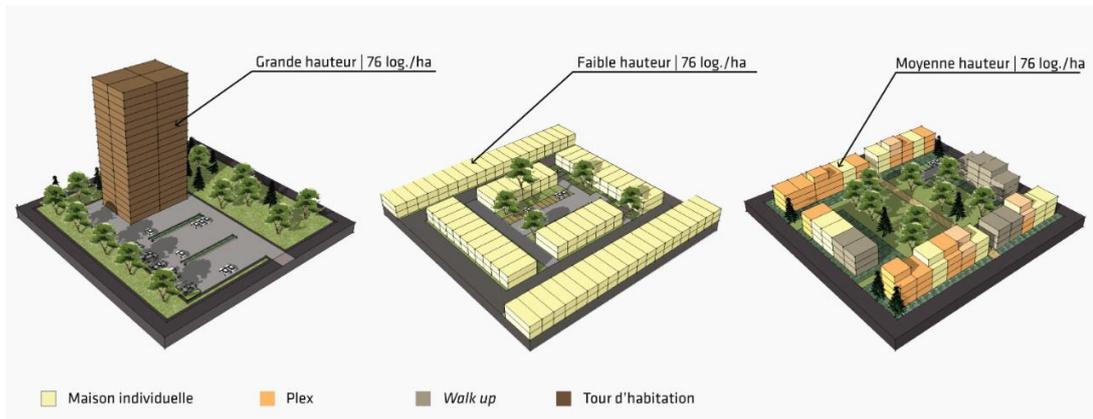


Figure I. 7 : Trois types de formes urbaines différentes avec la même densité. (Source : COLLECTIVITÉS VIABLES.ORG 2013. Vivre en Ville, inspiré de Urban Task Force, 1999)

Plus précisément, dans le domaine de l'urbanisme, la densité (D) est un outil couramment utilisé par les urbanistes. Elle repose sur un rapport mathématique entre une quantité d'éléments (N) et un espace de référence (S), qui peut être une surface (densité surfacique), un volume (densité volumique) ou une longueur (densité linéaire). La formule de calcul est la suivante : $D = N/S$ (CPDT, 2012).

La densité est également une manière de qualifier les formes urbaines et de mieux saisir leurs caractéristiques, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives. Elle est principalement caractérisée par la densité surfacique.

I.4.2.3. La densité surfacique (densité bâtie)

La densité surfacique du cadre bâti donne une idée de l'occupation de l'espace et est mesurable en mètres carrés construits, représentant ainsi la notion de coefficient d'occupation des sols. On peut également la mesurer en nombre de logements par unité de surface, souvent en hectare. Le choix de la surface à prendre en compte est délicat, car la densité varie considérablement selon qu'on la mesure à l'échelle de la parcelle, de l'îlot, du quartier, etc.

Le rapport de la surface d'emprise au sol des bâtiments par la surface totale du site utilisé par ces constructions en milieu urbain est connu sous le nom d'indicateur de densité bâtie D_s . Il est compris entre 0 et 1.

Plus la densité bâtie D_s est élevée, plus l'occupation de l'espace naturel est importante, et plus la saturation de l'espace urbain est prononcée (Musy, 2006). Ce phénomène est particulièrement observé dans les tissus urbains des villes traditionnelles situées dans des régions à climat aride, semi-aride ou méditerranéen, telles que les Médinas et les Ksour. Dans ces zones, la proportion de surface construite par rapport à la surface non construite est très élevée (Adolphe, 2001 ; Hamel, 2005). En revanche, les tissus urbains contemporains se

caractérisent par une faible densité, impliquant ainsi une grande distance entre les constructions
La densité bâtie D_s est calculée par l'équation suivante (Tsoka, 2011) :

$$D_s = \frac{1}{A_s} \sum_i^N A_{p,i} \quad (I.6)$$

D'où :

- **A_p** : La surface de plancher du bâtiment i
- **A_s** : La surface totale du quartier étudié
- **N** : Le nombre des bâtiments au sol

Donc :

$$D_s = \frac{\text{Surface cumulée de l'emprise au sol des bâtimaents (m}^2\text{)}}{\text{Surface du territoire urbain (m}^2\text{)}} \quad (I.7)$$

La valeur obtenue est sans unité et peut être exprimée en pourcentage (%).

Une recherche conduite par Boukhezer (2002) a examiné de manière comparative trois typologies de tissus urbains présentant des densités d'occupation du sol distinctes au sein de la ville d'Oran en Algérie. Les modèles des tissus investigués correspondent à une structure organique, une composition orthogonale en damier et une configuration aléatoire. L'analyse visait à apprécier les effets de la densité ainsi que de l'agencement spatial propres à ces morphologies urbaines variées sur les conditions microclimatiques locales.



Figure I. 8 : Les trois tissus urbains étudiés (Centre, Marval et ZHUN). (Source : Boukhezer, 2002)

Les résultats indiquaient que la densité surfacique des bâtiments a un impact significatif sur la quantité d'énergie que les bâtiments absorbent. Le tissu organique, la forte minéralisation et la densité surfacique élevée distinguent le centre historique de la ville, affichant des quantités d'énergie solaire absorbée plus importantes que les tissus urbains en damier et dispersés. Il faut également mentionner les travaux de Groleau et Marenne cités par Boukhezer (2002),

concernant trois tissus urbains de densités différentes (quartier Bouffay, Bastide Saint-Foy, Château de Rezé).

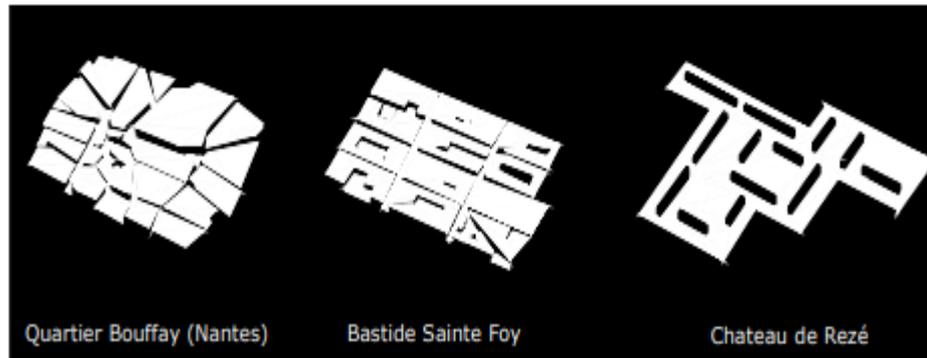


Figure I. 9 : Les trois quartiers étudiés. (Source : Boukhezer, 2002)

Le but de cette étude était d'étudier l'impact de la morphologie urbaine sur le paramètre microclimatique de l'ensoleillement.

L'évaluation de l'ensoleillement des surfaces au sol et celui des façades sur les trois tissus urbains a été faite par le logiciel SOLENE.

Les données de l'étude ont révélé la présence d'une relation entre les deux facteurs physiques de durée d'ensoleillement et la forme urbaine, induisant ainsi des bilans solaires différents. Il ressort également de cette recherche que la forte densité du tissu urbain joue le rôle d'un facteur de décroissance important par rapport aux deux facteurs analysés.

I.4.2.4. La densité volumique

La densité volumique, dénotée Dv , indique le rapport entre le volume construit et la surface du territoire occupé par le projet (Musy, 2006). Elle correspond à une hauteur équivalente à la hauteur moyenne des constructions qui couvriraient tout le territoire, et elle s'exprime en mètres.

L'indicateur de densité volumique, est obtenu avec l'équation (I.8) suivante (Tsoka, 2011) :

$$Dv = \frac{Vb}{As} \quad (I.8)$$

D'où :

- **Vb** : Le volume cumulé des bâtiments (m^3)
- **As** : La surface totale du quartier étudié (m^2)

Selon Musy (2006), ces deux indicateurs morphologiques rendent compte de l'occupation des constructions et de la volumétrie construite par rapport à la surface du territoire correspondant au projet d'urbanisation. Ils accordent une grande importance à la corrélation entre les formes urbaines et les problèmes environnementaux et climatiques.

De son côté, Stewart (2011) estime que le paramètre de densité bâtie est assez important, car il représente la quantité de surface exposée aux émissions solaires, ce qui influence la dispersion de la chaleur sur le sol et les régimes du vent. Il ajoute que ce facteur peut nous informer sur l'imperméabilité et/ou la perméabilité des surfaces, influençant ainsi la capacité de réflexion du rayonnement (albédo).

I.4.2.5. Le coefficient d'occupation des sols (COS)

Le coefficient d'occupation des sols, ou COS, est l'outil fondamental de la réglementation urbaine. C'est un indicateur synthétique qui renseigne sur de nombreuses caractéristiques urbaines associées. Il peut s'appliquer à différentes échelles : la ville, le quartier, l'îlot ou l'immeuble. Pour le calcul des surfaces plancher, il intègre les équipements, les espaces verts, la voirie, etc. Le COS offre une précision accrue par rapport à la densité exprimée en nombre de logements par hectare. Il exerce une influence sur la composition morphologique du tissu urbain, en particulier sur les unités d'habitation, et sert à déterminer le droit de bâtir (Hattab et Zian, 2003).

Le code de l'urbanisme (section 3, article 26) le considère comme la mesure légale de la densité. Selon Saidouni (2000), il est défini comme le rapport entre la surface totale des planchers, considérée hors œuvre nette (SHON), et la surface foncière. Il est obtenu en divisant la surface de plancher d'une construction par la surface de son terrain récepteur, et il est exprimé en nombre décimal.

$$\text{COS} = \text{SHON (surface hors œuvre nette) (m}^2\text{)} / \text{surface foncière (m}^2\text{)}$$

À savoir également que le COS ne fournit que très peu d'informations sur le type de construction, ce qui le rend incapable de maîtriser la forme urbaine. En outre, un même COS peut générer diverses formes urbaines en fonction de la taille et de la configuration des parcelles (Adam, 2010).

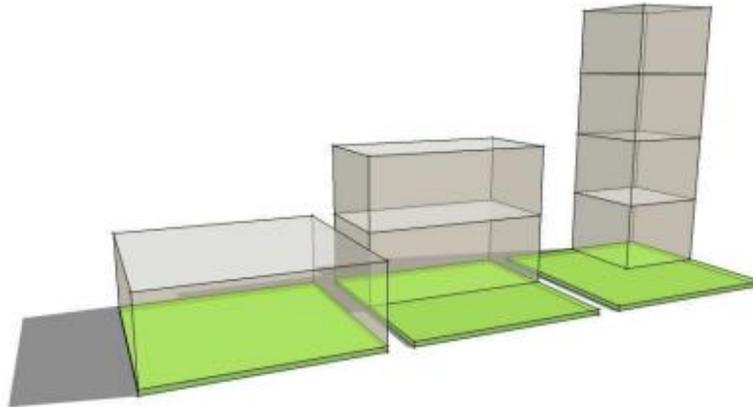


Figure I. 10 : Trois formes bâties avec un même COS, (COS=1). (Source : Adam, 2010)

➤ **Surface hors œuvre brute (SHOB)**

La Surface Hors Œuvre Brute, également connue sous le nom de SHOB, est la somme des espaces comprenant les planchers, les toitures, les terrasses, les balcons et les loggias, ainsi que les surfaces non closes en rez-de-chaussée, les combles et les sous-sols. Elle inclut l'épaisseur des murs et des cloisons. Elle exclut les terrasses ouvertes en rez-de-chaussée, ainsi que les vides tels que les ascenseurs et les escaliers.

➤ **Surface hors œuvre nette (SHON)**

La SHON, ou Surface Hors Œuvre Nette, se calcule en retranchant de la SHOB différentes surfaces selon des critères de hauteur ou d'affectation, telles que :

- Les combles et sous-sols non aménageables inférieurs à 1m 80, une chaufferie, caves, ascenseur...etc.).
- Balcons, loggias, toitures, terrasses accessibles, surfaces non closes en rez-de-chaussée.
- Surfaces aménagées en vue du stationnement des véhicules et leur circulation.

I.4.2.6. Le coefficient d'emprise des sols (CES)

Le CES, ou Coefficient d'Emprise au Sol, détermine le rapport entre la surface bâtie d'une construction ou d'un îlot et la surface effectivement occupée au sol par une construction ou par un groupe de bâtiments. Il s'agit d'une projection verticale de la construction. Le CES est un ratio de 0 à 1 et détermine généralement le pourcentage de densité de l'occupation du sol en urbanisme.

$$\text{CES} = \text{surface construite} / \text{surface foncière}$$

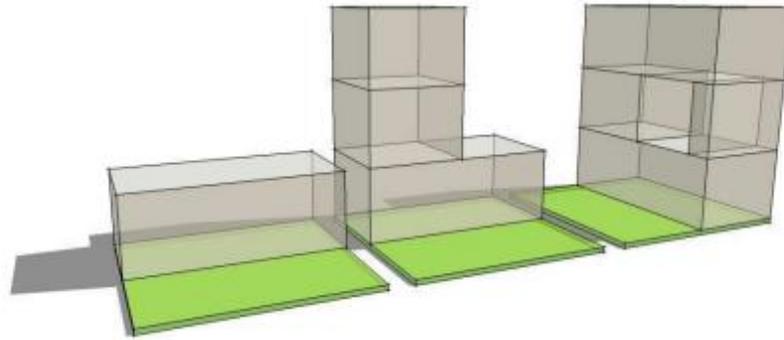


Figure I. 11 : Trois formes bâties avec un même CES, (CES= 0.5). (Source : Adam, 2010)

Selon Boucheriba (2021) et Boucheriba (2022), le CES et le COS sont des indicateurs de densité, le premier exprimant la densité verticale et le deuxième exprimant la densité horizontale. À travers son étude menée à Ain Smara à Constantine en Algérie, les résultats ont démontré un lien entre le COS, le CES, le H/L et le FVC, comme le montre la démonstration ci-dessous :

On partant de l'équation suivante :

$$\text{COS} = \text{CES} \times n \quad (\text{I. 9})$$

On a déduit que dans les cas où « n » est le nombre de niveaux d'une seule construction (par exemple, une construction en RDC+2 implique un nombre de niveaux égal à 3),

On aura donc :

$$\text{COS} = \text{CES} \times \frac{H}{h} \quad (\text{I. 10})$$

Où :

- **H** : La hauteur moyenne d'une seule construction exprimée en mètres ;
- **h** : La hauteur d'un seul niveau exprimée en mètres.

Parallèlement, on a l'équation du FVC suivante :

$$\text{SVF} = \cos \beta \quad (\text{I. 11})$$

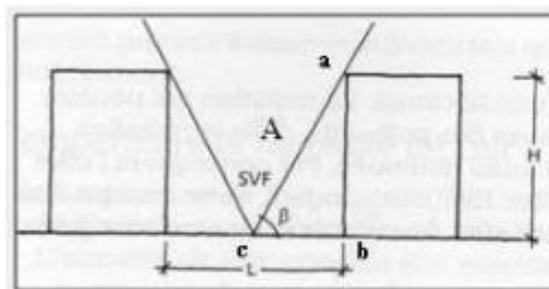


Figure I. 12 : Les paramètres géométriques d'une rue. (Source : Boucheriba, 2021)

En considérant que $L/2$, et la hauteur moyenne d'un étage est h , tandis que A est l'hypoténuse du triangle abc , l'équation géométrique de Pythagore s'exprime comme suit :

$$H^2 + l^2 = A^2 \dots \quad (I.12)$$

On déduit que :

$$A = (H^2 + l^2)^{\frac{1}{2}} \quad (I.13)$$

En sachant ainsi que :

$$\begin{aligned} SVF &= \cos \beta \\ SVF &= \frac{L}{2 \times \sqrt{H^2 + l^2}} \dots \end{aligned} \quad (I.14)$$

Et que :

$$H = \frac{\text{COS} \times h}{\text{CES}} \quad (I.15)$$

On obtient donc l'équation finale suivante :

$$SVF = \frac{L}{2 \times \sqrt{\frac{\text{COS} \times h^2}{\text{CES}^2} + l^2}} \quad (I.16)$$

Cette équation (I.16) (Boucheriba, 2021 ; Boucheriba, 2022) établit une relation directe entre les indicateurs de densité et les indicateurs géométriques du cadre bâti, qui influencent l'ambiance thermique des espaces extérieurs et le confort thermique. Ces indicateurs sont utilisés en climatologie urbaine. Néanmoins, aucune relation n'a été démontrée entre le COS, le CES et les fluctuations microclimatiques, notamment en ce qui concerne la température de l'air.

I.4.2.7. La densité végétale

Le taux de densité végétale mesure la quantité d'espaces verts (parcs, jardins, arbres, etc.) dans une ville, comparée à sa superficie totale. La présence de l'élément vert dans la ville a un impact local sur la température et l'humidité relative de l'air (Ahmed Ouameur, 2007).

Actuellement, la télédétection utilise des images satellites pour évaluer la densité végétale en détectant les masses végétales en termes de volume et de qualité. Cet indicateur de l'environnement végétal ne différencie pas la végétation des espaces publics de celle des espaces privés. Il tient compte de tous les espaces verts qui contribuent à l'ambiance générale d'un secteur (Adam, 2010).

I.4.2.8. La minéralisation

La minéralisation est un indicateur qui informe sur la répartition des espaces végétaux et minéraux dans le tissu urbain. Il exprime le rapport non affecté entre les espaces d'eau et les espaces verts par rapport à la surface totale. Il prend en compte les caractéristiques internes du tissu urbain ainsi que le type de surfaces, notamment s'il est associé à des indicateurs de densité.

D'après Adolphe (2001), une forte minéralisation des espaces urbains permet d'accumuler de 15 % à 30 % de chaleur de plus qu'un espace rural. Les différentes surfaces absorbent la chaleur durant la journée et la restituent la nuit, provoquant des écarts importants de température par rapport aux zones rurales.

I.4.2.9. La rugosité urbaine

La rugosité urbaine se définit comme la hauteur moyenne de la canopée urbaine, formée par les surfaces bâties, les surfaces végétales verticales et horizontales, ainsi que les surfaces non bâties (Adolphe, 2001). La rugosité constitue l'une des propriétés aérauliques d'un tissu urbain, qui altèrent des champs de vitesses des vents (vitesses et directions des vents). Le nombre et la taille des obstacles au flux d'air affectent considérablement le profil du vent au-dessus du sol. Ainsi, plus la rugosité est forte, plus la vitesse du vent moyenne est diminuée (Adolphe, 2001). Ces modifications dépendent essentiellement de l'aménagement urbain, notamment de la taille, de la hauteur et de l'espacement entre les constructions, ainsi que de la nature des surfaces.

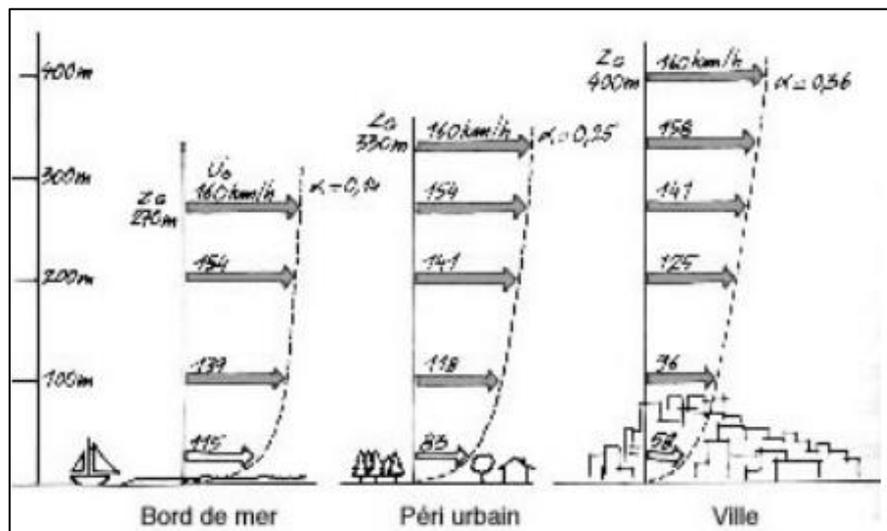


Figure I. 13 : Variation des vitesses du vent pour trois types de sites de densité différentes. (Source : Gandemer et Guyot, 1976)

Un indice de rugosité, qui varie selon les zones en fonction du nombre de constructions et d'habitants, peut également être utilisé pour déterminer la rugosité urbaine. Certains climatologues utilisent cet indice pour déterminer la vitesse du vent dans une zone spécifique. Pour atteindre cet objectif, ils utilisent d'abord l'équation fournie par Gendemer, Jacques et Guyot, Alain (1981), citée par Boucherbiba (2017):

$$V = K \times V(\text{ref}) \times \log \frac{Z}{Z_0} = C \times V(\text{ref}) \quad (I.17)$$

La vitesse de l'air mesurée par la station météorologique de la même zone est ensuite additionnée à la valeur obtenue, avec :

- **K** : Coefficient fonction de la rugosité.
- **Z** : Hauteur concernée.
- **Z₀** : Paramètre de rugosité.
- **V (ref)** : Vitesse moyenne mesurée par la station météo.
- **C** : Coefficient de hauteur et de rugosité.

➤ **Les catégories de rugosité :**

L'annexe nationale de l'eurocode EN 1991-1-4 propose des valeurs de références en fonction de la catégorie :

Catégorie de terrain	
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km
II	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur
IIIa	Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé
IIIb	Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers
IV	Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface sont recouvertes de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts



Figure I. 14 : Les cinq catégories de rugosité. (Source : L'annexe nationale de l'eurocode EN 1991-1-4)

Avec :

- **Catégorie 0** : Océan, mer ou grand lac
- **Catégorie I** : Rase campagne.
- **Catégorie II** : Banlieue.
- **Catégorie III** : Zone urbaine.
- **Catégorie IV** : Centre d'une grande ville.

Variation des coefficients K et Zo en fonction des catégories de rugosité suivantes :

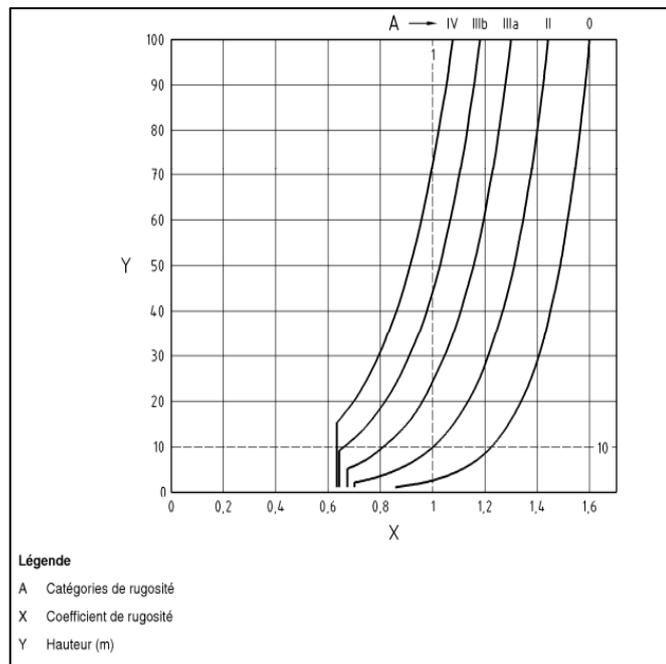


Figure I. 15 : Le coefficient de rugosité en fonction de la catégorie du terrain et de la hauteur z. (Source : L'annexe nationale de l'eurocode EN 1991-1-4)

I.4.2.10. La porosité urbaine

Il s'agit d'une caractéristique des interactions entre le milieu urbain et l'écoulement de l'air (Adolphe, 2001). Cet indicateur gère le degré de pénétration du vent dans les unités urbaines, et donc la ventilation des espaces intérieurs et extérieurs. La forme de l'espace extérieur l'influence fortement, notamment du profil de la ville, qui détermine le type de flux.

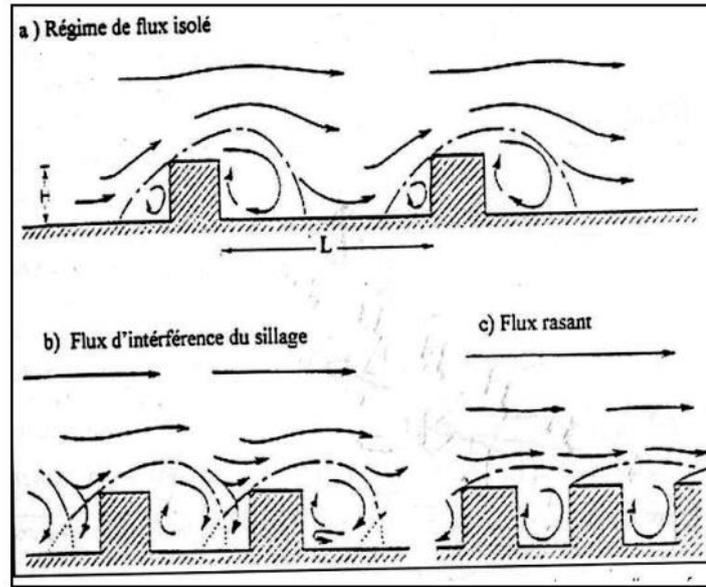


Figure I. 16 : La porosité urbaine affectant le degré de ventilation dans la zone urbaine. (Source : Oke, 1988)

Le rapport entre les volumes non bâtis ouverts sur l'ensemble des volumes du tissu urbain en question est reconnu sous le nom de porosité d'un quartier urbain. Sa valeur est généralement comprise entre 5 % et 50 %, avec une valeur moyenne de 35 %. Les valeurs de référence varient considérablement selon le type de tissu urbain. Les centres historiques présentent souvent une porosité très faible ($\leq 10\%$), tandis que les quartiers urbains récents et les villes coloniales ont une porosité plus élevée ($\geq 35\%$). Cela s'explique par l'interaction entre la densité d'un tissu urbain et cet indicateur qui permet d'apprécier sa porosité par rapport au vent (Athamena, 2012). Le calcul de la porosité s'effectue avec l'équation suivante (Adolphe, 2001) :

$$P = \frac{\sum_i \pi r^2 h_i L_i}{\sum_i V_i + \sum_j V_j} \quad (I. 18)$$

Avec :

- **Li** : La longueur de l'espace ouvert i
- **rh,i** : Le rayon hydraulique de l'espace ouvert i
- **Vj** : Le volume moyen de l'espace bâti j
-
- **Vi** : Le volume moyen d'un espace ouvert i

Le **rh,i** est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$rh_i = \frac{hl}{h + l} \quad (I. 19)$$

Avec :

- **h** : La valeur de la hauteur de la canopée dans la rue considérée (hauteur moyenne des bâtiments qui la bordent).
- **I** : La valeur de la largeur moyenne de la rue.

I.4.2.11. La sinuosité urbaine

D'après la définition d'Adolphe (2001), la sinuosité est un indicateur qui représente la somme des longueurs des segments de rue pondérés par un coefficient dépendant de l'angle entre la direction de la rue et une direction de référence. Les phénomènes aérauliques sont décrits par ce paramètre, qui peut être facilement calculé dans un Système d'Information Géographique (SIG), permettant de distinguer une rue ouverte d'un espace fermé ou d'un fond de cour. L'équation suivante représente la sinuosité (I.20) :

$$S0 = \frac{\sum_{seg\ rues} \cos^2(\theta_i) \times Li}{\sum_{seg\ rues} Li} \quad (I.20)$$

Avec :

- **Li** : Longueur du segment de rue
- **i** : Angle entre la direction considérée et la direction de l'axe du segment de rue i.

I.5. Les indicateurs morphologiques à l'échelle de l'espace public

I.5.1. La géométrie urbaine

La géométrie urbaine désigne les formes des constructions, leur organisation spatiale et leurs proportions relatives. Un aspect souvent étudié est le lien entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues. Plusieurs travaux menés par Johansson (2006) ; Ali-Toudert et Mayer (2006) ; Krüger et al. (2011) montrent l'importance de cette géométrie pour assurer un confort thermique optimal en milieu urbain.

I.5.2. L'espace public

D'après Choay (2009), « l'espace public » se réfère à la partie non bâtie du domaine public utilisée à des fins publiques, et il est défini comme « la partie du domaine public non bâtie, affectée à des usages publics ». L'espace public est donc formé par une propriété et par une affectation d'usage. Il se distingue par le fait qu'il est destiné à une variété d'activités publiques et privées plutôt qu'à un seul but (Jacobs, 1961). Les piétons ont la liberté de mouvement dans cet espace, qui peut également accueillir diverses activités temporaires. Ces activités peuvent interagir avec les espaces plus spécialisés qui bordent l'espace public, créant

un lieu de rencontre et d'échange où diverses activités peuvent coexister de manière fluide et spontanée.

Ainsi, l'espace public sert de lieu d'interaction sociale entre les habitants de la ville, tout comme un espace d'interaction urbanistique entre les bâtiments et les espaces clôturés destinés à abriter des fonctions plus spécialisées. « Cet espace public devient l'espace de circulation et des promenades marchandes ou hygiéniques que nous connaissons aujourd'hui ». Il comprend plusieurs types d'espaces tels que la rue, le boulevard, la place, etc.

I.5.3. La géométrie de la rue

Dès l'origine des villes, comme celles du Moyen Âge ou les cités méditerranéennes, la rue était un espace privé qui donnait accès à d'autres espaces et propriétés privés, bâtis ou non. Elle servait de lieu de rencontre et d'échange d'idées entre les individus, sans se limiter à la circulation du trafic, mais en jouant aussi un rôle social.

Le mot « rue » vient du latin « ruga », qui signifie ride. Ainsi, la rue peut être vue comme une cicatrice laissée par l'histoire. Le mot « rue » a plusieurs synonymes, dont les principaux sont : allée, artère, chaussée, avenue, impasse, voie, passage (Boukhabla, 2015).

La rue constitue l'échelle intermédiaire de la structure urbaine, située entre l'échelle du bâtiment et celle de la canopée urbaine. Elle représente l'élément principal de la géométrie urbaine, composé d'un espace de circulation bordé de chaque côté par un bâti continu. Trois dimensions principales définissent les caractéristiques géométriques de la rue : longueur (L), hauteur (H), et largeur (W) (voir la figure I.18) :

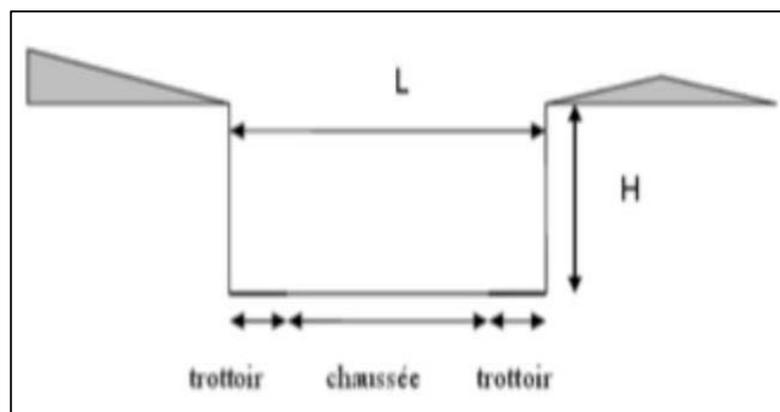


Figure I. 17 : Le profil d'une rue. (Source : www.sante-environnement.be)

Avec :

- **L** : Longueur des constructions bordant la rue.

- **H** : Hauteur des constructions.
- **W** : Largeur de la voie, qui pourra avoir comme nomenclature la lettre L (d'après les versions francophones).

Ainsi que par son orientation.

I.5.4. Les formes géométriques d'une rue

I.5.4.1. La rue canyon : Les rues de type canyon sont des rues étroites bordées de part et d'autre par de grands bâtiments en continu. Du point de vue technique, une « rue canyon » est une rue dont les constructions, des deux côtés de la rue et sur plus de 100 mètres, se succèdent sans interruption ou sont étroitement juxtaposées.

D'après la définition de Jean Louis Izard (2000), un canyon urbain correspond à une rue bordée d'immeubles, dont la hauteur de ceux-ci est supérieure à deux fois la largeur de la rue ($H > 2L$). Ainsi, le rapport moyen entre la hauteur du bâti et la largeur de ce type de rue est supérieur à 0,5.

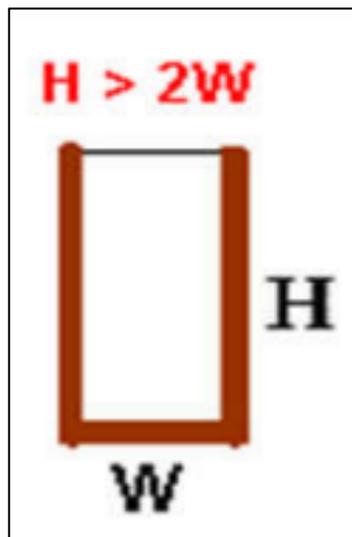


Figure I. 18 : Forme de la rue canyon. (Source : Izard, 2000)

On appelle "rue large" une rue dont le rapport H/L est inférieur à 1, avec une largeur supérieure à la hauteur moyenne des bâtiments qui la bordent.

Les rues canyons, fréquentes en milieu urbain, posent des problèmes de santé publique en raison du trafic routier, qui génère beaucoup de pollution atmosphérique. Cette pollution, émise près du sol, a du mal à se disperser dans ces rues étroites et confinées. L'air tourbillonne et retient les polluants, qui s'accumulent du côté sous le vent.



Figure I. 19 : Principe d'entraînement des polluants dans une rue « canyon ». (Source : www.atmo.-franche-comte.org)

Les canyons urbains sont classés en fonction de la valeur du rapport entre la hauteur des bâtiments (H) et la largeur de la rue (L). Dans de tels cas, le ciel est très peu visible, ce qui signifie que cet espace reçoit peu de radiations solaires et est protégé du vent. Plus le rapport H/L est élevé, plus l'accumulation de polluants sera importante, et les écarts de température pendant la journée seront réduits.

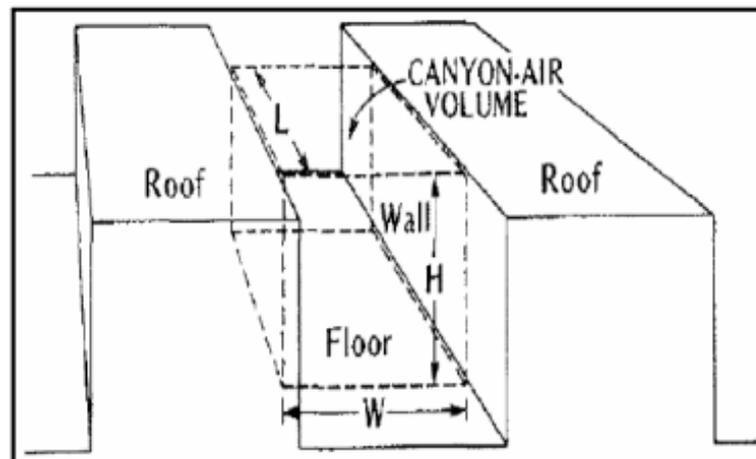


Figure I. 20 : Canyon urbain. (Source : Nunez et Oke, 1977)

I.5.4.2. La rue dièdre : D'après Izard (2000), la rue en dièdre est une configuration dans laquelle le ciel et les façades sont vus angulairement de manière équivalente. Cela permet de profiter à la fois d'un ensoleillement direct et d'un éclairage par les façades. Pour cela, il faut que l'une des conditions suivantes soit respectée : ($H/L = 0,5$ ou $H/L = 1$).

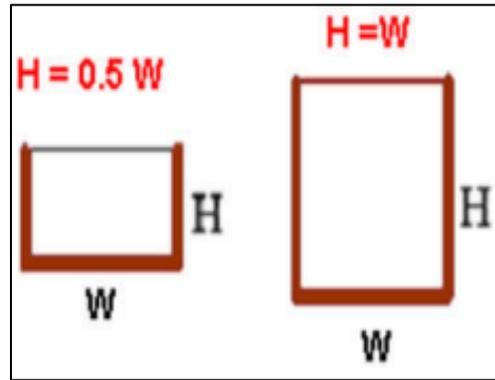


Figure I. 21 : Forme de la rue dièdre. (Source : Izard, 2000)

I.5.4.3. La rue dégagée : D'après Izard (2000), dans un espace dégagé, le ciel représente une part importante de la visibilité angulaire de l'espace, ce qui signifie que les rayonnements du soleil et du ciel sont dominants. Il est nécessaire que : ($H/L < 0,25$). Par conséquent, l'espace est exposé au vent et ensoleillé.

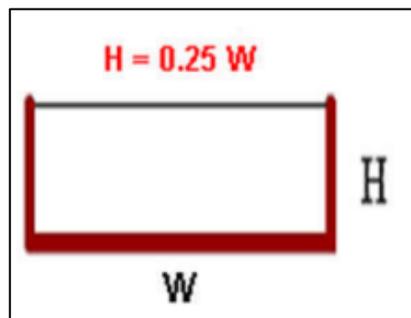


Figure I. 22 : Forme de la rue dégagée. (Source : Izard, 2000)

I.5.5. Les indicateurs géométriques

I.5.5.1. Le prospect (ratio H/L) : Selon Arnfield (1990) et Oke (1987), le rapport d'aspect H/L correspond au ratio entre la hauteur moyenne des bâtiments et la largeur moyenne de la rue. Ce rapport offre une mesure pour caractériser l'ensoleillement, les flux lumineux disponibles et l'effet d'ombrage dans un tissu urbain spécifique. Il est crucial pour déterminer la proportion des surfaces verticales et horizontales impliquées dans les échanges énergétiques dans l'espace. Il existe de nombreux phénomènes microclimatiques qui peuvent être causés par le rapport H/L.

Selon Santamouris (2001), les façades adjacentes des rues ont la capacité de canaliser le vent, de le limiter et de provoquer des mouvements de tourbillons au pied des bâtiments. Par conséquent, les rues ont un impact direct sur le microclimat urbain, qui peut être favorable ou défavorable en fonction de la configuration spatiale du tissu urbain.

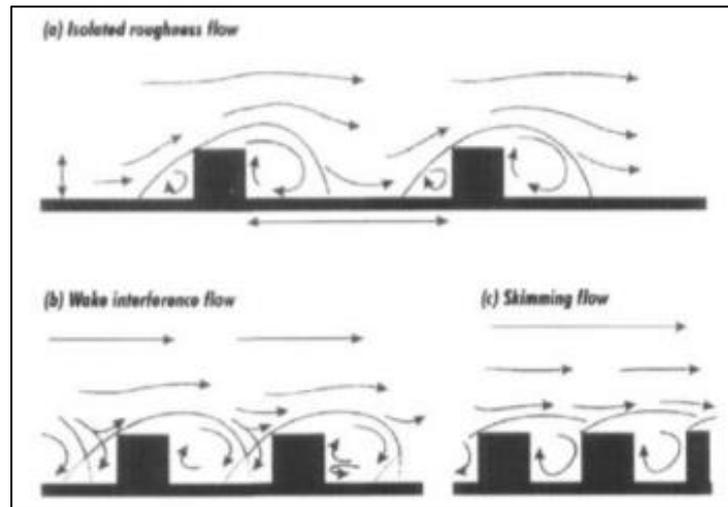


Figure I. 23 : Profil de la circulation du vent variant selon le ratio H/L du site. (Source : Santamouris, 2001)

Selon Athamena (2012), une valeur élevée du rapport H/L peut également entraîner d'importants phénomènes thermiques pendant la nuit en raison du piégeage radiatif de la chaleur au niveau de la rue, contribuant au stockage de la chaleur dans les matériaux urbains. Les matériaux absorbent une grande quantité d'irradiation solaire durant la journée, puis les restituent progressivement sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde pendant la nuit. Selon Colombet (2008), ces rayonnements seront piégés de la même manière que les rayons solaires. Le paramètre "H/L" joue un rôle important dans l'intensité du piégeage radiatif. Par conséquent, la différence de chaleur restituée entre un canyon avec un rapport H/L de 2 et un canyon avec un rapport H/L de 0,7 serait de 50 (W/m²).

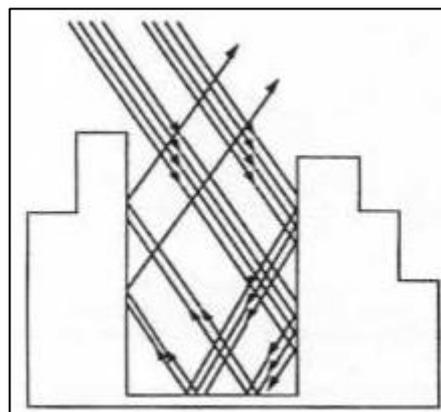


Figure I. 24 : Phénomène du piégeage radiatif. (Source : Ringenbach, 2004)

L'étude de Johansson (2006) a exploré l'influence de la géométrie urbaine sur le confort thermique extérieur dans la ville de Fès au Maroc. À travers cette recherche, l'auteur a analysé l'effet du rapport H/L (hauteur des constructions sur la largeur des rues) dans les rues étroites de la Médina et les rues larges de la nouvelle ville. L'objectif était de comparer les effets des

deux configurations urbaines sur les conditions microclimatiques, en mettant particulièrement l'accent sur le confort thermique extérieur, évalué à l'aide de l'indice de confort PET (Température Physiologique Équivalente).



Figure I. 25 : Le quartier Seffarine dans le centre de la Médina. (Source : Johansson, 2006)

Figure I. 26 : Le quartier Adarissa au sud de la nouvelle ville. (Source : Johansson, 2006)

Les résultats ont démontré que les rues étroites de la Médina, avec un rapport H/L égal à 1,6, étaient plus fraîches pendant la période estivale, avec une température de l'air ne dépassant pas les 32 °C. Cependant, avec un rapport de 0,1, les températures de l'air dans les rues larges de la nouvelle ville étaient de 41 °C. Les rues de la Médina offrent un climat confortable, tandis que dans le quartier moderne, les températures enregistrées étaient constamment au-dessus des seuils de confort tout au long de l'après-midi. Par rapport à une configuration de faible rapport H/L, l'impact de l'ombre sur les rues étroites réduit le réchauffement de l'air car les surfaces reçoivent moins de rayonnement solaire. Cependant, en raison du faible FVC, la restitution de la chaleur est plus lente la nuit, en d'autres termes, les rues étroites ont des températures plus élevées la nuit que les rues larges.

D'après Ahmed Ouameur (2007), les dimensions horizontales et verticales de l'espace influencent le calcul numérique du rapport H/L. Il est nécessaire de réaliser deux relevés pour mesurer cet indicateur : un relevé de la hauteur de toutes les surfaces verticales pour calculer

une hauteur moyenne, et un relevé de la plus petite largeur de l'espace. L'équation suivante peut être utilisée pour calculer le rapport H/L:

$$\frac{H}{L} = \frac{H_m}{L_p} \quad (I.21)$$

Où :

- **H_m** = La hauteur moyenne de l'espace, exprimée en m.
- **L_p** = La dimension la plus réduite de la largeur de l'espace, mesurée en m.

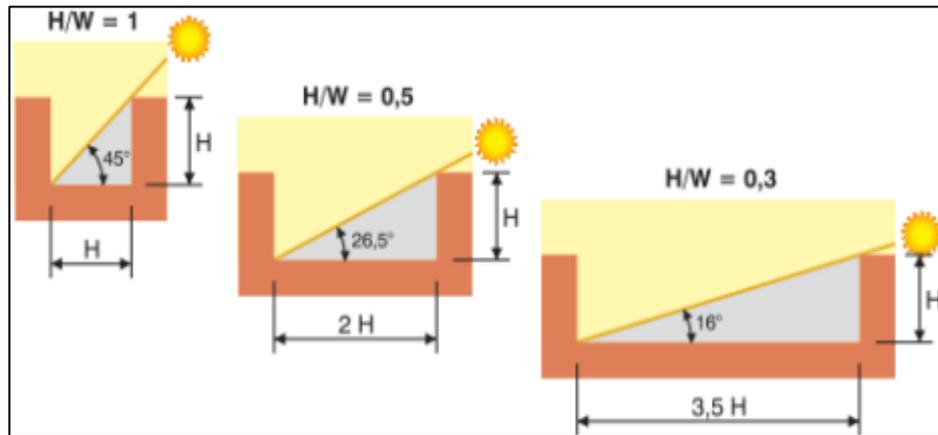


Figure I. 27 : L'exposition au soleil et l'effet d'ombrage varient en fonction des différentes valeurs du rapport H/L. (Source : Reiter, 2007)

I.5.5.2. Le facteur de vue de ciel (FVC) : En anglais, le Sky View Factor (SVF), tel que défini par Oke (1988), est un paramètre sans dimension, bien qu'il puisse être exprimé en pourcentage (%). Il correspond à l'angle solide sous lequel le ciel est vu d'un certain point, calculé comme le facteur de forme entre la surface d'évaluation et les surfaces de l'hémisphère du ciel non masquées. Cet indicateur permet de caractériser le phénomène de piégeage radiatif et joue un rôle important dans la modélisation des phénomènes microclimatiques à l'échelle urbaine, tels que l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).

Selon Colombet (2008), le facteur de vue du ciel représente la partie du ciel observable à partir de la surface considérée. Ce facteur n'est pas influencé par la latitude, l'orientation ou le moment de l'année, mais plutôt par la géométrie de l'espace urbain. Il montre à quel point les constructions le long d'une rue obstruent ou ouvrent le ciel. Il permet d'évaluer le confort visuel et l'éclairage naturel des environnements intérieurs et extérieurs. Il est variable en fonction des caractéristiques urbaines telles que la hauteur des constructions et l'espacement entre les façades, dépendant ainsi du rapport entre les surfaces géométriques.

Le facteur de vue du ciel varie de 0 à 1. Une valeur de 1 indique une vue dégagée du ciel sans aucun obstacle (champ isolé), tandis qu'une valeur de 0 signifie que la vue du ciel est entièrement obstruée (Oke, 1988 ; Athamena, 2012).

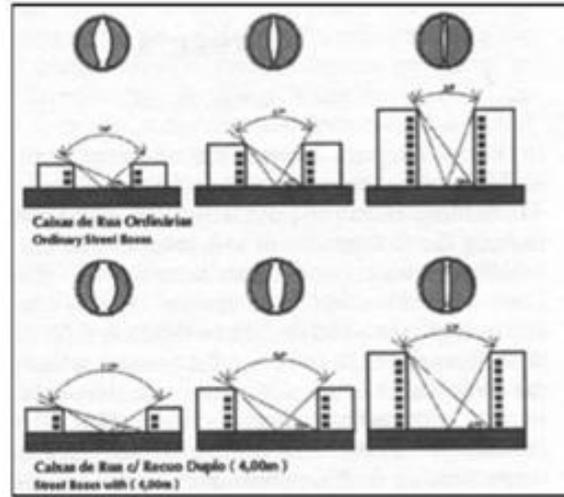


Figure I. 28 : Le facteur de vue du ciel pour différents profils de rues. (Source : Ait- Ameer, 2002.)

Le facteur de vue du ciel est un élément important à prendre en compte pour quantifier l'énergie solaire en milieu urbain. Il permet de déterminer la quantité de rayonnement solaire reçue par les différents profils de la rue dans un contexte urbain (Steyen, 1980 ; Johnson et Watson, 1984). Le FVC est avant tout un élément géométrique qui analyse un point par rapport à son contexte. Une faible valeur du facteur de vue du ciel entraîne le piégeage du rayonnement de longue longueur d'onde et empêche le refroidissement nocturne (Oke, 1979).

En effet, le facteur de vue du ciel représente un indicateur géométrique particulièrement significatif pour l'atteinte des objectifs de maîtrise climatique en matière d'urbanisme.

D'après Erell et al., 2011, pour calculer le facteur de vue du ciel, on distingue deux cas :

- Si le canyon est symétrique profond, le FVC est calculé selon l'équation suivante :

$$FVC = \cos(\beta W) \quad (I. 22)$$

Où β représente l'angle solide de vision à partir de la ligne centrale de la surface plane.

Tandis que :

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{0.5L} \right) \quad (I. 23)$$

- Si le canyon est asymétrique profond, le FVC est calculé en utilisant l'équation suivante :

$$FVC = \frac{\cos\beta_1 + \cos\beta_2}{2} \quad (I. 24)$$

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{H_1}{0.5} \right) \quad (I.25)$$

$$\beta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{H_2}{0.5} \right) \quad (I.26)$$

D'où : H_1, H_2 , sont les hauteurs des constructions des deux côtés du canyon urbain.

Le facteur de vue du ciel peut également être calculé pour d'autres géométries particulières (des espaces non canyon), on peut citer quelques formes spécifiques d'après (Erell, E. et al, 2011) :

-Un espace bordé d'un seul côté (figure I.29), le FVC est calculé selon la formule suivante :

$$FVC = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (I.27)$$

Où :

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{D} \right) \quad (I.28)$$

A savoir que D représente la distance entre le point de mesure et le mur de la façade.

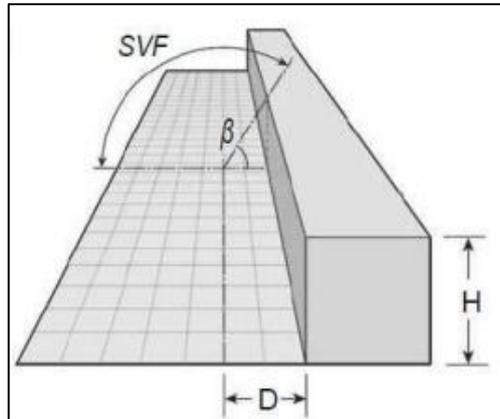


Figure I. 29 : Les paramètres géométriques nécessaires pour le calcul du FVC dans un espace bordé d'un seul côté. (Source : Erell et al., 2011)

-Pour une place circulaire (figure I.30), le FVC est calculé suivant la formule ci-dessous :

$$FVC = \cos^2 \beta \quad (I.29)$$

Avec :

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{r} \right) \quad (I.30)$$

D'où r est le diamètre du cercle.

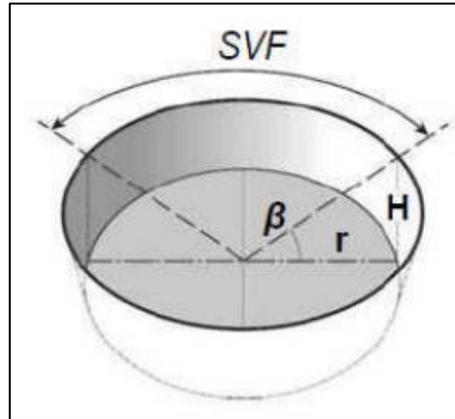


Figure I. 30 : Les paramètres géométriques nécessaires pour le calcul du FVC pour une place circulaire. (Source : Erell et al., 2011)

Pour le cas d'une cour rectangulaire en trois dimensions (3D) (hauteur, largeur et longueur) (figure I.31), le FVC est estimé par la formule suivante :

$$FVC = \cos(\beta_W) \times \cos(\beta_L) \quad (I. 31)$$

Où :

$$\beta_W = \tan^{-1} \left(\frac{H}{0.5W} \right) \quad (I. 32)$$

Et :

$$\beta_L = \tan^{-1} \left(\frac{H}{0.5L} \right) \quad (I. 33)$$

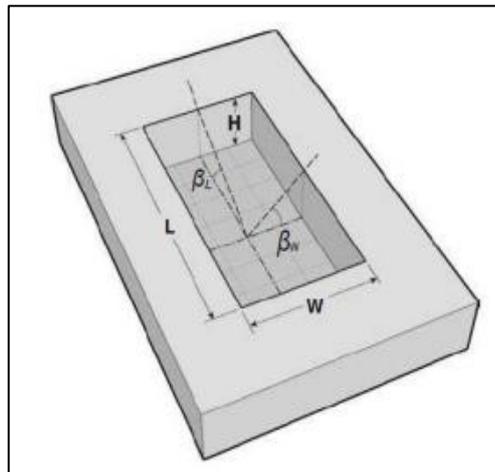


Figure I. 31 : Les paramètres géométriques nécessaires pour le calcul du FVC pour une cour de forme rectangulaire. (Source : Erell et al., 2011)

Pour les configurations urbaines irrégulières et complexes, caractéristiques de la plupart des environnements urbains réels, le calcul du facteur de vue du ciel peut être effectué à l'aide de divers modèles numériques (Bruse et Fler, 1998 ; Teller et Azar, 2001 ; Matzarakis et al.,

2007). Ces modèles reposent sur la connaissance de chaque angle qui compose l'hémisphère, ainsi que de l'élévation associée (en relation avec l'ombre générée), à savoir l'angle β et l'angle d'azimut α .

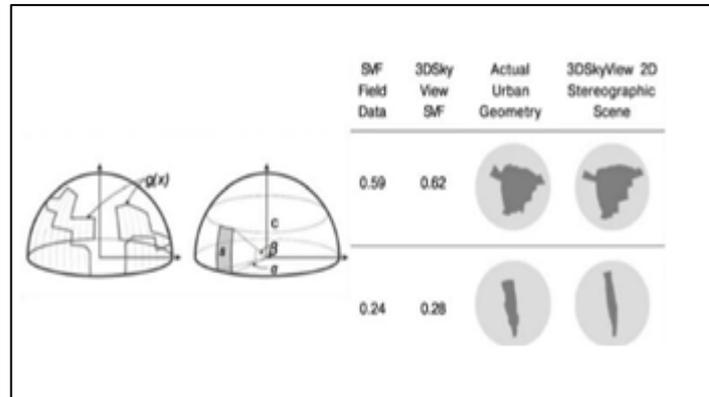


Figure I. 32 : Estimation du FVC à l'aide de l'outil informatique le SIG. (Source : Erell et al., 201)

Par conséquent, on peut considérer le facteur de vue du ciel comme la somme de toutes ces informations sur les angles rapportés sur l'hémisphère. Plusieurs logiciels peuvent calculer (FVC) en se basant sur la formule mentionnée précédemment. Parmi ces nombreux logiciels, citons RayMan, ENVI-met, Solene, Ecotect Analysis, l'option « Héliodon virtuel » d'AutoCAD, EnerCAD, DL-Light qui permet de l'évaluer directement dans SketchUp. Ce paramètre permet essentiellement de mesurer l'ouverture du tissu urbain vers le ciel avec les données du modèle 3D du projet et de son environnement. Il peut également être évalué par un procédé photographique (Grimmond, 2001 ; Boucheriba, 2004). Le dispositif est constitué d'un appareil photo numérique (caméra) couplé à un objectif fish-eye (figure I.33).



Figure I. 33 : Photos Fish-eye prises au quatre stations respectivement de gauche à droite : (1) espace ouvert (2) espace semi-ouvert (3) et (4) espaces de type Canyon. (Source : Boucheriba, 2004)

L'étude de Boucheriba (2004) se focalise sur la quantification du confort thermique le long de deux axes routiers dans un tissu colonial au cœur de la ville de Constantine, nommé le « COUDIAT ».

Dans une première phase, l'analyse a examiné les variations de la chaleur atmosphérique dans trois catégories d'espaces différentes, à savoir ouvert, semi-ouvert et canyon. L'objectif était d'évaluer la configuration géométrique la mieux adaptée pour un climat semi-aride similaire à celui de la ville de Constantine.

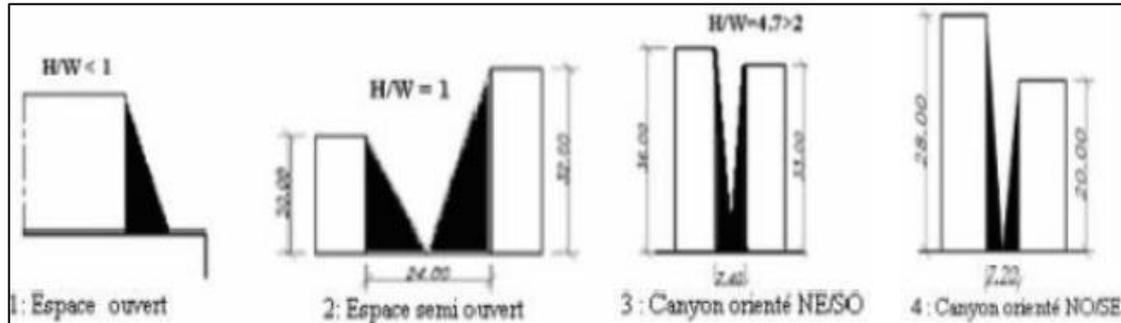


Figure I. 34 : Représentation des coupes schématiques des divers profils géométriques des stations 1, 2, 3, et 4. (Source : Boucheriba, 2004)

Par la suite, l'étude a recouru à l'indice de confort PMV (Vote moyen prévisible) pour évaluer le confort thermique en extérieur. Le logiciel ENVI-met 3, utilisé dans cette recherche, calcule le PMV des espaces extérieurs en utilisant neuf échelles de confort spécifiques à ces espaces, malgré le fait que cet indice a été initialement créé pour les environnements intérieurs. La plage théorique du confort extérieur se situe entre -4 et +4, selon le PMV.

Les résultats révèlent une élévation de la température d'air dans les espaces ouverts et semi-ouverts à 35.5°C et 35.3°C, comme indiqué dans le tableau (I.2). En revanche, la température de l'air dans le canyon est plus modérée et s'élevant à 35°C.

De plus, les résultats ont révélé une forte corrélation entre la température de l'air, l'indice de confort PMV et la température moyenne radiante. Le rayonnement des différentes surfaces à un impact direct sur la température de l'air, expliquant ainsi cette corrélation observée. En période de surchauffe, l'espace canyon se distingue par une sensation de fraîcheur et un confort notable.

Tableau I. 2 : Les valeurs de la température de l'air ambiant, la température radiante et le PMV. (Source : Boucheriba, 2004)

	15h00		
	Tair (°C)	MRT (°C)	PMV
Espace dégagé	35.50	84.42	06.90
Canyon	35.00	58.00	04.90
Espace dièdre	35.30	79.00	06.50

Les résultats de la simulation des deux canyons urbains ont démontré que le canyon orienté NE/SO, avec un ratio de 4.7 et un FVC de 0.12, est plus avantageux en termes de confort thermique extérieur par rapport au canyon orienté NO/SE, qui possède un ratio H/L de 3,3 et un FVC de 0,076. Cela est dû essentiellement à la différence de géométrie.

I.6. Les indicateurs physiques

I.6.1. L'albédo moyen des surfaces

L'albédo est une grandeur physique qui mesure le rapport entre l'énergie solaire réfléchiée par une surface et l'énergie solaire qu'elle reçoit (Bozonnet, 2005). Cette grandeur, sans unité et comprise entre 0 et 1, caractérise la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire incident. Un albédo de 0 indique une absorption totale de la lumière, tandis qu'un albédo de 1 signifie une réflexion totale des rayons solaires interceptés par la Terre, bien que certains puissent être renvoyés dans l'espace en raison d'un albédo non nul.

Les niveaux d'albédo varient dans les environnements urbains selon les régions. Selon Taha (1997), les albédos urbains se situent généralement entre 0,10 et 0,20, mais dans certaines villes européennes et américaines, ces valeurs peuvent être plus élevées, atteignant entre 0,15 et 0,30. Pour certaines villes nord-africaines, l'albédo peut varier de 0,45 à 0,60 en raison de l'utilisation de surfaces de couleurs claires avec une réflectance plus élevée (Fahed, 2018). Cependant, Prado et Ferreira (2005) ont observé que l'albédo des zones urbaines est généralement inférieur à celui des zones rurales, contribuant ainsi à l'augmentation des températures des matériaux urbains et à la formation d'un phénomène d'îlot de chaleur urbain.



Figure I. 35 : Les albédos en milieu urbain. (Source : [http : //www.notre-planete.info](http://www.notre-planete.info), 2019)

Actuellement, les chaussées dans les milieux urbains occupent environ 40 % de la couverture urbaine d'une ville, avec 75 à 80 % des routes étant noires. Ces itinéraires participent à la connectivité et à la mobilité urbaines (Cheela et al., 2021). Les chaussées et les voies de circulation ont pris la place de la végétation avec l'utilisation de matériaux sombres à haute absorption de radiations solaires tels que l'asphalte et le bitume, qui possèdent une très faible valeur d'albédo (0,07).

L'énergie solaire est absorbée et emmagasinée dans les chaussées. Cela provoque une hausse des températures de surface. La réduction de la couverture végétale, avec un albédo variant de 0,25 à 0,30 pour les arbres et de 0,15 à 0,18 pour les surfaces gazonnées, amplifie également l'élévation des températures de l'air. Cette situation contribue à la formation d'îlots de chaleur urbains dans la ville.

Tableau I. 3 : Albédos selon les types de surfaces. (Source : Parlow, 2011)

Types de surfaces	Albédos
Soil, dark wet	0.06-0.08
Soil, light dry	0.16-0.18
Stones	0.2-0.3
Forest, coniferous	0.05-0.15
Forest, deciduous	0.10-0.25
Grass, green	0.26
Rock, granite	0.12-0.18
Road, asphalt	0.05-0.15
building	0.09
concrete	0.15-0.37
Urban, mean	0.15

L'albédo est un paramètre d'une grande importance pour le climat, particulièrement en ce qui concerne le confort thermique. Une analyse menée par Taha et al. (1992) souligne que l'utilisation de matériaux à haut albédo diminue l'absorption d'irradiation solaire par l'enveloppe des bâtiments et les structures urbaines, leur permettant de maintenir leurs surfaces plus fraîches. L'étude a mesuré les températures et l'albédo de différentes surfaces. Ils ont constaté qu'au début de l'après-midi d'une journée claire d'été, les revêtements élastomères blancs, caractérisés par un albédo de 0,72, présentaient une température inférieure de 45 °C par rapport aux revêtements noirs, dont l'albédo était de 0,08. En comparaison, une surface blanche, avec un albédo de 0,61, affichait une élévation de température de seulement 5°C par rapport à la température ambiante, tandis que le gravier conventionnel, ayant un albédo de 0,09, enregistrait une élévation de température de 30°C par rapport à la température ambiante.

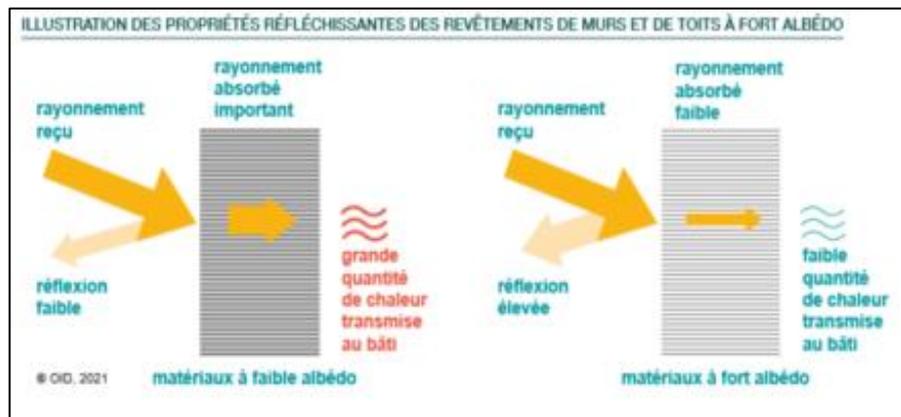


Figure I. 36 : propriétés réfléchissantes des matériaux de revêtements. (Source : Guide des actions adaptatives au changement climatique, OïD, 2021)

Une autre étude réalisée par Doulos et al. (2004) avait pour objectif d'évaluer la pertinence des matériaux utilisés pendant l'été 2001 dans les zones extérieures urbaines pour lutter contre l'effet de l'îlot de chaleur urbaine et contribuer à abaisser les températures de l'air ambiant. L'étude expérimentale a porté sur un total de 93 matériaux de revêtement de sol. Les températures de surface ont été mesurées par thermographie infrarouge sur des échantillons exposés aux rayonnements solaires. Les résultats de l'étude ont révélé des variations pouvant atteindre 25°C entre les températures de surface de deux matériaux distincts. De manière significative, un écart maximal de 6,9°C a été observé entre la température de surface de 12 matériaux clairs et la température de l'air ambiant, tandis que pour les matériaux foncés, cet écart était de 10,2°C à 15,5°C.

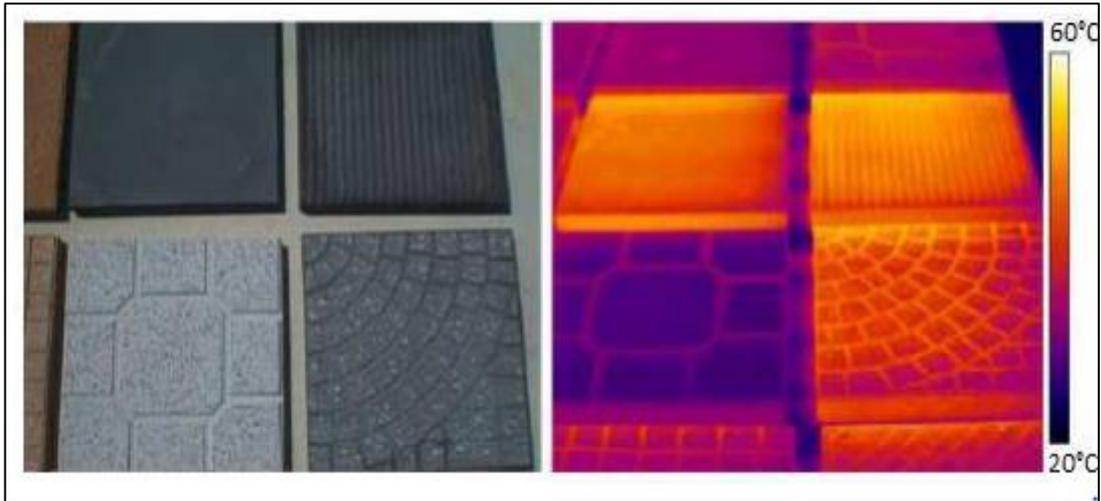


Figure I. 37 : Thermographie infrarouge des divers revêtements testés dans les travaux de Doulos et al., 2004.
(Source : Doulos et al., 2004)

Conclusion

Ce chapitre couvre deux notions cruciales pour notre recherche. Tout d'abord, il explore le climat de manière générale en examinant ses échelles spatio-temporelles, ainsi que le phénomène microclimatique bien connu de l'îlot de chaleur urbain, qui affecte de plus en plus l'environnement thermique urbain et provoque des conséquences graves en termes d'inconfort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

La deuxième notion aborde la morphologie et la forme urbaine sur deux échelles (macro et micro), ainsi que la relation entre la morphologie urbaine et le climat urbain. Elle explore comment la morphologie urbaine à différentes échelles influence le climat local et le microclimat au niveau des espaces urbains extérieurs.

L'objet de notre recherche est l'espace urbain, défini par sa morphologie et sa forme urbaine. Ces concepts exigent une définition détaillée, car une compréhension approfondie est impérative pour identifier correctement les indicateurs morphologiques nécessaires à notre recherche.

La morphologie urbaine est définie comme l'analyse de la forme tridimensionnelle de la ville, englobant les caractéristiques et les phénomènes ayant un impact sur l'environnement et l'énergie. Elle est le facteur numéro un qui impacte le climat urbain de la ville, et permet d'instaurer des microclimats différents d'un espace urbain à un autre.

Aujourd'hui, son étude est d'une grande importance, et c'est pourquoi nous expliquons la morphologie et la forme urbaine. Elle est le résultat d'un développement urbain inévitable de plusieurs formes urbaines, ayant un rôle déterminant en agissant de manière directe sur la génération des ambiances urbaines et la qualité d'usage des espaces urbains extérieurs.

Les deux notions de morphologie et de forme urbaine sont généralement confondues, alors qu'elles se distinguent l'une de l'autre, la deuxième étant l'objet d'étude de la première. Cela rend leur étude assez fine et exige une connaissance approfondie de leurs indicateurs à différentes échelles.

Ce chapitre a permis de clarifier la différence entre ces deux termes, ainsi que de présenter un ensemble important d'indicateurs morphologiques et géométriques ayant une influence significative sur le climat urbain à diverses échelles (macro et micro). Ces indicateurs incluent la densité et la compacité des tissus urbains, le rôle du facteur de vue du ciel (FVC), le rapport H/L et l'albédo des surfaces, ainsi que les méthodes associées à leur calcul.

Les paramètres microclimatiques nécessaires à l'évaluation du confort thermique en milieu urbain sont influencés par ces indicateurs morphologiques et géométriques. C'est dans ce sens que nous allons mener notre recherche afin de proposer des solutions pertinentes aux phénomènes climatiques évoqués et d'optimiser le niveau de confort thermique à différentes échelles spatiales.

**Chapitre II : Les ambiances
thermiques dans les espaces urbains
extérieurs**

« Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort » (Givoni, B)



« Le confort est un terme si nébuleux à définir et si subjectif, qu'un consensus universel sur son sens est presque impossible à obtenir » (Slater, 1985)

Introduction

Le confort est une exigence fondamentale dans les espaces, influant sur la qualité des ambiances thermiques intérieures et extérieures. Il représente un paramètre essentiel décrivant la qualité et l'usage des espaces, assurant le bien-être de l'homme. Ce concept englobe différentes formes de confort telles que le confort visuel, acoustique, respiratoire, psychologique et thermique, ce dernier et d'une grande importance indiquant la relation entre le corps humain et son environnement pour garantir la santé et le bien-être.

Ce chapitre explore la notion d'ambiance, en mettant particulièrement l'accent sur le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs. Au cours des dernières décennies, le confort thermique en milieu urbain est devenu un sujet d'intérêt majeur pour les chercheurs en climatologie, en urbanisme et en architecture.

En milieu urbain, les phénomènes microclimatiques sont accentués, créant des états d'inconfort et de malaise pour les usagers de ces espaces. Ces conditions peuvent, dans certains cas, entraîner la mortalité de personnes vulnérables, telles que les personnes âgées ou celles atteintes de maladies chroniques.

Dans ce contexte, des recherches approfondies ont été menées, en particulier dans les climats agressifs comme les climats arides et semi-arides, où les périodes extrêmes de surchauffe urbaine pendant la saison estivale posent des défis significatifs.

II.1. La notion de l'ambiance de manière générale

Le terme « ambiance » dérive du latin « amibiens », participe présent du verbe « ambire » (latin) qui se traduit par « entourer, environner ».

L'appréhension de la notion d'ambiance s'avère complexe du fait de son incorporation de divers phénomènes physiques et sensibles propres à un lieu, exprimés à travers la nature des interactions qui organisent l'ensemble de ces phénomènes (Lescop, 1999 ; Moreno, 2011). Elle s'appuie sur l'ensemble des sens humains et peut être définie comme la rencontre entre une donnée physique et ce que les sens perçoivent, selon Augoyard (1979), cité par Piombini (2013). Cela renvoie à l'étude des indicateurs objectifs tels que les flux ambiants (lumineux, sonores, thermiques, aérauliques, olfactifs, etc.) et subjectifs liés à l'approche sensible, mêlant le ressenti et le vécu de l'individu.

Selon Moreno (2011), il est essentiel de mettre en lumière la distinction entre la notion « d'ambiance » au singulier et celle « des ambiances » au pluriel. « L'ambiance » au singulier sollicite nos sens et est tributaire de la perception et de l'appréciation individuelle. Elle est

comprise, selon la définition d'Adolphe (1998), comme « la synthèse, pour un individu à un moment donné, des perceptions multiples que lui suggère le milieu qui l'entoure. En ce sens, cette ambiance est unique ».

Cependant, la notion « d'ambiances » résulte de l'interaction des différentes dimensions objectives et subjectives, englobant à la fois l'approche physique et climatique, l'approche sensible liée à l'expérience de l'utilisateur, qui implique la perception et les sensations ressenties par l'individu dans son environnement, et enfin l'approche esthétique présentant la dimension subjective.

La notion d'ambiances dépend de paramètres physiques, humains, spatiaux et temporels (ADEM, 2012) :

II.1.1. La dimension physique : Elle englobe le climat (l'ensoleillement, le vent, la pluviométrie, l'humidité, etc.), le sol, les sous-sols, la faune et la flore locales, l'environnement sonore préexistant sur un site, ainsi que la qualité de l'air. Cette dimension est primordialement liée à la dimension spatiale et humaine.

II.1.2. La dimension humaine : Cette dimension est liée aux usages d'un lieu, à la perception des usagers de ces lieux, à leurs sensations et à leurs interprétations. Elle est intimement liée aux autres paramètres, tels que la dimension physique et spatiale.

II.1.3. La dimension spatiale : Cette dimension est définie par les formes urbaines, architecturales et paysagères, ainsi que par l'organisation des territoires, des espaces publics, et la répartition des différentes fonctions urbaines telles que les activités, l'habitat, les commerces, les équipements, les services, etc.

II.1.4. La dimension temporelle : Elle impose des variations aux ambiances selon des rythmes variables (jour/nuit, semaines/week-end, et les saisons).

La temporalité ne se réduit pas à ces manifestations naturelles ; les habitants et les usagers donnent leur propre temporalité à une ambiance via leurs activités. C'est la combinaison de ces différents paramètres (physiques, humains, spatiaux, et temporels) qui forme les ambiances d'un lieu. Tout projet de territoire, de ville ou d'aménagement doit donc prendre en compte ces dimensions et leurs interdépendances.

Les ambiances ne résultent pas seulement de la somme des facteurs (climatiques, sonores, visuels, etc.), mais de la « mise en musique » du croisement de l'ensemble des éléments

perçus par les usagers. Les ambiances urbaines d'un quartier, d'une ville, ou d'un territoire sont une dimension intrinsèque de tout projet urbain, à travers le choix vis-à-vis de la morphologie urbaine, architecturale, de l'organisation fonctionnelle, des matériaux, etc.

Les recherches sur les ambiances urbaines et architecturales ont démontré que la question des ambiances est parfois abordée sous l'angle de la maîtrise des nuisances, telles que le bruit, la pollution, la gêne olfactive, etc. Cependant, les nouvelles recherches sur les ambiances urbaines proposent de dépasser cette dimension et de développer une approche des ambiances urbaines comme moyen d'améliorer le confort des espaces, et plus largement la qualité de vie urbaine.

II.2. Les approches « quantitative et qualitative » de l'ambiance

II.2.1. L'approche quantitative : Cette approche est assurée par des mesures et par des outils de simulation et de modélisation numériques (logiciels, cartographie informatique...), mais cette approche n'est pas autant suffisante pour apprécier une ambiance.

II.2.2. L'approche qualitative : Cette approche serait couplée aux aspects quantitatifs. C'est par les usagers qu'une ambiance peut être qualifiée, car l'usage est au cœur de la définition des ambiances. Les caractéristiques physiques et spatiales les modèlent, mais c'est la dimension humaine qui leur donne consistance grâce à la perception et à l'appropriation des lieux fréquentés par les usagers. Il s'agit d'une approche sensible liée à l'expérience de l'usage, qui nécessite pour être comprise l'application des analyses sociologiques et psychosociologiques ainsi que des observations directes. En outre, à propos de l'expérience esthétique de la ville, les études abordent ce sujet à travers une approche littéraire qui rend compte de l'expérience de l'espace et de sa plurisensorialité (Péneau, 2000).

II.3. Les éléments constitutifs des ambiances

La notion d'ambiance fait l'objet de travaux de recherche qui mettent en évidence les trois éléments les plus courants qui caractérisent une ambiance : les objets, les sujets et le projet.

- **Le sujet :** Désigne les individus qui utilisent ou visitent des espaces architecturaux et urbains et qui ont une perception physique de leur environnement.
- **L'objet :** Renvoie aux phénomènes physiques qui influencent l'ambiance, tant naturels qu'anthropiques, et leur interaction avec l'environnement construit et naturel.

➤ **Le projet** : Implique d'élaborer un projet urbain ou architectural qui soit en harmonie avec les interactions d'ambiance du concepteur (architecte ou urbaniste). Il représente une anticipation éclairée des propriétés d'ambiance d'un environnement construit qui n'a pas encore été réalisé.

II.4. La notion de l'ambiance thermique

La notion de l'ambiance thermique est complexe et repose sur le principe de neutralité thermique, selon lequel l'être humain cherche à éviter de ressentir une sensation de chaleur ou de froid excessif. Elle est essentielle pour l'utilisation des espaces intérieurs et extérieurs, car elle affecte la santé, la sécurité et le confort des usagers.

L'ambiance thermique dépend de plusieurs facteurs physiques tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air, les précipitations, la présence de la lumière et le rayonnement solaire.

Pour évaluer l'ambiance thermique, on peut utiliser des indices de confort thermique, qui décrivent la situation d'un individu dans une ambiance donnée en considérant tous ces facteurs.

Quelle que soit l'ambiance thermique à laquelle un individu est confronté, la température corporelle humaine doit être maintenue à environ 37°C en tant qu'être homéotherme, soit par des mécanismes physiologiques involontaires, soit par le biais de variations dans la tenue vestimentaire et l'activité physique.

II.4.1. Les différents types d'ambiance thermique

On distingue trois types d'ambiance thermique qui reflètent l'état thermique d'un individu dans les espaces extérieurs :

II.4.1.1. Ambiance thermique froide : L'ambiance thermique est froide quand les flux convectifs et radiatifs provoquent une perte de chaleur supérieure au métabolisme énergétique.

II.4.1.2. Ambiance thermique neutre : On peut qualifier l'ambiance thermique de neutre lorsque l'évacuation de la chaleur corporelle est entièrement assurée par les flux convectifs et radiatifs résultants de l'environnement.

II.4.1.3. Ambiance thermique chaude : Quand il fait trop chaud, le corps humain produit plus de chaleur qu'il n'en perd par la convection et le rayonnement. Cela crée un déséquilibre thermique. Pour y remédier, l'organisme déclenche des mécanismes physiologiques, comme la sudation, qui favorisent le refroidissement.

II.5. La notion de confort thermique

Depuis les années 1930, le concept de confort thermique intérieur a été largement abordé (Taleghani et al., 2013). Toutefois, ces dernières années, face aux effets du changement climatique qui sont devenus une réalité, une attention considérable a été accordée au concept du confort thermique dans les espaces extérieurs. Il est désormais perçu comme un enjeu majeur pour les concepteurs de la ville (Bourbia et Awbi, 2004 ; Ali Toudert et Mayer, 2006 ; Ali Toudert et Mayer, 2007 ; Honjo, 2009 ; Lee et al., 2016).

Il est essentiel de souligner que l'objectif primordial de toute conception urbaine et architecturale est de créer des espaces suffisamment confortables dans des conditions thermiques agressives (ambiance thermique trop froide ou trop chaude).

Selon les normes internationales d'ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers INC, Wessel (2001) et ISO7730 (1994), le confort thermique est la condition de bien-être psychophysique d'une personne, exprimant sa satisfaction de l'environnement thermique.

Selon Fanger (1970), le confort thermique représente « l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique ». Cependant, Givoni (1976) le définit comme l'absence d'irritation et d'inconfort causés par la chaleur ou le froid, ainsi que comme un état qui nécessite l'agrément.

Le confort thermique est subjectif, propre à chaque individu, décrivant l'état physique du corps ainsi que l'état d'esprit de l'individu, comme le définit Moser (2009) : « Le confort est intrinsèquement lié aux émotions, à la perception individuelle, à l'état d'esprit et au contexte particulier. Cette notion englobe à la fois une dimension négative, caractérisée par l'absence d'inconfort, défini par exemple par le manque de douleur, d'anxiété, et une dimension positive associée au bien-être et à la satisfaction ». Elle n'est donc pas ressentie de la même manière en fonction de plusieurs paramètres d'ordre personnel (types de vêtements, l'âge, le poids, le genre, type d'activité, l'état de santé, etc.).

Bien que ce soit une notion subjective, elle peut être quantifiée par des indices d'évaluation thermiques (Nikolopoulou et al., 2001 ; Nikolopoulou et Steemers, 2003). Les paramètres influençant le confort thermique extérieur sont presque semblables à ceux rencontrés à l'intérieur, mais avec plus de variabilité bioclimatique. Bien évidemment, l'espace urbain se distingue par l'interaction complexe de nombreux paramètres climatiques (la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air), ainsi que par les paramètres relatifs à l'individu (la vêtue et l'activité du corps humain).

Ces paramètres climatiques constituent les six principaux composants des transferts thermiques entre l'être humain et son entourage (Moudjalled, 2007). Cependant, la perception thermique d'un environnement ne peut être appréhendée qu'à travers les variables susmentionnées, tout en étant également influencée par des facteurs physiologiques, psychologiques et sociologiques tels que l'acclimatation, les comportements, les habitudes et les attentes des individus dans leur cadre de vie. En effet, l'appréciation du confort thermique est une sensation subjective qui varie selon les cultures et même au sein d'une même société, selon les individus (Abboud Abou Djaoude, 2020).



Figure II. 1 : Les différents paramètres influençant sur le confort thermique en générale.
(Source : Energie plus, 2019)

II.5.1. Paramètres influençant le confort thermique

Le concept du confort thermique ne possède pas de définition universelle, mais plusieurs significations lui sont attribuées. Le jugement de ce concept reste complexe, étant donné qu'il représente des sensations thermiques influencées par un système de paramètres environnementaux et des paramètres personnels, notamment des paramètres quantitatifs dits objectifs, et des paramètres qualitatifs dits subjectifs.

Le présent travail se concentre sur les répercussions de la morphologie urbaine sur les paramètres climatiques qui sont essentiels dans la quantification du confort thermique extérieur. Toutefois, des paramètres supplémentaires doivent également être pris en compte, car c'est leur interaction qui influence le ressenti des individus.

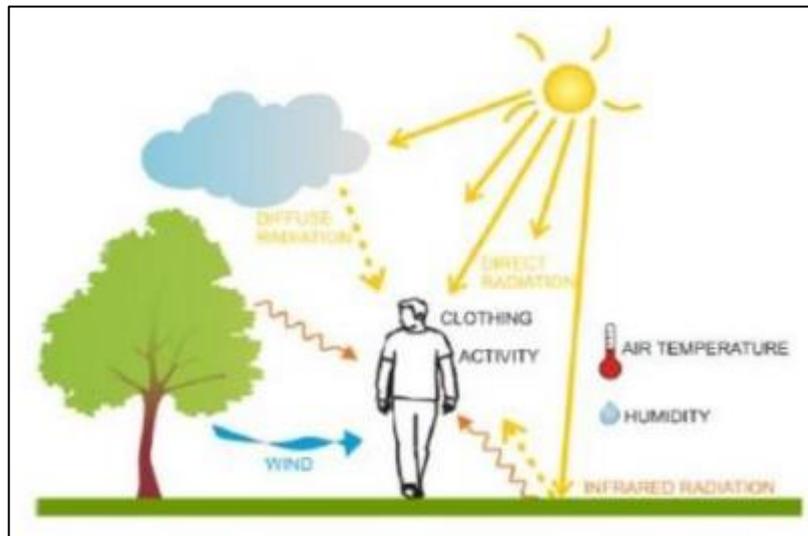


Figure II. 2 : Les paramètres affectant le confort thermique extérieur. (Source : Redha et al., 2018)

II.5.2. Les paramètres objectifs relatifs à l'environnement

Les paramètres climatiques les plus cruciaux en climatologie influant sur le confort thermique, selon plusieurs chercheurs (Krüger et al., 2013 ; Johansson et al., 2014 ; Middel et al., 2016 ; Crank et al., 2020) sont : la température moyenne radiante (TMR °C), la température de l'air (T_a °C), l'humidité relative (HR %) et la vitesse de l'air (V_a m/s)

II.5.2.1. Le confort et la température moyenne radiante (TMR °C) : Un des facteurs les plus importants qui affectent le confort thermique humain en extérieur est la température radiante (Lindberg et al., 2008), principalement en conditions ensoleillées et chaudes (Mayer et Höppe, 1987). La température moyenne radiante représente une température radiative qui résulte de la somme des flux de rayonnement (de courte et de grande longueur d'onde) auxquels le corps humain est exposé, influençant son bilan énergétique et impactant ainsi la sensation thermique en milieu urbain.

Dans l'environnement extérieur, la TMR est une variable physique complexe et difficile à déterminer, car le corps humain reçoit un rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi, et échange un rayonnement thermique (ondes longues) avec diverses sources (le ciel, les surfaces urbaines et les objets tels que les arbres) (Yahia et Johanson, 2012 ; Grosdemouge, 2020).

Cependant, on ne peut négliger de considérer l'existence de plusieurs méthodes pour mesurer et modéliser la température moyenne radiante en extérieur. L'une de ces méthodes consiste à estimer cette température en se basant sur la température mesurée à l'aide d'un thermomètre à globe noir ou à globe gris (T_g : température du globe), conjointement avec la

vitesse et la température de l'air (nécessaires pour prendre en compte l'échange de chaleur par convection).

La formule B expliquée par (Thorsson et al., 2007) :

$$T_{mrt} = [(T_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V^{0.6} \times (T_g - T_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

- **T_g** : Représente la température à globe noir (°C).
- **T_a** : Représente la température de l'air (°C).
- **V_a** : Représente la vitesse de l'air (m/s).

On trouve également la formule de Belding :

$$TMR = T_g + 0.24 \times V^{0.5} (T_g - T_a)^{37} \quad (\text{II. 2})$$

Certains logiciels développés peuvent également modéliser la température moyenne radiante, tels que le logiciel ENVI-met (Bruse, 2009) et le logiciel Rayman (Matzarakis, 2000 ; Matzarakis et al., 2007 ; Matzarakis, 2010). Ces logiciels permettent de simuler la TMR et les indices thermiques en milieu urbain (Thorsson et al., 2007 ; Johansson et al., 2014).

II.5.2.2. Le confort et la température de l'air (T_a °C) : Étant donné que la température de l'air reflète les transferts thermiques entre l'homme et son environnement, elle est un indicateur essentiel lié à la reconnaissance du bien-être thermique. Cependant, pour assurer le bien-être humain, la température de l'air ambiant est recommandée d'être équilibrée avec la température corporelle humaine, qui est généralement maintenue à 37°C. Ainsi, la température de l'air seule ne constitue pas une mesure adéquate pour évaluer la sensation de confort thermique, à moins d'être reliée à d'autres paramètres tels que la vitesse de l'air et l'humidité relative. En réalité, la sensation de chaleur peut être modifiée par la température ambiante, surtout en présence d'une humidité élevée et d'une faible vitesse de l'air. Dans de telles conditions, la sensation d'humidité de la peau s'élève avec l'élévation de la température ambiante. En revanche, lorsque l'humidité est basse et la vitesse de l'air est élevée, la peau conserve sa sensation de sécheresse même à des températures élevées.

La température ambiante est généralement mesurée au moyen d'un thermomètre doté de bulbe sec (pour éviter le rayonnement, le thermomètre doit être aplati), et l'intervalle de confort se situe habituellement entre 18°C et 25°C. Enfin, il convient de souligner que les environnements climatiques chauds arides et semi-arides se caractérisent généralement par des températures de l'air élevées associées à un faible taux d'humidité.

II.5.2.3. Le confort et l'humidité relative de l'air (HR %): L'humidité relative, en tant que grandeur physique, exprime le pourcentage du rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans un volume d'air donné et la quantité maximale que cet air pourrait contenir à une température et une pression spécifiques. Cette grandeur varie de 0 à 100%, et l'air peut être qualifié de sec si son humidité relative est en dessous de 35%, de moyennement humide s'il se situe entre 35 et 65%, et humide s'il est supérieur à 65%. La valeur de l'humidité relative est influencée par les changements de température : elle augmente si la température diminue et diminue si elle augmente.

Dans le contexte du confort thermique, il est crucial de souligner que notre corps transpire et rejette une quantité importante d'eau, qui peut être absorbée par l'air environnant lorsque la température de l'air est élevée et que l'humidité relative est très faible, rendant l'air chaud mais sec. Par contre, lorsque l'air est chaud et humide, l'excès d'eau émis par notre corps est moins facilement absorbé, ce qui peut provoquer une sensation d'inconfort importante (Boussoulim, 2002). Dans ces conditions, la sueur produite par notre corps a plus de difficultés à s'évaporer, provoquant une sensation désagréable de chaleur et d'humidité.

D'après la même auteure Boussoulim (2002), les météorologues canadiens ont introduit l'indice « humidex », également appelé degré de confort, dans le but d'expliquer la réaction moyenne des individus face à des conditions chaudes et humides. Cet indice prend en considération à la fois la température ambiante et l'humidité de l'air (voir le tableau II.1).

Tableau II. 1 : La température perçue (Index humidex) et le degré d'inconfort perçu en relation à la température de l'air et aux taux d'humidité, (Source : Boussoulim, 2002)

Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)																				
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100				
21					21	22	23	24	24	25	26	26	27	28	28	29					
22					22	23	24	25	25	26	27	27	28	29	29	30	31				
23					23	24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	33				
24					24	25	26	27	28	28	29	30	31	32	33	33	34	35			
25					25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	35	36	37			
26					26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	36	37	38	39		
27					27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		
28					28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	42	43	44		
29					29	30	31	32	33	35	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46	
30					30	31	32	34	35	36	37	39	40	41	42	43	45	46	47	48	
31					31	33	34	35	37	38	39	40	42	43	44	46	47	48	49	50	
32					33	34	35	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49	50	51	53	
33					33	34	36	37	38	40	41	43	44	46	47	48	50	51	52	54	55
34					34	35	37	39	40	42	43	45	46	47	49	50	52	53	55	56	58
35					35	37	39	40	42	43	45	46	48	49	51	53	54	56	57	58	
36					37	38	40	42	43	45	47	48	50	51	53	55	56	58	59		
37					38	40	42	43	45	47	49	50	52	54	55	57	58				
38					40	42	43	45	47	49	50	52	54	56	57	59					
39					41	43	45	47	49	51	52	54	56	58	59						
40					43	45	47	49	51	52	54	56	58								
41					45	47	48	50	52	54	56	58									
42					46	48	50	52	54	56	58										
43					48	50	52	54	56	58											
Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)																				
20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100					

Température apparente (Index humidex, °C)	Degré d'inconfort
Au-dessous de 29°	Peu de gens sont incommodés.
30° à 34°	Sensation de malaise plus ou moins grande.
35° à 39°	Sensation de malaise assez grande. Prudence. Ralentir certaines activités en plein air.
40° à 45°	Sensation de malaise généralisée. Danger. Eviter les efforts.
46° à 53°	Danger extrême. Arrêt de travail dans de nombreux domaines.
Au-dessus de 54°	Coup de chaleur imminent (danger de mort).

II.5.2.4. Le confort et la vitesse du vent (m/s) : Le vent présente un facteur prépondérant pour l'évaluation du confort et du microclimat au sein d'un environnement. Il peut avoir un effet bénéfique de ventilation en période estivale ou un effet nuisible de perturbation en période hivernale (Bouketta et Bouchahm, 2012). Les effets du vent sur le confort des individus se manifestent sous forme distincte : l'effet thermique et l'effet mécanique.

L'effet thermique résulte de l'interaction du vent avec les conditions de température, d'humidité et de rayonnement solaire (Szöcs, 2005), modifiant ainsi la production de sueur en affectant l'échange de chaleur convectif du corps humain et la capacité d'évaporation de l'air (Givoni, 1978). L'effet mécanique, quant à lui, correspond à l'action directe de la force du vent sur les personnes et les objets.

Les effets du vent sont mesurés et évalués par l'échelle de Beaufort (Szöcs, 2005), couramment utilisée pour décrire la perception du confort dynamique en milieu urbain. Cette échelle permet d'évaluer les effets de la vitesse en fonction de la turbulence et des sensations perçues par les individus dans le cadre de leurs activités (Voir le tableau II.2).

Tableau II. 2 : Echelle Beaufort. (Source : Szöcs, 2005)

Vitesse du vent en m/s		Caractéristiques du vent
Force	z=2m	
2	de 1.5 à 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	de 3 à 4.5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
4	de 4.5 à 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	de 7 à 9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	de 9 à 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	de 11 à 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14-17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pedestre très difficile et dangereuse.
9	17-20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Le vent est caractérisé par deux paramètres qui présentent sa direction et sa vitesse, dont la vitesse quantifie l'amplitude du déplacement linéaire de l'air (Boussoualim, 2002).

Lorsque le vent souffle autour des bâtiments et des espaces urbains, sa vitesse et sa direction changent. Chaque direction du vent crée ses propres zones où le vent ralentit ou accélère. Cependant, le vent est une valeur instable, qui change d'un point à un autre, et varie également dans le temps.

En milieu urbain, le comportement du vent au niveau du sol est fortement corrélé à la forme des constructions. Les constructions à une certaine hauteur peuvent créer des mouvements tourbillonnaires au niveau du sol, qui impactent significativement le confort des piétons, allant jusqu'au renversement des usagers. Plus la vitesse du vent s'élève, plus le vent se manifeste comme une source de nuisance et d'inconfort.

Dans la cité de Londres, pour assurer le confort des usagers dans les espaces extérieurs, il est essentiel d'anticiper et de prémunir les effets indésirables du vent. Cela se fait en accompagnant la conception des différents aménagements et des immeubles hauts par des modélisations numériques aérauliques. Ces modélisations permettent de travailler itérativement sur les formes urbaines et de concevoir des environnements bâtis en cohérence avec les usages projetés des espaces publics (vizea.fr ; Perrine Rivoal, 2019).

Dans son guide de bonne pratique (figure II.3), la cité de Londres indique les valeurs à ne pas dépasser au sein de la cité pour les concepteurs de toute construction de 25 à 50 mètres.

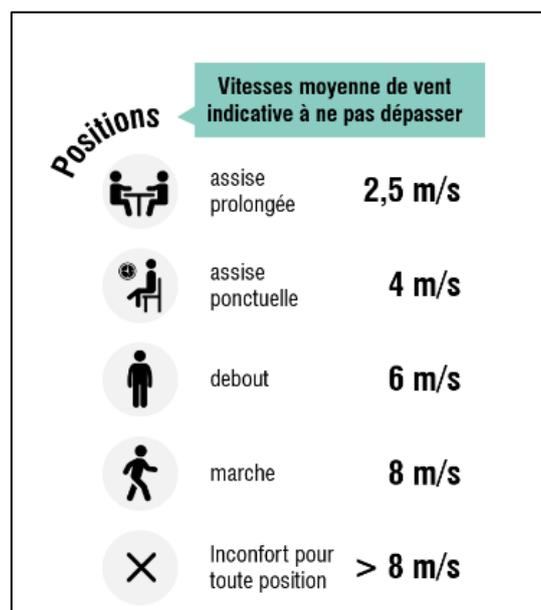


Figure II. 3 : La vitesse du vent moyenne indicative selon les différents usages des espaces pour la ville de Londres. (Source : vizea.fr)

II.5.3. Les paramètres subjectifs relatifs à l'individu

II.5.3.1. Le métabolisme et l'activité physique : L'énergie thermique produite par le corps humain est représentée par le métabolisme (M). Il assure la production de chaleur nécessaire aux processus vitaux pour maintenir la température corporelle à environ 36,7°C. Le métabolisme dépend de la physiologie de l'individu (poids, taille, âge, sexe), de son niveau d'activité et de l'ingestion de nourriture. La puissance thermique générée par le corps en fonction de son activité s'exprime en MET, où 1 MET équivaut à 58 W/m² de surface corporelle, relatif à celui d'un individu "standard" au repos en position assise (le sommeil requiert 0,7 MET tandis que jouer au basket requiert 5 à 8 MET). La surface corporelle (ADU) d'une personne se calcule à partir de son poids (P) et de sa taille (H) selon la formule suivante :

$$ADU = 0,203 \times P^{0,425} \times H^{0,725} \text{ (Lavoye et Thellier, 2008).}$$

Le tableau (II.3) illustre la production de l'énergie métabolique selon l'activité AFNOR, ISO 7730 (2005).

Tableau II. 3 : Production d'énergie métabolique pour différents types d'activités. (Source : AFNOR, ISO 7730, 2005)

Activité	Métabolisme énergétique	
	W/m ²	met
Repos, couché	46	0.8
Repos, assis	58	1
Activité sédentaire (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1.2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1.6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager, travail sur machine)	116	2
Marche à plat :		
2 Km/h	110	1.9
3 Km/h	140	2.4
4 Km/h	165	2.8
5 Km/h	200	3.4

II.5.3.2. La vêtue (habillement) : Les vêtements limitent les échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement en agissant comme une résistance thermique. L'unité de mesure de cette résistance est le clo, où 1 clo équivaut à 0,155 W/m²·K, correspondant à une isolation vestimentaire typique des tenues hivernales « classiques ». À l'inverse, une tenue estivale légère composée de short, tee-shirt, sous-vêtements, chaussettes et chaussures représente une résistance thermique d'environ 0,33 clo. Entre ces deux extrêmes, une tenue de mi-saison comprenant un pantalon léger, une chemise à manches longues, une veste légère, des sous-vêtements, des chaussettes et des chaussures atteint une isolation thermique de 1 clo. Ces

exemples illustrent l'échelle d'isolation thermique fournie par différents types de vêtements (Lavoye et Thellier, 2008). L'isolement thermique du vêtement (I_{cl}) est estimé directement à partir des données présentées dans le tableau (II.4) (AFNOR, ISO 7730, 2005) :

Tableau II. 4 : Isolement thermique de combinaisons vestimentaires types. (Source : AFNOR, ISO 7730, 2005)

Vêtements de travail	I_{cl}		Vêtements d'usage courant	I_{cl}	
	clo	m ² K/W		clo	m ² K/W
Caleçon, combinaison, chaussettes, chaussures	0.7	0.11	Slip, T-shirt, shorts, chaussettes fines, sandales	0.3	0.05
Caleçon, chemise, combinaison, chaussettes, chaussures	0.8	0.125	Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures	0.5	0.08
Caleçon, chemise, pantalon, blouse, chaussettes, chaussures	0.9	0.14	Slip, jupon, bas, robe, chaussures	0.7	0.105
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1	1.55	Sous-vêtements, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures	0.7	0.110
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste isolante, chaussettes, chaussures	1.2	0.185	Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1	0.155
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures, casquette, gants	1.4	0.22	Slip, bas, corsage, jupe longue, veste, chaussures	1	0.17
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures	2	0.31	Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot col en V, veste, chaussettes, chaussures	1.3	0.2
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste et pantalon isolant, Parka ouatinée, salopette ouatinée, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2.55	0.395	Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, manteau, chaussettes, chaussures	1.5	0.23

II.5.4. Les échanges thermiques avec l'ambiance : L'équilibre thermique du corps humain est maintenu par l'ensemble des transferts de chaleur entre le corps et l'environnement, permettant de stabiliser la température interne autour de 37°C. Ces échanges thermiques débutent par la production de chaleur métabolique en milieu intrinsèque du corps, suivie de sa transmission à la surface cutanée (la peau) (Moudjalled, 2007). Le bilan thermique cutané résulte ainsi d'un équilibre dynamique entre la chaleur produite et dissipée. La peau constitue un élément essentiel dans la sensation de chaleur/froid, suscitant de nombreuses études sur la relation entre la peau humaine et l'environnement.

Le corps se réchauffe si sa production de chaleur est supérieure à la chaleur perdue dans l'environnement, augmentant ainsi sa température interne. En revanche, si la chaleur produite dans le corps est inférieure à celle perdue dans l'environnement, le corps se refroidit, réduisant ainsi sa température interne (Moudjalled, 2007).

Les quatre modes par lesquels la chaleur se propage sont la convection, le rayonnement, la conduction (échanges de chaleur sensible) et l'évaporation (échanges de chaleur latente). Il est crucial de souligner que d'autres méthodes de transfert de chaleur entre le corps humain et l'environnement existent, telles que les échanges respiratoires, qui résultent d'une combinaison de convection et d'évaporation (Grignon-Massé, 2010 ; Djongyang et al., 2010).

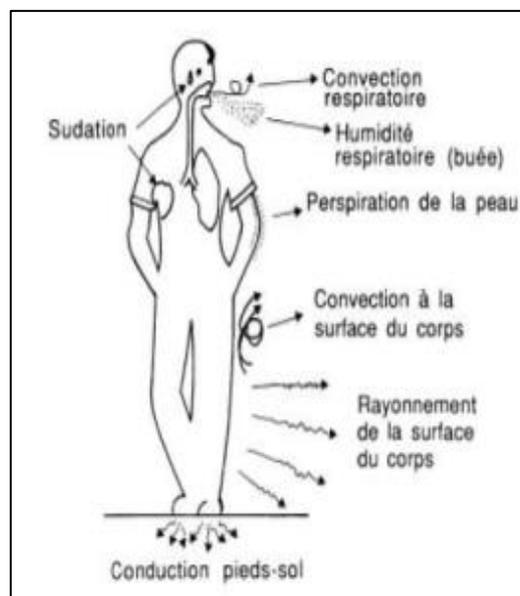


Figure II. 4 : Les différents types d'échanges thermiques entre le corps humain et l'environnement. (Source : Depecker et al., 1989)

II.5.4.1. La conduction : C'est le phénomène de transmission de chaleur entre la peau et les éléments solides avec lesquels elle est en contact. Cette interaction est souvent négligeable lorsque le corps humain échange de la chaleur par conduction, alors que les surfaces des zones corporelles en contact sont de petite taille. Par contre, lorsque des surfaces corporelles plus étendues entrent en contact avec des éléments de mobilier tels que des chaises ou des lits, les tissus en contact atteignent rapidement l'équilibre thermique et agissent tels un isolant thermique par rapport à l'ambiance (Moudjalled, 2007 ; Grignon-Massé, 2010).

II.5.4.2. La convection : Le corps réalise des échanges de chaleur avec l'air ambiant, se refroidissant grâce au mouvement de l'air qui se réchauffe au contact du corps lorsque ce dernier est plus froid que la surface cutanée. L'air expiré, réchauffé par l'organisme, devient plus léger

que l'air ambiant plus froid, il monte alors vers le haut et forme un panache au-dessus de la tête avant de se dissiper dans l'environnement. L'équation suivante (ASHRAE, 1997) est utilisée pour calculer l'ampleur de ce phénomène, directement liée à la différence de température entre le corps et l'air ambiant, ainsi qu'aux vitesses de l'air autour du corps :

$$C = fcl \cdot hc \cdot (tcl - ta) \quad (II. 3)$$

Avec :

- **C** = Le flux de chaleur convectif (W/m²)
- **fcl** = Le facteur d'habillement
- **hc** = Le coefficient d'échange convectif (W/m².K)
- **tcl** = La température de la surface externe du vêtement (°C)
- **ta** = La température d'air (°C)

La vitesse relative de l'air par rapport au corps dépend des activités du sujet, comme la marche ou la course, qui modifient le mouvement de l'air. Ce dernier peut être naturel, sous forme de courant d'air, ou forcé, créé par un ventilateur. Lorsque l'air est réchauffé plus que la température cutanée, la convection provoque un réchauffement du corps. Ce phénomène peut être considérablement modifié par les vêtements, qui peuvent réduire, voire empêcher, le phénomène de convection (Moudjalled, 2007 ; Grignon-Massé, 2010).

II.5.4.3. Le rayonnement : C'est un concept clé pour comprendre le confort thermique. Il désigne les échanges radiatifs qui sont le mode d'émission ou de propagation d'énergie entre deux corps sous forme d'ondes électromagnétiques. Ces échanges radiatifs se font de deux façons selon la bande d'émission :

➤ **Les échanges de courtes longueurs d'ondes ou rayonnement solaire**

L'énergie radiative échangée par un corps dépend de son émissivité et de sa température de surface (température de la surface externe du vêtement chez l'homme). Si le rayonnement émis par l'homme est supérieur au rayonnement reçu, le corps se refroidit ; dans le cas inverse, il se réchauffe.

➤ **Les échanges de grandes longueurs d'ondes ou rayonnement infrarouge**

L'échange radiatif constitue un mode d'échange de chaleur à distance par le biais d'ondes électromagnétiques entre deux corps. Le rayonnement infrarouge, caractérisé par de grandes longueurs d'onde, s'effectue entre le corps et les parois environnantes, tandis que le rayonnement solaire, caractérisé par des longueurs d'onde plus courtes, n'est généralement pas pris en compte dans le contexte des bâtiments. Toutes les surfaces émettent un rayonnement

infrarouge, dont la puissance est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface, ainsi qu'à la température ambiante (300 K). Le corps humain, ainsi que les surfaces qui l'entourent, émettent une chaleur radiative en permanence. La différence entre les émissions du rayonnement par un corps et celui reçu de son environnement détermine le flux radiatif net échangé (Thellier, 1989). Si le rayonnement absorbé par le corps est supérieur à celui émis, le corps se réchauffe, et inversement, il se refroidit dans le cas contraire. Le calcul du flux radiatif utilise la température moyenne de rayonnement, à condition que l'environnement thermique soit homogène. La température radiante est la moyenne pondérée des températures de surface des parois du lieu en fonction de leur émissivité et de leur position par rapport au corps. Étant donné que les écarts de température sont faibles, l'équation du flux radiatif est également établie par une approximation linéaire.

II.5.4.4. L'évaporation : Le flux de température latente correspond à la transmission de chaleur dans la surface de la peau à la suite de l'évaporation de l'eau. Il s'agit du mécanisme le plus efficace pour le corps humain pour évacuer la sueur émise par la transpiration cutanée (sueur) dans les ambiances chaudes (Moudjalled, 2007). Cette variation d'état physique de l'eau en vapeur permet d'absorber une grande quantité de chaleur. La quantité d'eau perdue par sudation est régulée par le système de thermorégulation pour maintenir l'équilibre thermique du corps. Ce mécanisme d'évaporation de la sueur dépend principalement de la pression de vapeur dans l'air et de la vitesse de l'air (Lavoye et Thellier, 2008).

II.6.4.5. La respiration : Lors de la respiration, le corps transfère de la chaleur à la fois via une voie sensible par convection et via une voie latente par évaporation de l'eau (Moudjalled, 2007). Il y a donc à la fois transfert de chaleur et transfert de masse. L'évaporation cutanée représente environ 22 % des pertes thermiques totales du corps humain.

II.6. L'évaluation du confort thermique en milieu urbain

La création d'un environnement bâti extérieur durable et confortable constitue l'une des préoccupations centrales de l'urbanisme. De nos jours, le confort thermique extérieur dans les espaces publics tels que les rues piétonnes, les places et les jardins, constitue un objectif primordial de l'urbanisme durable. Avec l'expansion des villes et l'augmentation de leur population, de nombreuses questions liées au développement durable s'étendent à l'environnement urbain. Par conséquent, la recherche sur le microclimat urbain et le confort

thermique extérieur revêt une importance croissante. Ceci s'explique par la grande complexité de l'environnement extérieur en termes de variabilité spatio-temporelle, ainsi que par la diversité des activités auxquelles les individus s'adonnent dans les espaces publics (Nikolopoulou et al., 2001). L'évaluation du confort climatique doit prendre en compte divers aspects : physiques, physiologiques et psychologiques.

Dans le milieu urbain extérieur, les individus sont implicitement exposés aux facteurs microclimatiques locaux de rayonnement solaire, d'ombrage, ainsi qu'aux changements de direction et de vitesse du vent (Chen et Ng, 2012). Les gens effectuent diverses activités, et chaque personne a une histoire thermique différente, une mémoire et des attentes différentes (Nikolopoulou et al., 2001). L'évaluation du confort thermique dans les espaces extérieurs représente une méthode essentielle pour examiner le microclimat urbain et établir des directives favorables au développement urbain durable.

La température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent ne suffisent pas à elles seules pour exprimer le taux de confort thermique ressenti par un individu. Pour se rapprocher au mieux du ressenti d'un passant ou d'un usager, on peut utiliser des indices thermiques évaluant le bilan énergétique d'un individu et des adaptations thermiques évaluant le comportement des usagers. Son évaluation se divise en deux grandes approches :

II.6.1. Approche qualitative (subjective)

La recherche montre que les paramètres microclimatiques et les perceptions individuelles des environnements thermiques influencent fortement l'utilisation des espaces extérieurs. De plus, le nombre d'utilisateurs et la durée d'utilisation d'un espace sont susceptibles d'augmenter s'il est bien entretenu et thermiquement confortable (Nikolopoulou et al., 2001 ; Thorsson et al., 2007 ; Johansson et Emmanuel, 2006 ; Eliasson et al., 2007).

Cependant, les modèles de confort thermique constituent des outils précieux pour l'évaluation des conditions thermiques en extérieur. Ces modèles sont basés sur les équilibres énergétiques entre le corps humain et son environnement. En effet, ces modèles présentent des limites, car ils ne prennent pas en compte les évaluations subjectives des conditions thermiques, telles que les facteurs psychologiques qui incluent l'attente et le contrôle perçu, l'historique thermique, la durée d'exposition, la stimulation environnementale et les influences culturelles (Knez et Thorsson, 2006 ; Nikolopoulou et Steemers, 2003 ; Thorsson et al., 2004 ; Kenny et al., 2009).

II.6.2. Approche quantitative (objective)

Une attention accrue pour les environnements extérieurs au début des années 2000 a conduit à l'utilisation opportune de méthodes et d'indices de confort thermique conçus pour l'intérieur. Cela semble avoir causé quelques problèmes, car l'environnement extérieur est bien plus complexe que l'environnement intérieur. Par exemple, les variables météorologiques varient fortement selon l'espace et le temps. Parmi les autres facteurs de difficulté, on peut mentionner le manque de maîtrise du climat dans les espaces extérieurs, l'adaptation physique et socioculturelle du sujet, ainsi que la grande diversité des usages en plein air.

II.7. Caractérisation du confort thermique à travers des aspects

La précision de la prédiction du confort thermique revêt une importance capitale pour l'amélioration du bien-être des usagers dans les espaces urbains extérieurs. Elle influence également leur santé et leur fréquentation des espaces urbains. Cette précision dépend à la fois du bilan thermique du corps et des adaptations thermiques (Zhang et Li, 2020).

Les adaptations thermiques sont classées selon plusieurs aspects développés pour analyser et comprendre la complexité du confort thermique. Selon Höppe (2002), le confort thermique dépend de trois catégories d'adaptations : les adaptations physiques relatives au microclimat et à l'environnement, les adaptations thermo-physiologiques relatives à la thermorégulation, englobant l'équilibre thermique du corps humain (le bilan thermique), ainsi que les adaptations socio-psychologiques reflétant le taux d'adaptation des utilisateurs aux conditions de l'environnement extérieur.

II.7.1. L'aspect physique

L'aspect physique repose sur la compréhension des mécanismes physiques régissant les transferts de chaleur entre le corps humain et son milieu extérieur. Il s'appuie sur des modèles mathématiques et des simulations numériques pour prédire les conditions environnementales optimales pour le bien-être des personnes dans les espaces urbains extérieurs.

On considère que les principaux paramètres physiques dans cette approche sont la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent. Ces paramètres sont mesurés et estimés à partir des données météorologiques. L'aspect physique du confort thermique extérieur prend également en compte les caractéristiques physiques des individus, telles que la surface corporelle, la circulation sanguine, la transpiration et la respiration, qui influent sur leur réponse thermique à l'environnement extérieur.

II.7.2. L'aspect physiologique

Cet aspect se focalise sur les réponses physiologiques du corps humain aux conditions thermiques dans l'environnement, en particulier sur la thermorégulation, qui est le processus de maintien de la température corporelle à un niveau stationnaire. Le corps humain est considéré comme un système thermique cherchant à conserver sa température interne à une valeur quasi constante autour de 37°C (homéothermie), quelles que soient les conditions et les variations de température extérieure (Musy, 2008).

Le corps humain dispose d'un système de thermorégulation dynamique, qui peut être considéré comme un système passif. Ce mécanisme de régulation de la température corporelle est réactif et peut intervenir de façon volontaire ou involontaire pour s'adapter, contrôler et réguler les échanges de chaleur avec l'environnement extérieur. L'objectif de ce processus est d'assurer un équilibre thermique optimal au niveau corporel, garantissant ainsi une sensation de confort thermique idéale. La sensation de confort résulte d'un équilibre entre la production de chaleur interne (thermogenèse) et les déperditions thermiques du corps (thermolyse). Cet équilibre dynamique permet d'assurer des performances biologiques, physiques et mentales optimales chez l'être humain.

II.7.3. L'aspect psychologique

Cet aspect prend en considération les facteurs psychologiques et comportementaux qui influent sur la sensation de confort thermique des personnes dans les espaces urbains extérieurs. Il s'intéresse aux perceptions, aux attitudes et aux comportements individuels face aux conditions environnementales extérieures. Reconnaissant que la sensation thermique ne dépend pas seulement des paramètres physiques de l'environnement extérieur, cette approche tient compte des préférences passées et des attentes culturelles. Par exemple, certaines personnes peuvent avoir des préférences pour des températures plus fraîches ou plus chaudes en fonction de leur culture, de leur âge ou de leur activité physique. Il souligne aussi l'importance des facteurs contextuels, tels que la perception de la sécurité, le niveau sonore, la qualité de l'air et la présence d'autres personnes, qui peuvent influencer sur la sensation de confort thermique.

Cet aspect met ainsi en évidence l'importance de la participation des usagers dans la conception des espaces urbains afin de comprendre leurs besoins et leurs préférences en matière de confort thermique. Il montre également la nécessité de fournir des informations claires sur les conditions météorologiques pour aider les personnes à s'adapter aux variations thermiques.

II.8. Les indices du confort thermique en milieu urbain

Le confort thermique en milieu urbain peut être mesuré par des indices thermiques. Ces indices sont généralement subdivisés en trois catégories, selon la littérature et la classification établie par Coccolo et al. (2016), qui s'appuient sur les modèles existants de confort en milieu urbain et les équations qui les définissent. On peut distinguer trois grandes catégories d'indices : les indices rationnels ou simplement appelés indices thermiques, les indices empiriques statistiques et les indices fondés sur des équations mathématiques linéaires. L'applicabilité de ces modèles dépend du climat, classé par Köppen (polaire, froide, tempérée, aride et tropical). Il existe différents modèles de simulation pour modéliser le confort thermique extérieur, adaptés à chaque climat (Coccolo et al., 2016).

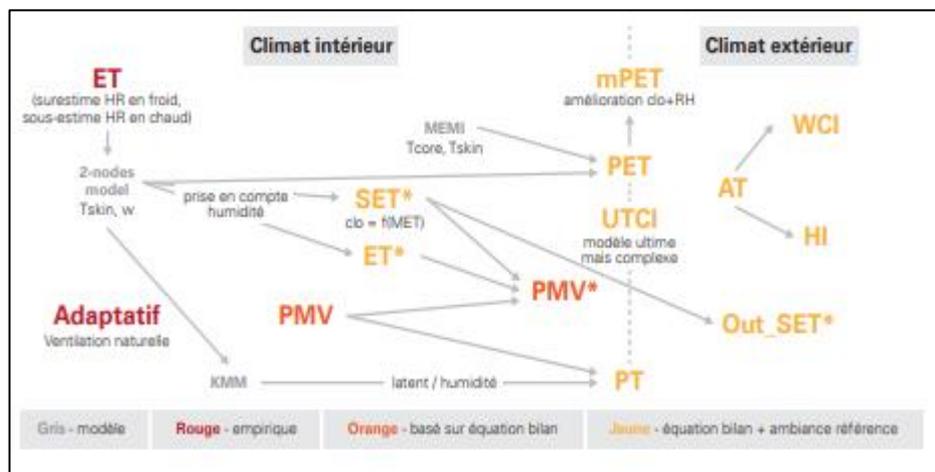


Figure II. 5 : Quelques indices de confort pour les ambiances intérieures et extérieures. (Source : WALTHER et GOESTCHEL, (sans date))

La sensation thermique d'un individu dépend principalement de l'équilibre thermique de son corps. Cet équilibre est influencé par son activité physique, sa tenue vestimentaire et les paramètres climatiques. Lorsque ces paramètres sont mesurés, la sensation thermique du corps humain peut être prédite en calculant des indices thermiques.

Les indices thermiques, également désignés sous le terme « indices rationnels », se fondent sur le bilan énergétique de l'organisme humain, englobant les différents échanges thermiques entre le corps humain et son environnement. Ils se présentent comme « une température d'air équivalente à un environnement de référence, où la réponse physiologique d'un individu de référence est similaire à celle observée dans des conditions extérieures spécifiques » (Blazejczyk et al., 2012).

Ces indices sont le résultat d'équations complexes qui tiennent compte de l'interrelation entre tous les paramètres environnementaux (température de l'air, température moyenne radiante, rayonnement solaire, humidité relative et vitesse du vent) et les paramètres individuels

(métabolisme et habillement) qui influent sur le confort thermique en extérieur. Parmi eux, on peut citer :

II.8.1. Le vote moyen prévisible « Predicted mean vote » (PMV)

Le Predicted Mean Vote (PMV) est sans aucun doute le modèle de confort thermique humain le plus répandu, en particulier pour les applications intérieures. Reposant sur l'équation de Fanger (Fanger, 1970), le PMV est déterminé par un ensemble de paramètres environnementaux déjà cités et individuels tels que l'activité métabolique et l'isolation vestimentaire, auxquels s'ajoutent deux paramètres physiologiques : la température moyenne de la peau et l'évacuation de la chaleur par transpiration. À l'origine conçu pour évaluer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, cet indice a également été appliqué pour mesurer le confort thermique en extérieur (Honjo, 2009).

Le PMV prédéfini est le vote moyen des sensations thermiques perçues par un groupe important de personnes, évaluée sur une échelle à sept points (de -3 = Très froid à +3 = Très chaud), où 0 indique une sensation neutre. En revanche, Michael Bruse, lors de l'actualisation de son programme de simulation « ENVI-met » pour l'adapter aux espaces extérieurs, a adopté une échelle de neuf degrés de confort thermique spécifique aux environnements extérieurs, où la plage théorique de confort thermique extérieur s'étend de -4 (Extrêmement froid) à +4 (Extrêmement chaud).

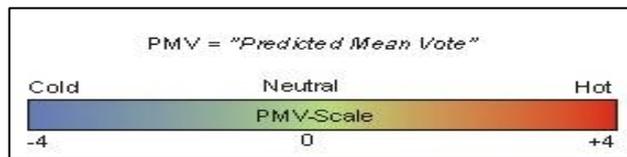


Figure II. 6 : L'échelle du PMV selon Michael Bruse. (Source : www.envi-met.info)

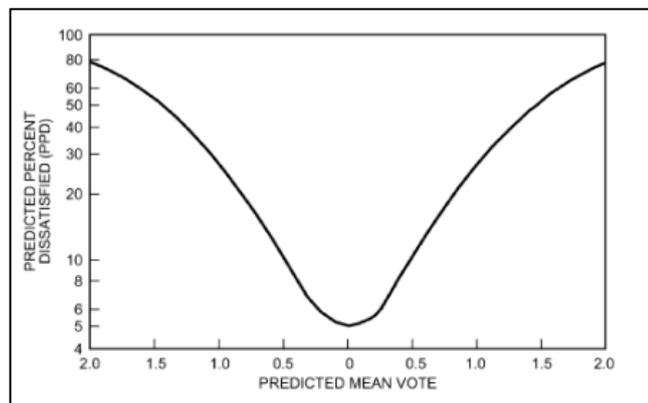
Tableau II. 5 : Les échelles de sensation thermique selon Fanger et Michael Bruse. (Source : Traité par l'auteur, 2020)

Les échelles du PMV	Les échelles de la sensation thermique selon Fanger	Les échelles de la sensation thermique selon Michael Bruse	Les niveaux de stress thermique
-4		Extrêmement froid	Stress thermique extrême
-3	Froid	Moyennement froid	Stress thermique très élevé
-2	Frais	Frais	Stress thermique élevé
-1	Légèrement frais	Légèrement frais	Stress thermique modéré
0	Confortable	Neutre	Pas de stress thermique
1	Légèrement chaud	Légèrement tiède	
2	Chaud	Tiède	
3	Très chaud	Moyennement chaud	
4		Extrêmement chaud	

Dans ce contexte, Fanger a proposé un autre modèle complémentaire au PMV pour caractériser le confort thermique. Il s'agit de l'indice de pourcentage d'insatisfaction prévue (PPD), directement lié à l'indice PMV, offrant ainsi une évaluation quantitative du nombre de personnes insatisfaites par rapport à une ambiance thermique. L'équation suivante est utilisée par Fanger (1982) pour relier ces deux indices :

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (II.4)$$

Cependant, comme le montre la variation du modèle PPD en fonction du PMV (graphique II.1), le PPD s'élève nettement lorsque le PMV s'éloigne de la valeur zéro. Près de 25 % des personnes ne seront pas satisfaites si le PMV est de -1 ou +1. Il convient également de noter que même avec un PMV nul, 4 % des personnes restent insatisfaites.



Graphique II. 1 : Les variations du PPD en fonction du PMV. (Source : ASHAE, 2009)

Le PMV et le PPD sont des modèles élaborés à l'origine par Fanger (1970) pour des situations intérieures stables. La norme ISO 7730 (Organisation internationale de normalisation, 2005) fournit une description du modèle en étendant les parties liées au flux d'énergie, au rayonnement solaire et aux ondes longues. Elle autorise également des vitesses de vent supérieures à celles d'une pièce intérieure, permettant ainsi l'application du PMV à des situations extérieures, bien que cela soit soumis à certaines limites.

Jendritzky (1990) a développé une version corrigée ou modifiée du PMV, appelée (PMV*), qui intègre les paramètres météorologiques dans son calcul en ajoutant le flux radiatif (Höppe, 1999 ; Baltazar, 2014).

Cet indice a servi de base pour des études en extérieur à partir du modèle nommé « Klima-Michel model » ou « KMM ». Michel, représentant un nom allemand typique, fait référence à un sujet de sexe masculin âgé de 35 ans, mesurant 1,75 mètre de taille, pesant 75 kg et marchant à une vitesse de 4 km/h.

Ce modèle utilise des données météorologiques en tant qu'entrées, prenant en compte à la fois les flux radiatifs de courte et de longue longueur d'onde, tout en déterminant un niveau d'isolation par le vêtement et un niveau d'activité défini comme « moyen » (Grosdemouge, 2020). Ce modèle est fondé sur l'équation suivante :

$$PMV = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028) S \quad (II.5)$$

Parmi les modèles bioclimatiques capables de calculer le PMV, on trouve le modèle RayMan, un exemple de modèle bioclimatique et de flux de rayonnement récemment développé pour calculer les flux radiatifs, comme décrit dans les travaux de Matzarakis et al. (2007) ; Matzarakis et al. (2010). Le modèle RayMan suit les directives de la société d'ingénierie allemande VDI (1998), guide 3787, pour calculer le flux de rayonnement dans des environnements simples et complexes. Il prend en compte plusieurs paramètres tels que la température de l'air, l'humidité de l'air, le degré de couverture nuageuse, l'heure du jour et l'albédo des surfaces environnantes (Gulyas et Matzarakis, 2009).

Les indices du PMV et du PPD présentent des limitations en conditions extrême cas de chaleur. Des études de terrain ont révélé que le modèle PMV ne parvient pas à prédire correctement le confort thermique dans les climats chauds.

II.8.2. La température physiologique équivalente « Physiologically Equivalent Temperature » (PET)

En 1999, un nouvel indicateur de confort thermique extérieur, appelé PET, a été introduit et développé par Höppe. Il est basé sur un modèle d'échange thermique pour estimer la température de confort physiologique. Cet indice est largement utilisé pour mesurer le confort thermique dans les espaces extérieurs à climat chaud et humide (Lin et Matzarakis, 2008 ; Cheng et al., 2012 ; Li et al., 2016). La PET est un indice d'estimation physiologique du confort thermique qui prend en compte plusieurs paramètres climatiques, notamment la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité relative et la vitesse du vent. Elle intègre des paramètres thermo-physiologiques tels que la résistance au transfert de chaleur de l'habillement et la production de chaleur interne liée à l'activité (Gulyas et Matzarakis, 2009).

Il est défini comme étant la température de l'air à laquelle, dans des conditions d'intérieur typiques :

- La température de l'air (T_{air} en °C) = la température moyenne radiante (T_{mrt} en °C)
- La vitesse du vent (V_v) = 0.1 (m/s).

- La pression de vapeur (p_v) = 12 h Pa (équivalente à une humidité relative = 50%, enregistrée à une ambiance thermique de la $T_{air} = 20$ (°C) (Höppe, 1999).
- Métabolisme (M) = 114W (activité légère, métabolisme du travail de 80W à ajouter au métabolisme de base).
- Résistance des vêtements (R_{clo}) est fixée à 0.9 clo. Le bilan énergétique du corps humain est équilibré lorsque la température du corps humain et de sa peau est identique, tout comme le taux de sudation calculé pour les conditions extérieures réelles (Höppe, 1999). Cela signifie qu'une personne dans une pièce à 43°C atteint le même état thermique que dans des conditions extérieures spécifiques.

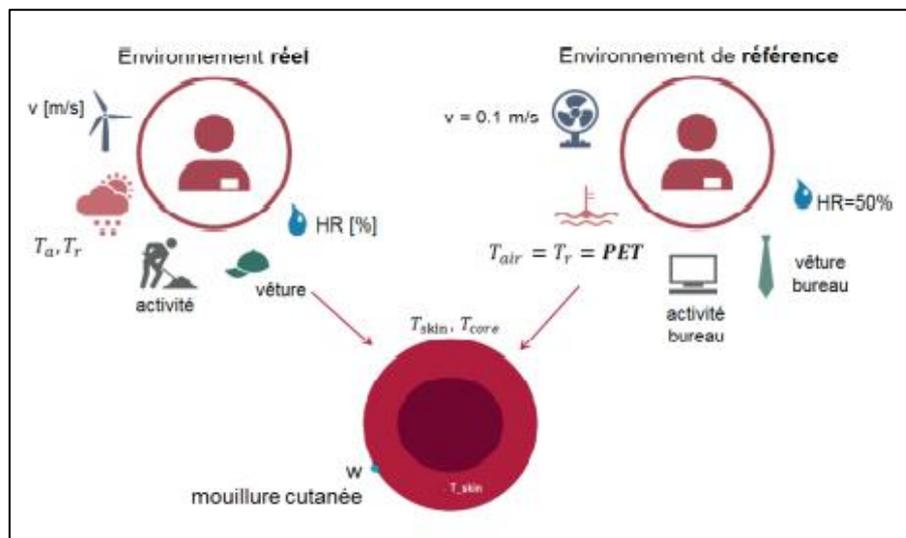


Figure II. 7 : Quelques indices de confort pour les ambiances intérieures et extérieures. (Source : WALTHER et GOESTCHEL, (sans date))

Il repose sur le modèle MEMI (Munich Energy-Balance Model for Individuals) (Höppe, 1999), qui désigne le principe d'équilibre thermique du corps humain :

$$M + W + R + C + ED + ER + ESW + Q_{stock} = 0 \quad (II.6)$$

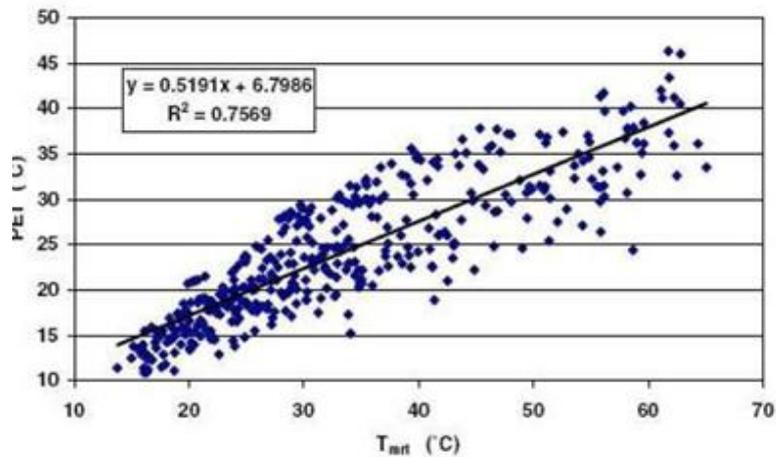
Avec :

- **M** : Représente le niveau d'activité métabolique,
- **W** : Représente le travail utile,
- **R** : Représente le rayonnement du corps humain,
- **C** : Représente le flux convectif,
- **ED** : Représente le flux de chaleur latent pour évaporer l'eau en vapeur d'eau se diffusant à travers la peau,
- **ER** : Représente la somme des flux de chaleur pour chauffer et humidifier l'air inspiré,
- **ESW** : Représente le flux de chaleur de l'évaporation de la sueur,

➤ **Qstock** : Représente les flux de chaleur stockés pour le réchauffement ou le refroidissement du corps.

Toutes les valeurs sont exprimées en Watts et présentent un signe négatif en cas de pertes. Pour une estimation précise, il est indispensable d'inclure les flux de rayonnement de grandes longueurs d'onde (infrarouge) ainsi que de courtes longueurs d'onde (solaire) dans le calcul de la PET, car le rayonnement solaire exerce la plus grande influence sur la température de l'air. L'indice PET se réfère aux conditions climatiques extérieures et présente une forte dépendance à l'égard de la température moyenne radiante (TMR). Sa quantification est directement liée à la valeur réelle de cette dernière, ce qui rend les estimations relatives, notamment durant les périodes de surchauffe. De plus, pour calculer la PET de manière précise, il est impératif de mesurer tous les paramètres météorologiques nécessaires pour l'équilibre énergétique du corps humain à une hauteur de 1,20 m, correspondant au centre de gravité d'un individu debout.

La PET est un indice thermique universel facilement compréhensible grâce à son unité de mesure qui est le degré Celsius (°C).



Graph II. 2 : Corrélation entre les valeurs de la PET et de la TMR. (Source : Matzarakis, 2006)

Les valeurs seuils de la PET ont été établies sur une échelle allant de <4 (extrêmement froid) à >41 (extrêmement chaud), offrant ainsi un indice gradué pour évaluer les différents niveaux de stress thermique (Sahabi–Abed et Kerrouche, 2017). Ces températures seuils sont étroitement liées à la perception sensorielle, comme l'a souligné Matzarakis (2006) (voir le tableau II.6) :

Tableau II. 6 : Classes de la perception thermique et le niveau du stress physiologique indiquées par la PET pour un individu moyen. (Source : SAHABI–ABED et KERROUCHE, 2017), (Réadapté par l’auteure)

Les valeurs du PET en (C°)	Les échelles de la sensation thermique	Les niveaux de stress physiologique
<4	Extrêmement froid	Stress extrême de froid
4 à 8	Moyennement froid	Fort stress de froid
8 à 13	Froid	Stress de froid modéré
13 à 18	Légèrement froid	Léger stress de froid
18 à 23	Confortable	Pas de stress thermique
23 à 29	Légèrement chaud	Léger stress de chaleur
29 à 35	Chaud	Stress de chaleur modéré
35 à 41	Moyennement chaud	Fort stress de chaleur
>41	Extrêmement chaud	Stress extrême de chaleur

Selon la littérature, la sensation neutre (zone de confort) du PET a été adaptée en fonction des différents climats (Coccolo et al., 2016) :

- En Europe centrale et occidentale, la zone neutre correspond à une plage s'étendant entre 18 et 23 °C (Matzarakis et Mayer, 1996).
- Dans le climat chaud et humide de Taïwan, la zone neutre est comprise entre 26 et 30 °C (Lin et Coll, 2010).
- Pour le climat côtier méditerranéen, une zone neutre est présente dans un intervalle de 20 à 25 °C (Cohen et Coll, 2013).

La PET a été testée à travers de nombreuses études dans divers cas de climats, et les résultats des simulations se sont révélés comparables à ceux obtenus à partir des données enregistrées sur site. Elle est même recommandée par le guide référentiel 3787 de la société d'ingénierie allemande VDI (1998). Le calcul de cet indice peut être effectué à l'aide de différents logiciels simulateurs tels que RayMan, Envi-Met, SOLWEIG, ou encore dans l'outil GrassHopper/LadyBug (Grosdemouge, 2020).

Cependant, la PET exprime une limite inhérente dans son calcul, qui repose sur l'utilisation des modèles de bilan énergétique stationnaires, en supposant une exposition prolongée des individus aux conditions climatiques extérieures (Bonhomme et al., 2015).

Une évolution de la PET est le mPET (PET modifié ou modified PET), qui optimise la capacité du modèle à réagir aux changements d'humidité relative et à l'isolation des vêtements (Chen et Matzarakis, 2014).

II.8.3. L'indice universel de climat thermique « Universal Thermal Climate Index » (UTCI)

L'UTCI (Indice Universel du Climat Thermique) représente un indice thermo-physiologique créé en 1999 principalement pour évaluer les ambiances thermiques dans les

espaces extérieurs. Il résulte du travail d'un groupe d'experts multidisciplinaires, regroupant plus de 45 scientifiques issus de 23 pays, spécialisés dans les domaines de la thermophysio-physiologie humaine, la modélisation mathématique, la médecine du travail, la météorologie et la climatologie (Jendritzky et al., 2012). L'Union européenne, via l'action COST 730 en collaboration avec la Société Internationale de Biométéorologie (ISB), a développé la version actuelle de l'UTCI en 2009. Ce modèle est particulièrement conçu pour l'évaluation physiologique de l'environnement thermique, visant à analyser les conditions thermiques extérieures dans les principaux domaines de la biométéorologie humaine (Bröde et al., 2012 ; Boko et al., 2013).

L'UTCI s'appuie initialement sur un modèle de régulation thermique avancé à multi-nœuds appelé « Fiala ». Après des tests de validation approfondis, des adaptations et des extensions, incluant l'intégration d'un modèle d'habillement adaptatif, ce modèle permet de prédire les évaluations de la sensation thermique dynamique en analysant l'environnement dans des conditions climatiques extérieures dominantes (Bröde et al., 2012 ; Fiala et al., 2012).

Cet indice est conçu pour être applicable sur toutes les plages de températures, dans tous les contextes climatiques, pendant toutes les saisons de l'année, et à toutes les échelles. L'UTCI est particulièrement utile pour des usages critiques en biométéorologie humaine telles que les prévisions quotidiennes, les alertes climatiques, la cartographie bioclimatique régionale et mondiale, les études épidémiologiques et la recherche sur l'impact climatique. Il présente l'avantage d'être indépendant des caractéristiques individuelles (âge, sexe, activités, vêtements spécifiques, etc.) (Walls et al., 2015).

L'UTCI correspond à un indice bioclimatique permettant d'évaluer la sensation thermique ressentie par un individu dans un environnement extérieur donné. Il se définit comme la température de l'air (T_{air}) de l'environnement de référence qui produirait la même réponse physiologique chez l'individu que l'environnement réel. Les paramètres microclimatiques suivants : les valeurs réelles de la température de l'air (T_{air}), de la température radiante moyenne (TMR), de la vitesse du vent (V_v) et de l'humidité (exprimée soit par la pression de vapeur d'eau (V_p) soit par l'humidité relative (RH)) déterminent l'écart entre les valeurs d'UTCI et la température d'air ambiante (T_{air}). En termes mathématiques, cela s'écrit comme suit :

$$UTCI (T_a, T_{mrt}, V, p_v) = T_a + \text{offset} (T_a, T_{mrt}, V, p_v) \quad (\text{II. 7})$$

Par conséquent, les variables non météorologiques telles que le taux métabolique (MET) et les propriétés thermiques des vêtements (isolation, résistance à la vapeur et perméabilité à l'air) revêtent une grande importance. La Commission (ISB) sur l'UTCI a défini en 2000 une

activité extérieure représentative comme étant celle d'une personne marchant à une vitesse de 4 km/h (1,1 m/s). Ainsi, le taux de production de chaleur métabolique a été supposé être de 2,3 MET (135 Wm⁻²) pour la personne de référence. Les variables climatiques d'entrée de l'environnement de référence ont été décidées comme suit (Havenith et Fiala, 2016) :

- Une température radiante moyenne (T_{mrt} °C) égale à la température de l'air (T_{air} °C),
- Une vitesse de vent météorologique (V_v) de 0,5 m/s à 10 m de hauteur (environ 0,3m/s à 1,1m),
- La pression de vapeur d'eau (V_p), qui représente l'humidité absolue, a été stagnée à une valeur qui correspond à une humidité relative de 50% dans les calculs de référence UTCI. Cependant, à des températures de l'air élevées (>29°C), l'humidité de référence a été considérée constante avec une pression de vapeur de 20hPa, car des valeurs plus élevées ne se produisent que rarement dans les environnements naturels.
- L'habillement ayant un fort impact sur les réponses physiologiques, un modèle d'habillement distinct a été développé pour l'UTCI, détaillant comment la température ambiante affecte le comportement vestimentaire des personnes. Les impacts du vent et de l'activité sur l'isolation et la résistance à la vapeur des vêtements ont également été intégrés.

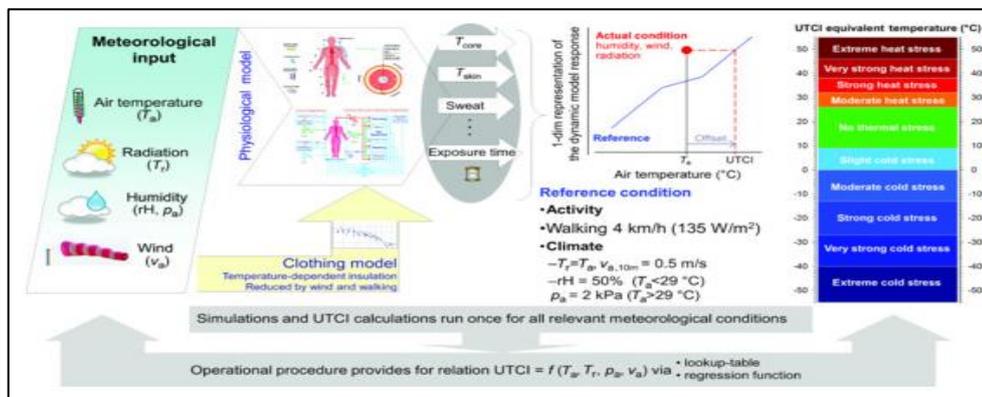


Figure II. 8 : Les paramètres fondamentaux de l'UTCI. (Source : Fiala et al., 2012)

Les valeurs de l'UTCI ont été classées en catégories de stress thermique, pouvant entraîner différentes réactions physiologiques. Cette échelle s'étend d'un stress thermique extrême « froid » (correspond à une valeur d'UTCI de -40°C) à un stress thermique extrême « chaud » (+46°C) (Voir le tableau II.7) : Une valeur UTCI comprise entre +9°C et +26°C est définie comme l'absence de stress thermique.

Tableau II. 7 : Différentes catégories de l'UTCI selon le stress thermique. Source : (Boko et al., 2013), (Réadapté par l'auteur)

Les valeurs d'UTCI en (C°)	Les niveaux de stress physiologique	Les échelles de la sensation thermique
>46	Stress thermique extrême	Torrède
De 38 à 46	Stress thermique très fort	Très chaud
De +32 à +38	Stress thermique fort	Fortement chaud
De +26 à +32	Stress thermique modéré	Chaud
De +9 à +26	Pas de stress	Confortable
De 0 à +9	Léger stress dû au froid	Légèrement frais
De -13 à 0	Stress modéré dû au froid	Frais
De -27 à -13	Fort stress dû au froid	Froid
De -40 à -27	Très fort stress dû au froid	Fortement froid
<-40	Stress extrême dû au froid	Très froid

II.8.4. L'indice de température effective standard (SET* et OUT-SET*)

II.8.4.1. L'indice SET*

L'indice Standard Effective Temperature (SET*) représente une amélioration de l'indice « température effective » (ET*) développé par Gagge et al. (1971). Cet indice bioclimatique est souvent utilisé pour évaluer le confort thermique des environnements intérieurs et extérieurs. La température effective standard (SET*) constitue un modèle rationnel avancé qui a été adopté par l'ASHRAE 55 (Zhang et Lin, 2020). Ce modèle repose sur une structure à deux nœuds proposée par Gagge et al. (1986), capable de refléter le processus de régulation thermique du corps humain (Wenjie et al., 2022).

Le modèle SET* compartimente le corps humain en deux nœuds concentriques représentant le centre du corps et la peau. À la différence du modèle de Fanger, ce modèle a la capacité de calculer les variables physiologiques (températures cutanées et internes, mouillure cutanée) dans des conditions transitoires.

La SET* est un indice de confort thermique qui intègre l'effet de six paramètres environnementaux et personnels fondamentaux. Elle peut être utilisée dans des conditions transitoires, qu'elles soient chaudes, modérées ou froides (Parsons, 2003). Les sensations thermiques associées aux différentes valeurs de SET* peuvent être déduites à partir d'une échelle standardisée (voir le tableau II.8) ci-après :

Tableau II. 8 : La relation entre la température standard effective SET* et la sensation thermique. Source : (Parsons, 2003), (Réadapté par l’auteure)

Les valeurs du SET*en (C°)	Sensation	L'état physiologique d'une personne sédentaire
>37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la régulation
De 34.5 - 37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
De 30.0 - 34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
De 25.6 - 30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
De 22.2 - 25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
De 17.5 - 22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
De 14.5 - 17.5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
De 10.0 - 14.5	Très froid, très inacceptable	Frissons

En 1967, Gagge présente la nouvelle température effective standard (SET*), la définissant comme étant la température de l'air dans laquelle, dans un environnement de référence donné, une personne présente la même température de peau (tsk) et la même mouillabilité (w) que dans l'environnement réel (Blazejczyk et al., 2011). De plus, en termes de contrainte physiologique et de confort thermique, l'environnement de référence et l'environnement réel sont équivalents (Monteiro, 2005). La définition de l'environnement de référence est la suivante:

- Température de l'air (Tair °C) = Température moyenne radiante (TMR °C) ;
- Vitesse de l'air (Vair) = 0,15 (m/s) ;
- Humidité relative (HR) = 50 (%) ;
- Métabolisme (M) = 1,2 met ;
- Résistance des vêtements (Iclo) = 0,9 clo.

Son évaluation s'effectue suivant l'équation (II.8) ci-après (Gagge, 1986) :

$$SET * = (w_{hs}, (p_s, s_k - 0.5p_{SET *}) + h_{STSK} - HSK) / h_s \quad (II.8)$$

II.8.4.2. L'indice de la température effective standard extérieure « Outdoor Effective Temperature » « Out-SET* »

Pickup et de Dear (2000) ont introduit l'indice OUT-SET*. Il représente une adaptation extérieure de l'indice SET*, correspondant à l'interprétation de la température effective standard (SET*) pour les environnements extérieurs. Cela implique l'inclusion du calcul de la température moyenne radiante (TMR) en extérieur, estimée par le modèle OUT-MRT. La première étude d'estimation du confort thermique en extérieur a été faite par Spagnolo et de Dear (2003) dans la ville de Sydney.

II.8.5. Le modèle COMFA

D'après Coccolo et al. (2016), le modèle COMFA a été conceptualisé en 1995 par Brown et Gillespie comme un modèle mathématique destiné à expliquer l'équilibre énergétique d'un individu dans un espace extérieur particulier (Latini et al., 2010). Il s'appuie principalement sur quatre composantes : le taux de transpiration, le budget énergétique, la température corporelle centrale et la température de la peau.

L'objectif principal de la méthode COMFA était de fournir un nouvel indice de confort extérieur basé sur le calcul du bilan thermique d'une personne. Bien que ce modèle soit l'un des plus simples pour évaluer le confort extérieur, il reste suffisamment sensible aux variations physiques pour modérer les conditions microclimatiques. La sensation de confort est évaluée à travers la valeur du bilan thermique (TB), fournissant les conditions de confort en relation avec la quantité d'échanges énergétiques entre un individu et son environnement (Latini et al., 2010 ; Cantini et al., 2019).

La formule pour le bilan thermique du corps humain décrivant ce modèle est calculée en tenant compte des divers transferts de chaleur sensible et latente entre l'individu et son environnement. Le (TB) est calculé par l'équation suivante :

$$TB = M + K_{abs} + L_{abs} - (Conv + Evap + T_{Remitted}) \quad (II.9)$$

Avec :

M : L'énergie métabolique,

K_{abs} : Le rayonnement solaire absorbé,

L_{abs} : Le rayonnement thermique absorbé,

Conv : La perte de chaleur par convection,

Evap : La perte de chaleur par évaporation,

T_{Remitted} : Le rayonnement solaire émis.

La méthode COMFA a été rapidement améliorée et adaptée aux espaces urbains, donnant ainsi naissance à la version COMFA+ présentée par Angelotti et al. (2007). Une étude sur une place à Milan, en Italie, a permis cette évolution, introduisant une adaptation spécifique à l'environnement urbain.

Initialement conçu pour les espaces ouverts ruraux, le modèle COMFA original ne prenait pas en compte les influences des bâtiments dans le bilan thermique (TB). En milieu urbain, les structures architecturales peuvent perturber le TB en interceptant, absorbant, réfléchissant le rayonnement solaire, en obstruant la vue du ciel et en émettant des radiations thermiques. De nouveaux paramètres visuels, tels que le BVF (Building View Factor), le SVF

(Sky View Factor), le GVF (Ground View Factor), et l'OVF (Object View Factor), ont été introduits dans le modèle COMFA+ pour tenir compte de ces interférences (Angelotti et al., 2007). Ainsi, le COMFA+ permet d'évaluer les conditions de confort également dans les espaces urbains ouverts (Cantini et al., 2019).

La distinction fondamentale entre le modèle COMFA et le COMFA+ réside dans l'addition de l'effet des bâtiments dans le calcul du rayonnement dans l'équation du bilan thermique (TB).

En outre, le modèle COMFA initial a été revisité par Kenny et al. (2009), qui ont observé une sous-estimation de l'effet du vent et de la vitesse de l'activité par COMFA, en particulier pour des activités très intensives. Des modifications ont été apportées à l'évaluation de la résistance des vêtements et de leurs imperméabilités à la vapeur, notées r_c et r_{cv} respectivement (Tebbani et Bouchahm, 2016).

La méthode COMFA utilise une échelle de cinq degrés, avec des valeurs du budget énergétique allant de -150 à 150 W/m^2 . Une valeur positive de TB indique un gain thermique pour la personne, tandis qu'une valeur négative indique une dispersion thermique nette. Une valeur nette proche de zéro de TB indique une neutralité thermique et donc le confort thermique. La sensation de confort est attribuée en fonction de la valeur du budget thermique (TB), comme indiqué dans le tableau (II.9) ci-après :

Tableau II. 9 : Les valeurs du budget énergétique et les sensations thermiques. Source : (Cantini et al., 2019), (Réadapté par l'auteur)

Budget énergétique	Sensation thermique
$TB < -150$ W/m^2	Très Froid
-150 $W/m^2 < TB < -50$ W/m^2	Froid
-50 $W/m^2 < TB < +50$ W/m^2	Confort
$+50$ $W/m^2 < TB < +150$ W/m^2	Chaud
$TB > +150$ W/m^2	Trais Chaud

D'après Kenny et al. (2009), les recherches menées par Harlan et al. (2006) ont établi une relation entre un indice de confort thermique humain (développé à partir du modèle COMFA) et l'indice de chaleur de la NOAA. Une échelle de sept points pour la sensation thermique prévue (PTS) a été élaborée. Les valeurs du budget énergétique sont illustrées dans le tableau (II.10) suivant :

Tableau II. 10 : Échelle à sept points pour l'évaluation de la sensation thermique prédite qui ont été appliquées aux résultats du budget COMFA. Source : (Kenny et al., 2009)

Notes de sensation	Budget énergétique	description
-3	Budget < -201	Froid
-2	-200 < Budget < -121	Frais
-1	-51 < Budget < -120	Légèrement frais
0	-50 < Budget < +50	Neutre
1	51 < Budget < +120	Légèrement chaud
2	+121 < Budget < +200	Chaud
3	Budget > +201	Très chaud

II.8.6. L'indice de la température perçue « Perceived temperature » « PT »

D'après Staiger et al. (1997), la Température Perçue (en °C) est utilisée pour mesurer le stress thermique et le confort du corps humain. La température perçue (PT) représente une adaptation de l'indice PMV en conditions extérieures et repose sur le modèle « Klima-Michel », un modèle d'équilibre thermique élaboré par Gagge et al. (1986), basé sur l'équation de confort de Fanger couplée avec les flux solaires.

L'indice PT est défini comme la température de l'air ambiant d'une référence isotherme, où la perception thermique (chaude et froide) serait équivalente aux conditions réelles. L'environnement de référence maintient une température ambiante égale à la température radiante moyenne, une légère brise pour le vent, et une pression de vapeur d'eau similaire à celle de l'environnement réel (Coccolo et al., 2016 ; Grosdemouge, 2020).

La température perçue est liée à une échelle thermo-physiologique, selon le PMV, et s'exprime simplement par la différence de la température de l'air (Coccolo et al., 2016). La PT connaît une hausse plus prononcée que la température de l'air et dans des situations de chaleur extrême d'été, est généralement supérieure à la température de l'air, atteignant environ 15 K dans des conditions extrêmes (Musy, 2008).

L'évaluation de l'indice PT implique des adaptations au niveau d'habillement entre 0,5 clo pour les vêtements d'été et 1,75 clo pour les vêtements d'hiver, avec un taux d'activité métabolique de 2,3 Met, correspondant à un piéton marchant à 4 km/h sur un terrain plat (Grosdemouge, 2020 ; Musy, 2008).

La PT est définie par la norme allemande VDI 3787 (Perrineau, 2013) et est applicable à diverses échelles, de la micro-échelle à l'échelle globale. Cet indice est particulièrement utile pour élaborer des cartes bioclimatiques à des échelles régionales ou plus étendues, permettant

de visualiser l'impact du changement climatique sur la santé et la perception thermique (Burton et al., 2009). Les échelles de la perception thermique sont présentées dans le tableau (II.11) :

Tableau II. 11 : Les valeurs de la température perçue et les niveaux de stress thermique. (Source : Musy, 2008)

Température perçue (°C)	Perception thermique	Stress physiologique
< -39	Très froid	Extrêmement froid
-39 à -26	Froid	Froid
-26 à -13	Froid	Froid modéré
-13 à 0	Légèrement froid	Froid faible
0 à +20	Confortable	Confort possible
+20 à +26	Chaud	Légèrement chaud
+26 à +32	Chaud	Chaud modéré
+32 à +38	Chaud	Chaud
> +38	Très chaud	Extrêmement chaud

La relation entre PMV et PT est définie par des analyses de régression du « modèle Klima-Michel » basées sur plus de 400 000 observations synoptiques concernant les villes de Freiburg, Feldberg et Rostock-Warnemünde entre 1965 et 1995 et elle est résumée comme suit (Staiger et al., 2012) :

$$PT = 5,805 + 12,6784 PMV, PMV < 0 \text{ et } Icl = 1,75 \text{ clo} \quad (\text{II. 10})$$

(stress thermique lié au froid)

$$21,258 - 9,558 Icl, PMV = 0 \text{ et } 1,75 \text{ clo} > Icl > 0,50 \text{ clo} \quad (\text{II. 11})$$

(aucun stress thermique)

$$16,826 + 6,183 PMV, PMV > 0 \text{ et } Icl = 0,50 \text{ clo} \quad (\text{II. 12})$$

(stress thermique lié à la chaleur)

II.9. Les indices empiriques

Les indices empiriques, également appelés « simples », sont des indices issus d'études expérimentales fondées principalement sur l'observation, la surveillance et les enquêtes in situ. Ils définissent le confort humain pour un climat spécifique où ils sont définis et validés. Ces indices empiriques ont été définis et validés pour définir le confort humain dans un climat spécifique. Ils prennent la forme de régressions linéaires qui résultent d'études sur le terrain.

Ces régressions multiples sont élaborées en établissant des liens entre les évaluations subjectives de la perception thermique et les mesures des variables microclimatiques qui impactent le confort thermique, tels que la température de l'air, le rayonnement solaire,

l'humidité et la vitesse du vent. Ainsi, ils reposent sur des contraintes objectives et subjectives (Blazejczyk et al., 2012 ; Coccolo et al., 2016 ; Emmanuel et al., 2016).

II.9.1. Le vote de sensation effective « Actual Sensation Vote » « ASV »

Cet indice psychosociologique définit la perception subjective par rapport aux paramètres environnementaux. Le projet européen RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces) intègre le vote par sensation effective, se concentrant principalement sur les conditions environnementales et le confort des espaces ouverts dans les villes européennes. L'estimation du confort thermique extérieur dans le cadre de ce projet s'est basée sur des mesures sur le terrain réalisées dans 14 sites d'études de cas différents, répartis dans cinq pays d'Europe, en utilisant la surveillance in situ et des questionnaires (Nikolopoulou et Lykoudis, 2006).

La sensation thermique des personnes a été rapportée sur une échelle de 5 points, allant de « très froid » (-2) à « très chaud » (+2), définie comme le vote de sensation effective (ASV). Les résultats ont mis en évidence une corrélation significative entre les paramètres microclimatiques mesurés et l'ASV. Des facteurs environnementaux tels que la température de l'air, le rayonnement global, la vitesse du vent et l'humidité relative ont été pondérés par un coefficient numérique variant selon le climat et le site étudié (Coccolo et al., 2016).

Un modèle de calcul de l'ASV a été créé pour chacune des villes étudiées grâce à cette étude. Ensuite, en calculant une valeur moyenne de l'ASV, un modèle combiné pour toute l'Europe a été mis en œuvre par l'expression (II.13) suivante (Grosdemouge, 2020) :

$$ASV = 0,049 Ta + 0,001 Rglo - 0,051 Va + 0,014 HR - 2,079 \quad (II.13)$$

(Coefficient de corrélation $R^2 = 0,78$)

II.9.2. La sensation thermique « thermal sensation » « TS »

La sensation thermique (TS) est déterminée par une équation linéaire empirique générée à partir de régressions multiples réalisées grâce à des contrôles sur place et des questionnaires. Cette équation intègre des données comme la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative, l'irradiation solaire horizontale et la température du sol. Elle prend en compte leur impact sur la perception thermique des individus, avec des équations linéaires et des échelles de sensation spécifiques à chaque site étudié, englobant des lieux variés tels que Hong Kong, Singapour, la Thaïlande, le Japon et la Chine (Coccolo et al., 2016).

L'objectif de l'étude menée par Cheng et al. (2012) à Hong Kong était d'analyser le confort thermique extérieur en utilisant des expériences longitudinales, une approche

alternative aux enquêtes transversales conventionnelles. Dans une expérience longitudinale, les sensations thermiques d'un nombre relativement restreint de sujets dans différentes conditions environnementales sont suivies et évaluées. Cela offre la possibilité d'explorer les impacts des variations des conditions climatiques telles que la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire sur la sensation thermique, fournissant des informations difficiles à obtenir via une enquête transversale conventionnelle.

Selon l'étude, le confort thermique est égal à la neutralité thermique. En conclusion, des équations prédictives sont proposées pour estimer la sensation thermique extérieure en se basant sur la température de l'air, la vitesse du vent, l'intensité du rayonnement solaire et l'humidité absolue.



Figure II. 9 : Mise en place des quatre conditions climatiques expérimentales. (Source : Cheng et al., 2012)

Les équations de prédiction de la sensation thermique ont été élaborées à l'aide d'une étude de régression linéaire intégrant quatre variables climatiques indépendantes : la température de l'air, la vitesse du vent, l'intensité du rayonnement solaire et l'humidité absolue. L'utilisation de l'humidité absolue plutôt que l'humidité relative est motivée par sa représentation plus précise de la teneur réelle en humidité de l'air. Les différentes formules sont présentées ci-dessous :

L'équation pour les données d'été :

$$TS = 0,1895 Ta - 0,7754 Vv + 0,0028 RS + 0,1953 HR - 8,23 \quad (\text{II. 14})$$

(Coefficient de corrélation $R^2 = 0,87$)

L'équation des données d'été + le printemps, avec l'humidité :

$$TS = 0,1185 Ta - 0,6019 Vv + 0,0025 RS + 0,1155 HR - 4,77 \quad (\text{II. 15})$$

(Coefficient de corrélation $R^2 = 0,91$)

L'équation des données d'été + printemps, sans l'humidité :

$$TS = 0,1185 Ta - 0,6019 Vv + 0,0025 RS - 2,47 \quad (\text{II. 16})$$

(Coefficient de corrélation $R^2 = 0,90$)

Selon les formules précédentes, pour une journée d'été typique à Hong Kong, avec une température de l'air d'environ 28°C, une humidité relative d'environ 80%, et une vitesse du vent d'environ 1,6 m/s, une personne vêtue légèrement et assise à l'ombre éprouverait une sensation thermique neutre en milieu urbain..

II.9.3. Le vote de sensation thermique « Thermal Sensation Vote » « TSV »

Le Vote de Sensation Thermique (TSV) correspond à une équation linéaire dérivée des résultats obtenus lors d'enquêtes sur site (Coccolo et al., 2016). Lai et al. (2014) ont réalisé une étude sur le confort thermique extérieur et l'utilisation de l'espace dans une communauté résidentielle à Wuhan, dans le centre de la Chine. Les chercheurs ont effectué une surveillance des conditions microclimatiques, des entretiens avec les résidents et l'enregistrement des activités des occupants.

Les données ainsi collectées ont été utilisées pour développer un modèle de Vote de Sensation Thermique (TSV) et un modèle de taux d'utilisation de l'espace. Le modèle TSV spécifiquement élaboré pour Wuhan a été utilisé pour analyser le niveau de confort. L'expression du TSV est la suivante :

$$TSV \text{ Wuhan} = 0.0643Ta + 0.00076 G - 0.161V - 0.00376 RH - 1.382 \quad (\text{II. 17})$$

(Coefficient de corrélation $R^2 = 0.67$)

Le modèle TSV peut être employé pour évaluer les conditions de confort thermique dans un espace donné, pour autant que les quatre paramètres météorologiques suivants soient disponibles : la température de l'air, le rayonnement solaire global, l'humidité relative et la vitesse du vent.

II.10. Les indices thermiques basés sur des équations linéaires (Indices directs)

Certains indices thermiques simplifiés se focalisent sur l'impact de la température de l'air, de la vitesse du vent et de l'humidité relative, en négligeant les influences microclimatiques et comportementales, et définissent le confort humain comme une fonction de l'environnement

thermique seulement. Ces indices simplifiés sont mieux adaptés pour des études à long terme, telles que l'analyse historique du climat, plutôt que pour une évaluation exacte du confort thermique à un instant donné (Emmanuel, 2005 ; Coccolo et al., 2016). Ils sont plus faciles à utiliser et à appliquer, car ils sont basés sur le suivi de variables environnementales et nécessitent seulement quelques variables (Blazejczyk et al., 2012).

II.10.1. La température effective « Effective Temperature » « ET » et ses dérivées

C'est Houghton et Yaglou (1923), membres de la « Société américaine des processus de chauffage et de ventilation », qui ont créé cet indice. La température effective peut être adaptée pour l'estimation du confort thermique dans les climats froids et chauds. Cet indice simplifié permet des évaluations approximatives du ressenti thermique (Blazejczyk et al., 2012). D'ailleurs, la température effective est toujours utilisée en Allemagne. Cet indice, couvrant la plage de température de 1°C à 45°C, était initialement utilisé pour évaluer le niveau de stress thermique. Une modification a été apportée par Vernon et Warner (1932), remplaçant la température de l'air sec par une température du globe noir, permettant ainsi la prise en compte du rayonnement solaire (la température effective corrigée "CET"). Depuis lors, de nombreuses modifications ont été apportées à cet indice de base (Blazejczyk et al., 2012).

Un développement ultérieur de l'équation « ET » de Missenard (1933) a été appliqué avec succès à Hong Kong par Li et Chan (2000), donnant naissance à la « Normal Effective Temperature » ou « NET ». Cet indice présente une forte corrélation (coefficient de corrélation $R^2 = 96,7\%$) avec l'indice UTCI (Blazejczyk et al., 2012).

La formule de la NET utilisée et validée pour la ville de Hong-Kong est exprimée ci-dessous :

$$NET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014 HR + \frac{1}{1.76 + 1.4 V^{0.75}}} - 0.29 T (1 - 0.01 HR) \quad (II.18)$$

II.10.2. Indice de la chaleur « Heat Index » « HI »

L'indice de chaleur (HI) est une mesure combinant la température de l'air et l'humidité relative pour calculer une température apparente (AT), reflétant la température réelle ressentie. L'équation de l'indice de chaleur (Rothfus, 1990) est dérivée de l'analyse de régression multiple impliquant la température et l'humidité relative pour la première version de la température apparente (AT) de Steadman (1979). L'expression de la formule HI est la suivante (Blazejczyk et al., 2012):

$$\begin{aligned}
 HI = & -8,784695 + 1,61139411 Ta + 2,338549 HR - 0,14611605 Ta \times HR \\
 & - 1,2308094 \times 10^{-2} Ta^2 - 1,6424828 \times 10^{-2} HR^2 + 2,211732 \\
 & \times 10^{-3} Ta^2 HR + 7,2546 \times 10^{-4} Ta HR^2 - 3,582 \\
 & \times 10^{-6} Ta^2 HR^2
 \end{aligned}
 \tag{II.19}$$

Aux États-Unis, le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) utilise l'indice de chaleur (HI). Le tableau (II.12) suivant présente les valeurs de l'indice de chaleur :

Tableau II. 12 : L'échelle d'évaluation de l'indice de chaleur (HI). (Source : Emmanuel et al., 2016)

Indice de chaleur (HI)	Catégorie
27-32	 Inconfort
32-41	 Extrême inconfort
41-54	 Danger
Au-dessus de 54	 Danger extrême

II.10.3. L'indice Humidex « H »

L'Humidex (H) a été défini pour la première fois par Masterton et Richardson en 1979, qui ont créé l'indice humidex pour la première fois au service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada (actuellement, le Service météorologique du Canada). L'Humidex est décrit par une équation linéaire qui met en corrélation la température de l'air (Ta), l'humidité relative (HR) et la pression de vapeur d'air (Pvs), comme suit (D'Ambrosio Alfano et al., 2011) :

$$HD = Ta + \frac{5}{9} (Pvs - 10)
 \tag{II.20}$$

$$Pvs = 6.112 \times \left(\frac{7.5 Ta}{10^{237.7+Ta}} \right) \times \frac{HR}{100}
 \tag{II.21}$$

Les météorologues canadiens sont actuellement les principaux utilisateurs de l'indice Humidex. Aux États-Unis, l'indice de chaleur est privilégié, se basant sur l'humidité relative au lieu du point de rosée, contrairement à l'approche de l'Humidex. L'Humidex est employé pour évaluer la température ressentie en tenant compte des taux d'humidité. Cette mesure revêt une pertinence significative à des températures dépassant les 30 degrés Celsius, marquant le début d'une sensation de chaleur notable.

Le Service météorologique d'Environnement Canada utilise les valeurs de l'Humidex pour informer le public lorsque les conditions de chaleur et d'humidité risquent d'être inconfortables. Les plages d'Humidex et les conditions de confort sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau II. 13 : Les valeurs limites de l'indice Humidex. (Source : Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, 2004)

Plage d'humidex	Degré de confort
20-29	Sensation de bien-être
30-39	Un certain inconfort
40-45	Beaucoup d'inconfort ; évitez les efforts
Au-dessus de 45	Danger
Au-dessus de 54	Coup de chaleur imminent

II.10.4. L'indice « Wet Bulb Globe Temperature Index » (WBGT)

L'indice WBGT fut initialement défini pour la prévention des maladies liées à la chaleur dans les camps d'entraînement militaires. En 1957, le département de la Défense américaine a chargé deux éminents chercheurs de l'époque, Yaglou et Minard, de développer un indice de contrainte thermique. L'objectif était de fournir une mesure comparable à celle de la température effective corrigée, tout en étant plus facile à appliquer, notamment en évitant la nécessité de mesurer la vitesse de l'air. Cette recherche a conduit à la création de l'indice le plus largement utilisé au niveau mondial : le Wet Bulb Globe Temperature ou WBGT. Il a ensuite été reconnu comme une norme validée par la norme ISO 7243 (Organisation internationale de normalisation, 1989), ainsi que dans les normes ASHRAE (2001) et ISO 7243 (2017).

Cet indice calcule la température effective corrigée à partir de trois températures : la température du bulbe humide ventilé naturellement (T_w), la température du globe noir exposé au soleil (T_g), et la température de l'air sous abri (T_a) (Dessureault et al., 1997). La température humide naturelle est influencée à la fois par l'humidité, la vitesse et la température de l'air. De son côté, la température du globe dépend de la température et de la vitesse de l'air ainsi que du niveau de rayonnement. Le WBGT pour l'environnement extérieur est défini comme suit (Dessureault et al., 1997 ; Coccolo et al., 2016):

$$WBGT = 0,7T_w + 0,2 T_g + 0,1 T_a \quad (II.22)$$

Avec :

T_w : C'est la température du bulbe humide ventilé naturellement en (°C).

T_g : C'est la température du globe en (°C).

T_a : C'est la température de l'air en (°C).

À noter que la température du globe noir est mesurée à l'aide d'un thermomètre à globe noir. C'est un thermomètre classique inséré dans un bouchon de caoutchouc, puis à l'intérieur d'une sphère creuse en cuivre de 15 cm de diamètre. Cet indice est facile à déterminer dans la plupart des environnements intérieurs et extérieurs. Il peut être considéré comme une méthode permettant d'estimer la présence ou l'absence de contrainte thermique (ISO 7243, 2017). Les résultats obtenus nécessitent une comparaison avec les données figurant dans la norme ISO 7243 (2017), qui présentent pour chaque niveau d'activité métabolique, la sensation de confort correspondante (Grosdemouge, 2020) :

Tableau II. 14 : Valeurs de référence de l'indice WBGT pour différents niveaux d'activité de personnes qui sont acclimatées et non acclimatées à la chaleur. Les valeurs suivantes sont obtenues pour des études en milieu extérieur avec une vitesse de vent supérieur à 0,1. (Source : Emmanuel et al., 2016)

Activité (métabolisme, M en W)	WBGT (°C)	
	Acclimatation	Pas d'acclimatation
Repos, assis (M < 117)	33	32
Debout, marche lente (117 – 234)	30	29
Marche normale (234 - 360)	28	26
Marche rapide, travail peu intense (360 - 468)	26	23
Travail intense (M > 468)	25	20

Conclusion

Ce chapitre met l'accent sur le confort thermique et examine en détail la notion d'ambiance thermique. Nous avons également discuté des différents facteurs qui affectent les conditions thermiques dans les milieux urbains extérieurs. L'analyse approfondie des paramètres influençant le microclimat a permis la sélection des paramètres climatiques clés nécessaires à l'évaluation du confort thermique en milieu urbain. Ces paramètres cruciaux comprennent la température de l'air, la température moyenne radiante, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent.

Les diverses études présentées dans ce chapitre, menées par des chercheurs spécialisés dans le domaine du confort thermique, soulignent la nécessité d'une combinaison d'évaluations

objectives et subjectives pour obtenir une assimilation complète des informations sur la qualité des espaces extérieurs. Le milieu urbain présente un environnement complexe, avec des variables microclimatiques qui varient dans le temps et l'espace, ce qui rend leur quantification difficile.

Nous avons également présenté les indices de confort thermique applicables dans les espaces extérieurs, classifiés dans la littérature scientifique en trois groupes : les indices rationnels, les indices empiriques et les indices basés sur des équations linéaires. À la suite d'une analyse minutieuse des indices thermiques recommandés pour l'évaluation du confort thermique en climat chaud, il a été déterminé que les indices rationnels sont les plus préconisés. Ces indices reposent principalement sur le bilan thermique de l'homme en interaction avec son environnement, en prenant en compte les divers paramètres influençant le microclimat, qu'ils soient climatiques ou liés à l'individu. Parmi ces indices, citons le PMV, le PET, le SET* et l'UTCI.

Nous envisageons d'utiliser ces indices thermiques pertinents et efficaces dans nos études de cas pour quantifier le bien-être thermique extérieur en perspective de notre recherche.

Chapitre III : Etat de l'art et positionnement épistémologique

Introduction

Le domaine d'étude sur la ville et ses impacts a été élargi, mettant en évidence la nécessité de trouver des solutions pertinentes pour préserver l'environnement et atténuer les dommages causés par l'activité humaine. Les changements climatiques, l'étalement urbain, l'artificialisation des terres agricoles et la destruction des paysages constituent des défis majeurs qui entravent le développement urbain dans une perspective de durabilité.

La ville, en tant qu'entité complexe, est principalement constituée de divers modèles morphologiques et de structures géométriques, se traduisant par une diversité de formes urbaines qui influent sur le microclimat urbain et le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

Dans ce contexte, ce chapitre expose, en première étape, un examen de la littérature scientifique en présentant les diverses études portant sur l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

En seconde étape, en se basant sur les études menées par les chercheurs dans le domaine du microclimat, il présente les différents modèles climatiques développés initialement pour quantifier les microclimats urbains, ainsi que l'évaluation du confort thermique extérieur en fonction des indicateurs morphologiques. Cela offre également la possibilité d'optimiser les conditions de confort thermique dans les espaces extérieurs en élaborant différents scénarios d'aménagements urbains.

Cette collecte de données permet de définir les diverses approches et méthodes appliquées pour déterminer le rôle de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique extérieur. Grâce à l'ensemble des éléments présentés dans ce chapitre, ce dernier est considéré comme un point de départ par lequel on entamera notre partie pratique pour ce travail de recherche.

Par conséquent, la structuration de ce chapitre se fera en trois phases :

La première phase sera consacrée à la présentation des études de recherche scientifiques antérieures traitant de la problématique de la morphologie urbaine et de ses effets sur les ambiances et le confort thermique en milieu urbain.

La deuxième phase évoquera les différents modèles numériques applicables dans le domaine de croisement entre l'urbanisme et la climatologie.

La dernière partie abordera les approches et les méthodes qui toucheront notre thématique de recherche, en évaluant celles qui pourraient être applicables dans notre cas.

III.1. La ville et le développement urbain durable

Les villes du monde ont connu une croissance démographique spectaculaire et une urbanisation accélérée, avec plus de 55 % de la population mondiale, soit 4,2 milliards d'habitants, vivant en milieu urbain, selon les données de la Banque Mondiale. Cette tendance devrait se renforcer à long terme ; d'ici 2050, le nombre actuel de citadins devrait doubler, avec 7 personnes sur 10 dans le monde devenant urbaines. Par conséquent, la population urbaine dépassera celle des zones rurales. L'ampleur de cette urbanisation et le rôle des zones urbaines deviendront de plus en plus importants dans les décennies à venir. Cependant, certains aspects négatifs de cette urbanisation rapide risquent de compromettre les équilibres économiques, écologiques et sociaux, entraînant essentiellement une dégradation de l'environnement urbain et du milieu naturel. Dans ce contexte, le développement durable émerge comme le « fil d'Ariane » d'une nouvelle orientation des politiques urbaines visant à rendre les villes plus habitables et, surtout, plus confortables (Piéchaud, 2008).

III.2. Le concept du développement durable

Le concept de développement durable a été introduit pour la première fois lors de la publication du rapport Brundtland en 1987. Ce rapport a défini le « développement durable » comme suit : « un développement qui satisfait les besoins des populations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins ».

Cette perspective, centrée sur l'équilibre entre les aspirations actuelles et la préservation des ressources pour les générations futures, a depuis lors façonné les discussions sur le développement et l'environnement à l'échelle mondiale.

La commission présidée par Mme Gro Harlem Brundtland dans le cadre de ce rapport a cherché à concilier le développement économique avec la préservation de l'environnement, visant à léguer aux générations futures un monde capable de soutenir un tel développement. Cette approche a mis en lumière la nécessité de repenser les pratiques de développement pour intégrer des considérations environnementales et sociales (Hamel, 2005 ; Roelof Verhage et Marie Leroy, 2014).

Ainsi, l'intégration de la durabilité dans la conception urbaine est devenue une condition préalable pour répondre de manière adéquate aux défis urbains contemporains. Ces défis comprennent les changements climatiques, la disponibilité des ressources, la dégradation de l'environnement et la consommation d'énergie, ainsi que des phénomènes tels que l'îlot de chaleur urbain (ICU) et la pollution de l'air ajoutent des problématiques importantes en matière de confort et de santé dans les contextes urbains (Gaitani et al., 2014 ; Perrin, 2020).

III.3. Contexte et état de l'art

Le microclimat est fortement influencé par la morphologie urbaine, qui comprend l'étude de la forme urbaine, de la disposition, de l'orientation et de la densité construite. Ces éléments ont un impact significatif à la fois sur les flux d'énergie et d'air dans l'environnement urbain (Margot, 2022). Les villes adoptent différents modèles morphologiques qui affectent le climat urbain à différentes échelles, en modifiant les conditions thermiques des espaces extérieurs, par l'augmentation de la fréquence, de la durée et de l'ampleur des épisodes de stress thermique, généralement associés à un ciel clair et des températures élevées, entraînant une charge thermique radiante élevée et induisant un stress thermique chez les usagers (Lau et al., 2014).

Les recherches sur la morphologie urbaine et ses impacts sur le microclimat fournissent aux concepteurs, aux experts et aux décideurs des informations cruciales pour comprendre comment les paramètres climatiques et les indicateurs morphologiques interagissent, particulièrement en ce qui concerne la sensation thermique des individus dans les espaces urbains extérieurs. Ces résultats permettent de concevoir des villes en intervenant sur les indicateurs morphologiques pour obtenir des réponses microclimatiques, pour assurer des conditions de vie durables et saines (Benzerzour, 2005 ; Boucheriba, 2017).

Dans les villes anciennes situées dans des climats chauds et secs, l'adoption de formes urbaines compactes et denses est fréquente, visant à profiter d'espaces ombragés pendant une grande partie de la journée (Ali-Toudert et al., 2005 ; Johansson, 2006 ; Hamel et Belekhal, 2020). La présence d'ombre favorise une sensation de fraîcheur tout en réduisant l'accumulation de chaleur dans les matériaux (Perrin, 2020).

Cependant, les recherches axées sur la morphologie urbaine, les conditions climatiques et le confort thermique dans des contextes de développement durable, notamment dans des environnements arides et semi-arides, sont actuellement limitées. Ces environnements posent des défis particuliers, et l'équilibre entre les besoins de développement urbain et la préservation des ressources naturelles est essentiel. Les formes urbaines deviennent ainsi des éléments clés dans le débat entre chercheurs et urbanistes.

III.4. Les recherches de références

Les recherches de références ont été classifiées selon l'échelle d'analyse de la morphologie urbaine :

III.4.1. L'étude de Zhou et Chen (2018): Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon

III.4.1.1. Description et objectif d'étude

L'objectif principal de cette étude consiste à évaluer de manière quantitative les répercussions des évolutions de la configuration urbaine, induites par une urbanisation rapide, sur l'îlot de chaleur urbain. Cette évaluation repose sur une analyse de cas effectuée à Wuhan, la capitale de la province de Hubei en Chine. L'étude vise à comprendre comment une planification et une conception urbaines adaptées aux villes denses et compactes peuvent améliorer la ventilation des canyons urbains et modifier l'équilibre thermique au sein de la canopée urbaine, contribuant ainsi à atténuer le phénomène d'ICU. L'objectif global est d'analyser des stratégies d'atténuation de l'ICU en prenant en compte divers types d'utilisation et de couverture des sols (LUCC) ainsi que des modèles de développement variés pour les villes compactes.

Afin d'évaluer l'impact des variations de la morphologie urbaine sur l'ICU, les chercheurs ont élaboré deux scénarios hypothétiques basés sur deux modèles de développement urbain distincts. L'un de ces scénarios représente une configuration de grande hauteur, tandis que l'autre incarne une configuration de haute densité. Ces scénarios ont été élaborés pour simuler les effets de la morphologie urbaine sur l'îlot de chaleur urbain (ICU).

III.4.1.2. Méthode adoptée

Dans cette étude, les scientifiques ont exploité le modèle de prévision météorologique WRF en conjonction avec le modèle UCM dédié à la canopée urbaine. Ils ont élaboré quatre scénarios, divisés en deux ensembles. Le premier ensemble de scénarios se penche sur les modifications d'utilisation et de couverture des sols, en se basant sur la réduction de la surface des lacs de Wuhan entre 1965 et 2008.

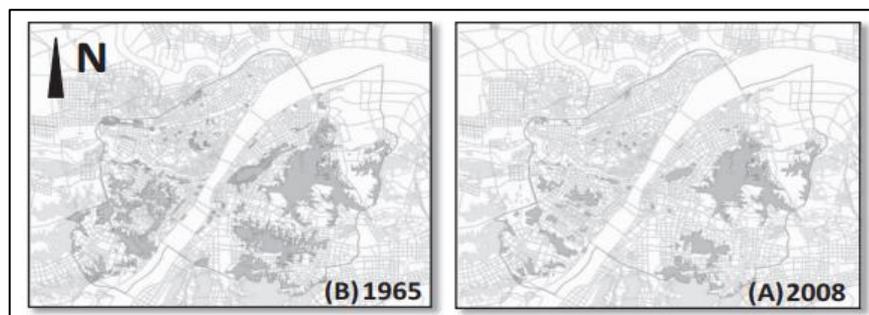


Figure III. 1 : Cartes montrant la répartition des zones lacustres (bloc gris) en 1965 (A) et 2008 (B) dans la zone bâtie de Wuhan. (Source : Zhou et Chen, 2018).

Quant au second ensemble de cas, il concerne le développement compact de la morphologie urbaine à Wuhan. Ils ont élaboré des scénarios caractérisés par une haute densité et des structures élevées, conformément au modèle de développement compact prévu par le plan directeur 2020 de la ville de Wuhan.

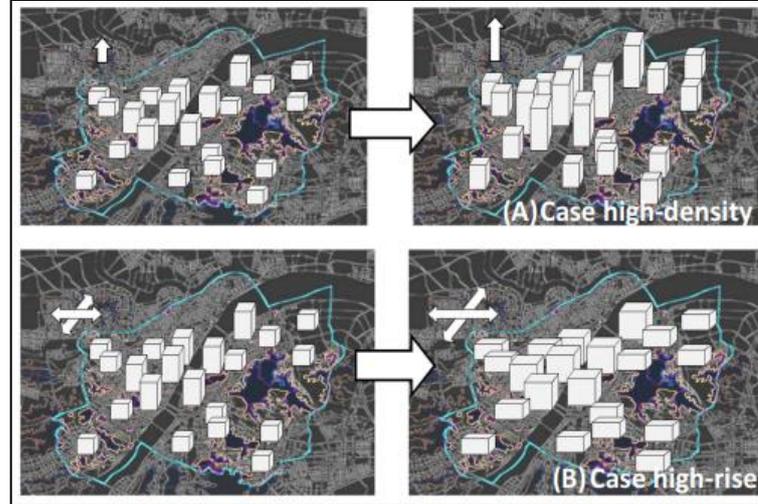


Figure III. 2 : Concept du cas de haute densité (A) et du cas de haut bâtiment (B). (Source : Zhou et Chen, 2018)

III.4.1.3. Les résultats de l'étude

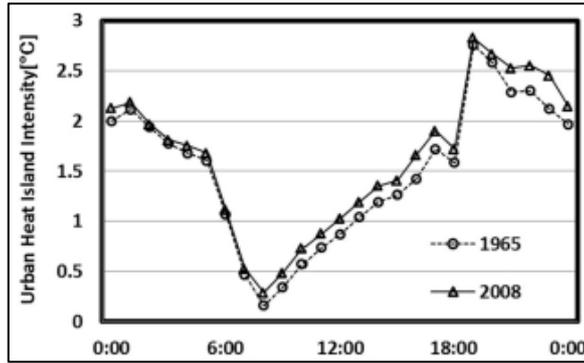
➤ **Impact des changements d'utilisation et de couverture des sols sur l'ICU :**

D'après les données, l'utilisation et la couverture des sols ont considérablement changé dans la zone bâtie de Wuhan entre 1965 et 2008. La superficie du lac a diminué de 130,5 km² dans cette zone, représentant environ un tiers de la superficie totale du lac.

Tableau III. 1 : Paramètres des cas (Valeurs moyennes dans la zone bâtie de Wuhan). (Source : Zhou et Chen, 2018)

Cases	Water Area (m ²)	Building density (%)	Plot ratio	Greenery ratio (%)	Average roof level (%)	Average roof width (%)
Case 1965	518.25	-	-	-	-	-
Case 2008	387.75	-	-	-	-	-
Case_high-density	-	65	5.0	55	30	60
Case_high-rise	-	35	10.0	25	90	30

Afin d'examiner les répercussions des changements dans l'utilisation et la couverture des sols sur l'îlot de chaleur urbain (ICU), les chercheurs ont analysé les cas de 1965 et 2008. Le graphique ci-dessous illustre la moyenne diurne de l'ICU dans la zone construite pour ces deux périodes. En raison de la réduction de la superficie du lac, l'ICU s'est intensifié, notamment de 20h00 à 24h00, enregistrant une augmentation de 0,3 à 0,4°C. À l'inverse, entre 8h00 et 18h00, l'augmentation de l'ICU était d'environ 0,2.



Graph III. 1 : Intensité diurne moyenne de l'ICU de la zone bâtie pour le cas 1965 et le cas 2008. (Source : Zhou et Chen, 2018)

Les deux plages horaires précédemment mentionnées représentent les moments où les modifications dans l'utilisation et la couverture du sol ont l'impact le plus notable sur l'îlot de chaleur urbain (ICU). De 20h00 à 24h00, le lac fonctionne comme une zone ouverte au cœur de la ville, favorisant la circulation de l'air urbain et dissipant la chaleur accumulée dans la couverture végétale urbaine. En contraste, de 8h00 à 18h00, le lac agit comme une "source de fraîcheur" pour l'atmosphère urbaine en raison de sa capacité thermique spécifique élevée.

➤ **Impact des changements de la morphologie urbaine sur le climat urbain :**

De manière générale, à midi, la température de l'air est environ 1°C plus élevée dans le contexte de forte densité par rapport à celui de grande hauteur pour chaque zone d'échantillonnage. Cette disparité s'explique d'abord par le fait qu'à midi, l'angle d'élévation solaire est considérablement élevé, accentuant l'effet d'ombrage des structures élevées dans le contexte de grande hauteur. De plus, la présence de zones vertes plus étendues dans le contexte de grande hauteur pourrait significativement accroître l'évaporation, contribuant ainsi à dissiper la chaleur de la canopée urbaine. En revanche, avant l'aube, la température de l'air est plus basse dans le contexte de forte densité par rapport à celui de grande hauteur.

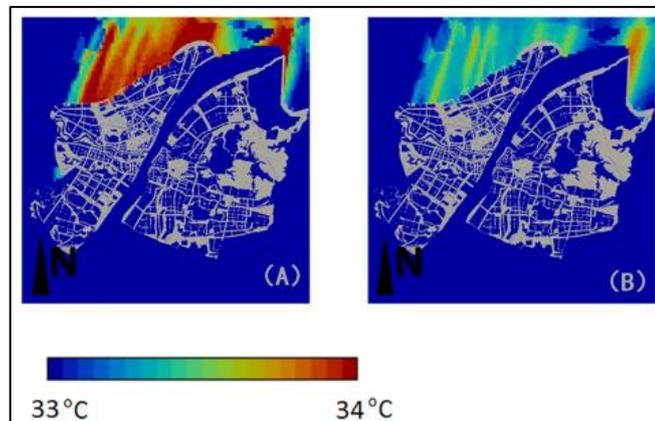


Figure III. 3 : Carte de la distribution de la température de l'air pour le Cas forte densité (A), et le Cas grande hauteur (B) à 20h00. (Source : Zhou et Chen, 2018)

Les vents atteignent des vitesses de 7,1 m/s et 10,7 m/s à 12h00 et 17h00 dans le scénario de grande hauteur. De manière similaire, en situation de forte densité, les valeurs critiques de la vitesse du vent sont de 7,7 m/s et 16,9 m/s aux mêmes heures. Par conséquent, le potentiel d'atténuation de l'îlot de chaleur urbain (ICU) semble être plus prononcé dans le contexte de grande hauteur par rapport à celui de forte densité.

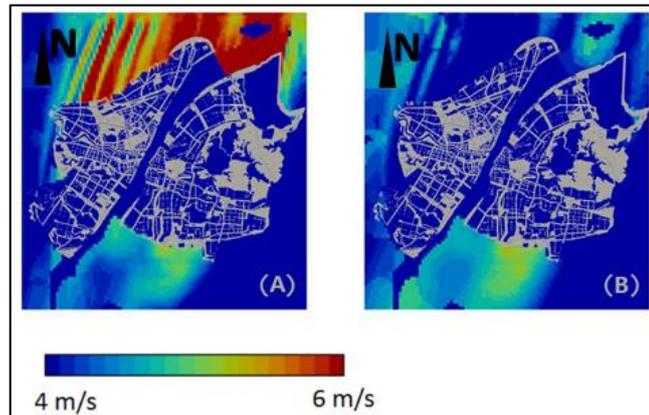


Figure III. 4 : Carte de la distribution de la vitesse du vent pour le Cas de forte densité (A) et le Cas de grande hauteur (B) à 20:00. (Source : Zhou et Chen, 2018)

Les résultats de cette étude montrent qu'avec les différents LUCC de 1965 et 2008, l'intensité de l'ICU de Wuhan a augmenté de 0,2 °C à 0,4 °C en moyenne, en raison de l'urbanisation rapide, de grandes étendues d'espaces verts et de lacs qui ont été transformées en terrains urbains. De plus, la vitesse critique du vent qui peut atténuer l'ICU dans le cas de 1965 est beaucoup plus faible que dans le cas de 2008.

Avec une morphologie urbaine différente, tout en comparant les deux modèles de développement pour les villes compactes, les auteurs ont découvert que lorsque les villes deviennent progressivement plus hautes (le cas des immeubles de grande hauteur) la température de l'air en journée est plus basse que dans le modèle de développement à forte densité, en raison de l'effet d'ombrage des bâtiments élevés. Cependant, pendant la nuit, la température de l'air est plus élevée dans le cas des tours, en raison de l'obstruction du flux d'air par les hauts bâtiments. Ainsi, les valeurs critiques de la vitesse du vent nécessaires pour atténuer le phénomène d'ICU, ils ont ainsi découvert que le modèle de développement à forte densité nécessite une vitesse du vent plus élevée pour atténuer le phénomène d'ICU. Bien que la valeur critique de la vitesse du vent dans le cas des immeubles de grande hauteur soit relativement faible.

III.4.2. L'étude de Hamel et Mazouz (2005): THE COMPACT CITY: A URBAN SHAPE FOR SUSTAINABLE CITY, IN ARID AREAS

III.4.2.1. Description et objet d'étude

L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence de la densité et de la compacité des tissus urbains sur les altérations du microclimat dans la ville de Biskra. Les chercheurs ont classifié les tissus urbains en fonction de leurs niveaux de densité urbaine, en utilisant le coefficient d'emprise au sol comme indicateur de la densité urbaine. Les échantillons étudiés ont été classifiés en trois catégories de densité définies dans la ville de Biskra.

La première catégorie regroupe les tissus très denses, représentés par les échantillons 1 et 2. L'échantillon 1 correspond au tissu traditionnel situé dans le quartier L'Mcid, avec un taux d'occupation du sol (CES brut) de 0.69, tandis que le deuxième présente le tissu auto-construit non planifié (quartier Star Melouk) avec une occupation du sol de 0.64.

La deuxième catégorie regroupe les tissus denses, soit les échantillons 3 et 4. Le tissu colonial (quartier le Damier colonial) présente un CES brut de 0.51, et le quatrième échantillon présente le tissu auto-construit planifié (lotissement Hay El Moudjahidine) avec une emprise au sol de 0.42.

La troisième catégorie regroupe les tissus lâches, avec l'échantillon 5 qui représente le tissu des grands ensembles (habitat collectif du quartier 500 logements) et un CES de 0.09.

Tableau III. 2 : Les échantillons choisis. (Source : Hamel et Mazouz, 2005)

Catégorie	Type de tissus	Quartiers choisis	Localisation
TRES DENSE	Traditionnel	M'cid	Au Sud, dans la vieille ville, immergé à l'intérieur de la palmeraie
	Auto construit non planifié	Quartier Star Melouk	La zone intermédiaire entre le Damier colonial et la vieille ville
DENSE	Colonial	Le Damier colonial.	coté Est du centre-ville
	Auto construit planifié (Lotissement)	Lotissement Hay El Moudjahidine (270 lots)	Partie ouest de la ZHUN.
LÂCHE	Les grands ensembles (habitat collectif)	Cité : 500 logements	La ZHUN Est

➤ **Les indicateurs de densité urbaine retenus pour l'étude :**

Les chercheurs ont choisi le (CES) comme indicateur définissant la densité urbaine. Le coefficient d'emprise au sol révèle la proportion entre la superficie occupée au sol par les constructions et la totalité de la superficie du terrain. Il représente le pourcentage de la surface

bâtie par rapport à la partie non bâtie de la parcelle. Cet indicateur quantifie le degré d'artificialisation des sols. C'est une grandeur sans unité qui varie entre 0 et 1.

Il existe deux types de CES : un CES brut, mesuré à l'échelle du quartier, incluant dans son calcul les surfaces non bâties, la surface de la voirie, les surfaces des espaces verts et des équipements. En revanche, on trouve le CES net qui se mesure à l'échelle de la parcelle et qui exprime le rapport (bâti/non bâti) ou (plein/vide) au niveau des parcelles (voir le chapitre I).

Pour déterminer le degré de compacité urbaine du cadre bâti, deux indicateurs ont été fournis : le coefficient de forme Cf, qui est le rapport surface/volume, et le rapport surfaces exposées/surfaces non exposées. Ces deux indicateurs constituent deux rapports complémentaires, intégrant des paramètres très significatifs dans les échanges énergétiques (Hamel, 2005).

Tableau III. 3 : Les indicateurs de densité et de compacité du cadre bâti. (Source : Hamel et Mazouz, 2005)

		1^{er} échantillon:	2^{ème} échantillon :	3^{ème} échantillon :	4^{ème} échantillon :	5^{ème} échantillon :
Surface totale de la zone investie par l'étude (m²)		22 249.63	113 010	131 590	79 592,82	103 133.56
Coefficient d'emprise au sol	Au niveau de la parcelle (net)	0.99	1	0.82	0.82	0.16
	Au niveau du quartier (brut)	0.69	0.64	0.51	0.42	0.09
Coefficient de forme (m²/m³)		0.29	0.25	0.37	0.35	0.40
Rapport surfaces exposées/surfaces non exposées		1.92	1.05	2.58	2.37	5.53

III.4.2.2. La méthode adoptée

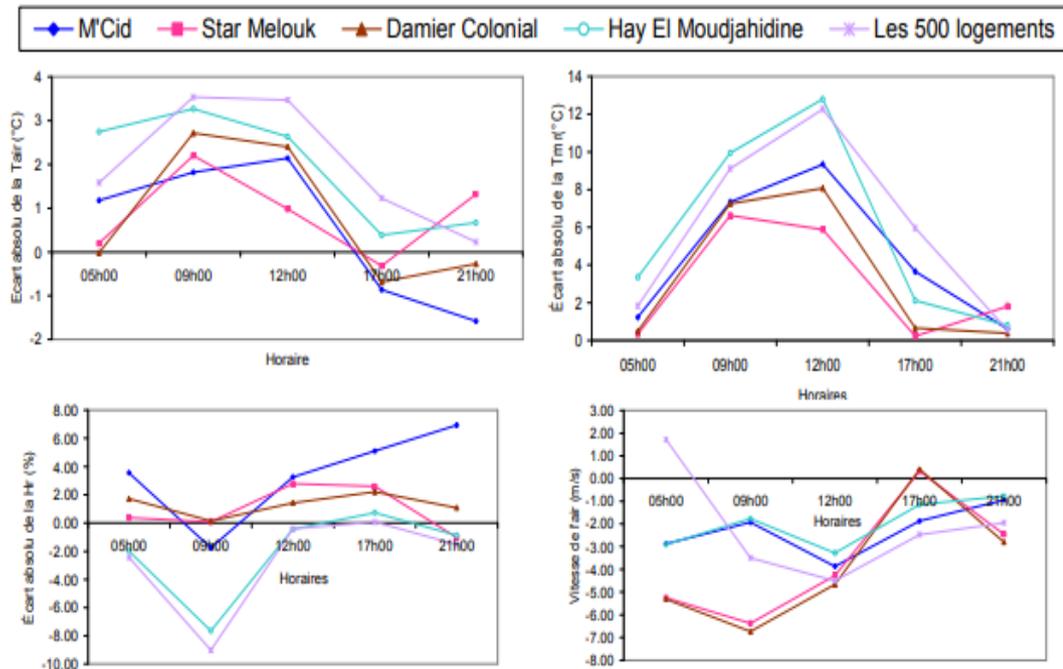
La méthode adoptée par les chercheurs implique un ensemble de mesures in situ englobant : Température de l'air, humidité relative, vitesse de l'air, et la température moyenne radiante. Les campagnes de mesures ont été menées en trois journées typiques des deux saisons : printemps et été, de l'année 2004, en cinq moments de la journée.

Les moments choisis sont liés au régime thermique journalier :

- Avant le lever du soleil : avant tout gain thermique.
- Après le lever du soleil : début du gain thermique.
- À midi : lorsque le soleil est au zénith.
- Avant le coucher du soleil : après un cumul maximal de chaleur.
- Après le coucher du soleil : la restitution de la chaleur emmagasinée.

III.4.2.3. Résultats de l'étude

Les résultats des relevés sur le terrain ont été comparés à ceux de la station météorologique de Biskra. Pour établir une référence de comparaison, les chercheurs ont calculé les écarts absolus entre les valeurs recueillies sur place et celles enregistrées par la station météorologique.



Graph III. 2 : Les écarts absolus des paramètres climatiques mesurés dans les différents quartiers par rapport à la station météorologique. (Source : Hamel et Mazouz, 2005)

En lien avec la diminution de la densité urbaine, les données climatiques ont montré une augmentation moyenne des écarts absolus entre la température de l'air et la température moyenne radiante. Ces résultats mettent en évidence que la température persiste, engendrant une élévation de la chaleur urbaine comparée aux zones non urbanisées avoisinantes. Les disparités de température peuvent atteindre jusqu'à 3,54°C à 09h00 pour l'échantillon 5 (tissu lâche) et une différence moyenne radiante pouvant aller jusqu'à 12,8 °C à midi pour l'échantillon 4 (tissu dense).

L'analyse des résultats confirme que, dans une région aride à climat chaud et sec, les configurations urbaines denses et compactes sont plus efficaces pour atténuer les effets indésirables liés à l'effet thermique. Les tissus traditionnel et auto-construit non planifié, avec des CES bruts respectifs de 0,69 et 0,64, ainsi que des coefficients de forme de 0,29 et 0,25, démontrent une optimisation des formes pour cette région spécifique, telle que celle de Biskra.

III.4.3. L'étude de Baghaeipoor et Nasrollahi (2019) : The Effect of Sky View Factor on Air temperature in High-rise Urban Residential Environments

III.4.3.1. Description et objectif d'étude

L'étude menée par Baghaeipoor et Nasrollahi en 2019 visait à étudier l'effet de l'indicateur du facteur de vue du ciel (FVC) sur le microclimat urbain d'un complexe résidentiel de grande hauteur appelé l'Atisaz à Téhéran. Ce complexe a été sélectionné comme modèle fondamental de l'étude. Le but principal de cette étude était d'évaluer l'impact du facteur de vue du ciel sur la température de l'air, avec une simulation et une étude de cas grâce au logiciel ENVI-met. Parallèlement, le logiciel SPSS a été employé pour établir une relation précise entre la température de l'air et le FVC durant les périodes les plus chaudes et les plus froides de l'année.

III.4.3.2. La méthode adoptée

Le travail de recherche repose tout d'abord sur des mesures instantanées de la température de l'air, puis sur la simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel ENVI-met. Les points de mesure ont été sélectionnés en fonction de leur représentativité sur le site :

- 1) Espace ouvert : $0.75 < SVF < 1$
- 2) Espace semi-ouvert : $0.50 < SVF < 0.75$
- 3) Espace semi-fermé : $0.25 < SVF < 0.50$
- 4) Espace fermé : $0.00 < SVF < 0.2$

La simulation du complexe résidentiel a été effectuée pour une période de temps débutant à 04h00 jusqu'à 24h00 pour deux jours représentatifs de l'année : les jours les plus froids et les jours les plus chauds.

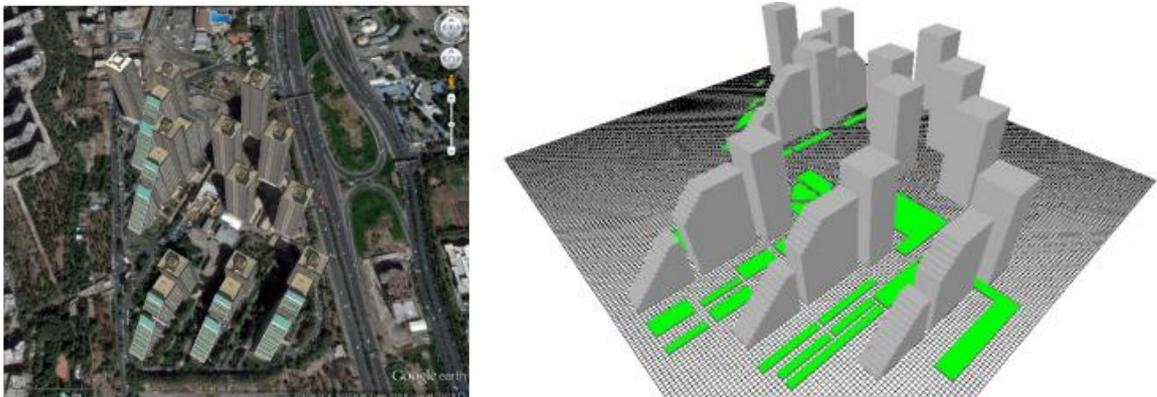


Figure III. 5 : Le site urbain simulé par ENVI-met. (Source : Baghaeipoor et Nasrollahi, 2019)

Les valeurs du facteur de vue du ciel et de la température de l'air pour chaque point de mesure ont été calculées.

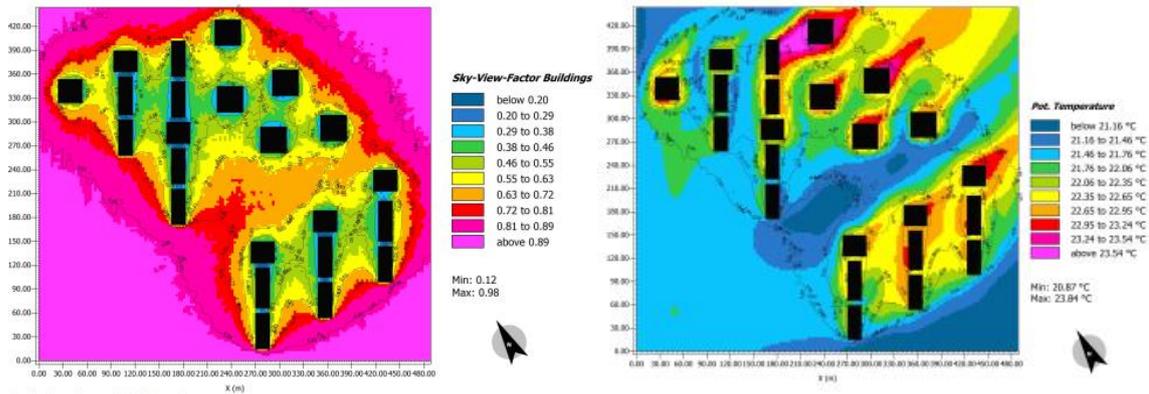


Figure III. 6 : Les cartes des valeurs de FVC et de la T air. (Source : Baghaeipoor et Nasrollahi, 2019)

III.4.3.3. Les résultats obtenus

Cette étude a examiné la relation entre la SVF et les fluctuations de la température de l'air du microclimat urbain d'un groupement résidentiel. Les résultats sont issus de ces tests par des graphiques générés grâce au modèle ENVI-met indiquant qu'avant les heures chaudes, comme à 5h et 7h, et après les heures chaudes, notamment à 17h, 19h, 21h et 23h, la corrélation entre le SVF (Sky View Factor) et la température de l'air était négative. En d'autres termes, lorsque le SVF diminue, la température de l'air augmente par la suite.

Cependant, la température de l'air augmente du fait que la valeur du SVF est faible dans les espaces fermés, piégeant la chaleur entre les bâtiments et l'empêchant d'être émise sous forme de grande longueur d'onde dans les espaces extérieurs. Une corrélation positive entre le SVF et la température de l'air a été observée aux heures chaudes de la journée, notamment à 11h, 13h et 15h. Cela veut dire qu'une augmentation du SVF s'accompagne d'une hausse de la température de l'air. Ces résultats suggèrent que les espaces ouverts avec un SVF élevé ont une température de l'air plus élevée, tandis que les espaces fermés avec un SVF faible bénéficient de l'ombre, contribuant à une réduction de la température de l'air.

III.4.4. L'étude de Deng et wong (2019) : Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts

III.4.4.1. Description et objectif de l'étude

L'étude menée par Deng et Wong (2019) visait à vérifier l'effet du rapport hauteur/largeur (H/W) et de l'orientation du canyon sur le microclimat des rues ainsi que sur le confort thermique extérieur dans les quartiers d'affaires centraux en tenant compte du climat local de la ville de Nanjing.

Une série d'études paramétriques a été menée pour explorer un large éventail de scénarios urbains avec des paramètres géométriques variés, dérivés des réglementations en matière de construction et de planification de la ville de Nanjing. Enfin, des solutions visant à optimiser les directives et les stratégies de planification et de conception urbaines ont été proposées.

III.4.4.2. Méthode adoptée

En raison des différences de hauteur des bâtiments et de la largeur des rues dans le contexte urbain examiné, les chercheurs ont élaboré une série de canyons de rues avec diverses configurations, basées sur la forme urbaine typique de la ville de Nanjing. Deux prototypes de bâtiments, comprenant des pavillons et des rues, ont été utilisés pour générer des scénarios urbains génériques.

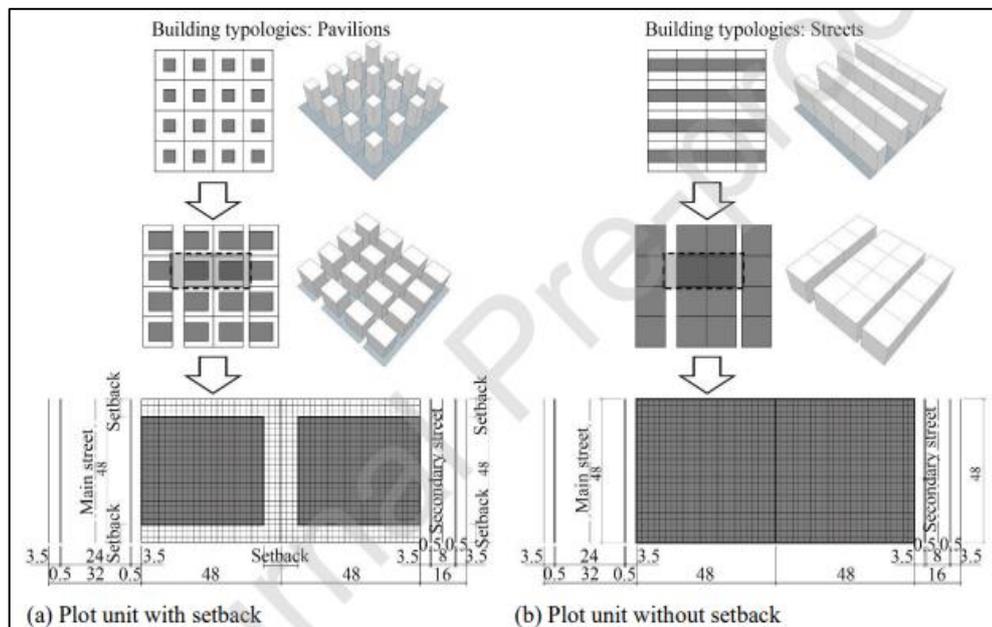


Figure III. 7 : Typologies des bâtiments et disposition des lieux de l'unité de la parcelle. (Source : Deng et Wong, 2019)

De plus, deux types de rues urbaines sont considérés dans cette étude, à savoir : La rue principale, qui est matérialisée par une route à double sens et à six voies, et la rue secondaire qui est une route à double sens et à deux voies. Pour la modélisation, chaque scénario urbain était divisé en 04 parties par une rue principale et deux rues secondaires, toutes parallèles les unes aux autres :

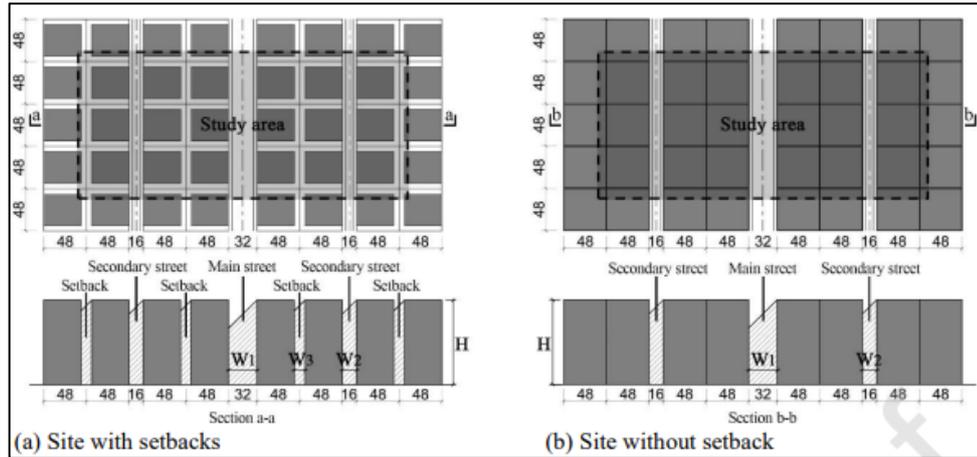


Figure III. 8 : Plans et sections de l'ensemble du site urbain pour la simulation numérique. (Source : Deng et Wong, 2019)

Deux groupes de rapports d'aspect ont été établis, notamment le rapport de rue (H/W_1) et le rapport de retrait (H/W_3). Pour simplifier les calculs, les rapports de la rue principale ont été fixés à 1, 2, 3 et 4, les rapports de la rue secondaire à 2, 4, 6 et 8, et les rapports de retrait à 0, 4, 8 et 16, en fonction des caractéristiques géométriques des parcelles représentatives. Par conséquent, une combinaison de divers rapports d'aspect a été appliquée pour développer 16 scénarios urbains de base avec diverses configurations.

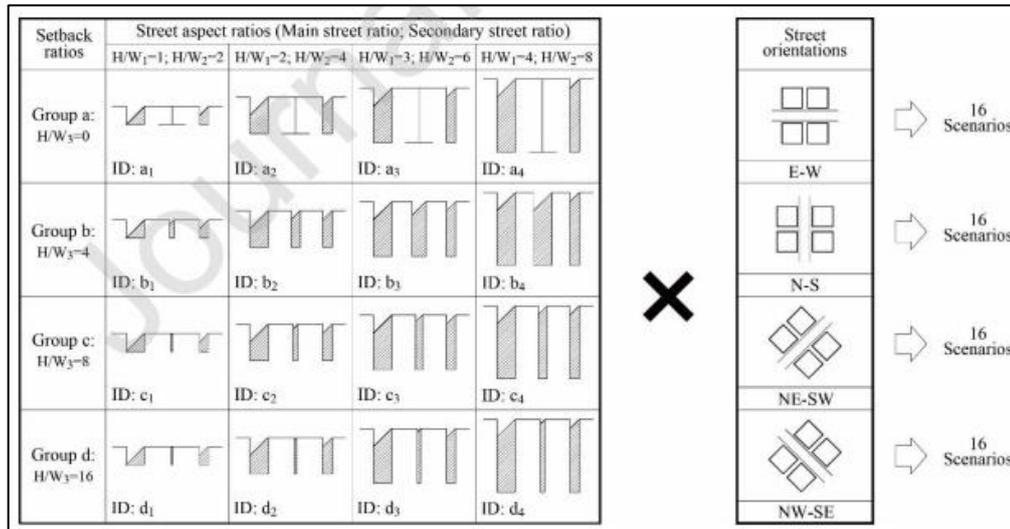


Figure III. 9 : Les 64 scénarios urbains élaborés à partir de 16 scénarios de base. (Source : Deng et Wong, 2019)

Pour mener une analyse comparative, les 16 scénarios ont été regroupés en quatre catégories, désignées par les lettres A, B, C et D, en fonction de quatre rapports de retrait. Ensuite, les orientations des rues (E-O, N-S, NE-SO et NO-SE) ont été appliquées pour créer un total de 64 scénarios. Les paramètres géométriques des 16 scénarios de base comprennent les rapports de rue, les rapports de retrait et les facteurs de vue du ciel (SVF).

Par la suite, une simulation numérique a été effectuée en employant le logiciel ENVI-met 3 pour modéliser les paramètres microclimatiques, tels que la température de l'air (T_a), la température moyenne radiante (TMR) et la vitesse du vent (V_v). Enfin, pour évaluer le confort thermique extérieur, les chercheurs ont utilisé le logiciel Rayman afin de calculer l'indice thermique PET.

III.4.4.3. Les résultats obtenus

Les résultats de la simulation ont clairement démontré que la géométrie des canyons urbains constitue un facteur important ayant un impact significatif sur le microclimat et le confort thermique au niveau de la rue. Il est probable que des espaces urbains dépourvus d'une conception appropriée entraîneront une qualité de vie urbaine inconfortable et non durable pour les résidents.

Selon l'analyse des résultats de simulation, plusieurs conclusions essentielles peuvent être tirées :

Le rapport H/W, l'orientation et le SVF des canyons urbains jouent un rôle déterminant dans l'influence des variables microclimatiques au niveau des rues. Il existe une relation inverse entre le rapport H/W de la rue et la température de l'air (T_a). Cette tendance s'explique par le fait que l'augmentation du rapport d'aspect peut réduire l'exposition au soleil, améliorant ainsi l'ombrage dans le canyon et entraînant une diminution de la T_a . Cependant, le ratio de recul présente un impact relativement faible sur la modification de la T_a dans les rues canyons. En ce qui concerne l'orientation, les canyons orientés est-ouest, que ce soit sur la rue principale ou en retrait, connaissent des conditions thermiques les plus chaudes et des périodes prolongées d'extrêmes températures moyennes radiantés (TMR). La durée des TMR extrêmes diminue avec l'augmentation du rapport d'aspect.

Les rues alignées parallèlement au vent dominant présentent la plus grande vitesse du vent, tandis que celles perpendiculaires au vent dominant connaissent la vitesse du vent la plus faible. En ce qui concerne le rapport d'aspect, la vitesse du vent diminue avec l'augmentation de ce dernier.

Le confort thermique extérieur au sein des canyons urbains est étroitement lié à l'accès au soleil, facteur déterminé par le rapport H/W du canyon ainsi que par le nombre d'heures d'ensoleillement. Un canyon urbain affichant une géométrie plus compacte a tendance à maintenir des conditions plus agréables, principalement en raison de l'effet d'ombrage considérable généré par les bâtiments environnants.

III.4.5. L'étude de Achour-Younsia et Kharrat (2015) : Outdoor Thermal Comfort : Impact of the Geometry of an Urban Street Canyon in a Mediterranean Subtropical Climate – Case Study Tunis, Tunisia

III.4.5.1. Description et objectif de l'étude

Cette étude examine l'influence de la configuration géométrique d'un environnement urbain sur les conditions de confort thermique en extérieur, en se concentrant particulièrement sur le climat subtropical méditerranéen de Tunis, en Tunisie. La méthodologie de recherche utilisée par les chercheurs repose sur l'application du modèle numérique ENVI-met pendant une journée d'été représentative à Tunis. Les chercheurs ont analysé trois aménagements urbains différents (tissu traditionnel, tissu colonial et un lotissement), caractérisés par des rapports hauteur/largeur (H/W) variés et des orientations différentes des rues. L'évaluation du confort thermique extérieur a été réalisée en utilisant l'indice d'Universal Thermal Climate Index (UTCI).

III.4.5.2. La méthode adoptée

La ville de Tunis se caractérise par la présence de différents types de tissus urbains, notamment la Médina, représentant le tissu traditionnel avec une densité compacte, le tissu colonial doté d'une trame orthogonale, et les tissus plus récents issus de lotissements réglementés. L'analyse se déroule en deux phases distinctes. Dans un premier temps, une approche comparative est employée pour évaluer les tissus sélectionnés en fonction des indicateurs morphologiques tels que le rapport H/W et le (SVF), lesquels semblent avoir un fort impact sur le confort thermique extérieur. Ensuite, dans une seconde phase, des simulations sont réalisées en introduisant des tissus fictifs, en faisant varier les paramètres morphologiques examinés. Cette seconde approche vise à confirmer les résultats obtenus lors de la première phase de l'analyse.

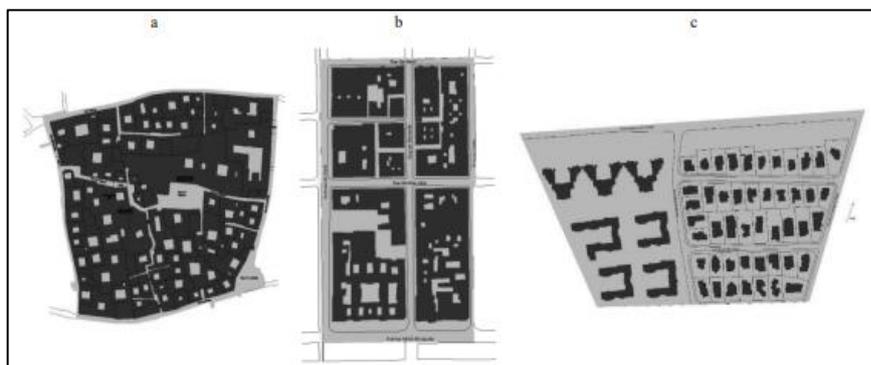


Figure III. 10 : Les différents tissus sélectionnés ; (a) Médina, (b) colonial, (c) lotissement. (Source : Achour-Younsia et Kharrat, 2015)

III.4.5.3. Les résultats obtenus

Les résultats de l'étude ont indiqué que, pour un climat méditerranéen subtropical tel que celui de la Tunisie, un rapport H/W élevé pourrait procurer des conditions de confort thermique acceptables pendant la saison estivale. En effet, les chercheurs ont observé une corrélation positive entre un rapport H/W élevé et un niveau accru de confort thermique. Cette tendance s'explique principalement par l'effet d'ombrage induit par la morphologie urbaine, réduisant ainsi l'exposition au soleil et contribuant à une efficacité accrue dans la diminution des températures ambiantes.

Par ailleurs, l'étude a démontré l'importance de l'orientation des rues dans l'évaluation du confort thermique extérieur. Une orientation est/ouest favorise une infiltration prolongée de la lumière du soleil tout au long de la journée, surtout en été. D'autre part, l'orientation nord/sud, alignée sur la direction des vents dominants, offre l'avantage de permettre à la brise de ventiler la rue, dissipant ainsi toute surchauffe survenue au cours de la journée.

III.5. Les approches et les méthodes d'évaluation de l'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique extérieur

III.5.1. Les mesures :

III.5.1.1. La méthode de mesures à distance (par télédétection)

Le terme « télédétection », traduit de l'anglais « remote sensing », se compose de deux parties : « télé » signifiant « à distance », et « détection ».

La télédétection inclut l'ensemble des connaissances et des techniques consacrées à l'analyse à distance sans contact matériel des phénomènes physiques, biologiques, et climatologiques des points et des parties (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988). Elle implique la collecte de données géo-référencées concernant la surface de la Terre en utilisant l'énergie réfléchie ou émise, acquise par des capteurs montés sur des satellites, des avions, ou des drones.

La ville, en tant que système complexe, a un impact sur l'environnement mesurable à travers diverses thématiques telles que l'artificialisation, l'imperméabilisation, la biodiversité, la qualité de l'air et de l'eau, les nuisances sonores, ou le réchauffement climatique, entre autres. La télédétection, avec sa variété d'images disponibles, permet la réalisation de diagnostics (inventaires), d'études d'impact, de suivis temporels, et même de prospectives territoriales. Les questions de recherche dans ce domaine sont à la fois d'ordre scientifique et méthodologique, portant par exemple sur :

- **Le suivi de l'étalement urbain :** Consiste à évaluer la croissance territoriale des zones urbaines en impliquant l'analyse de divers paramètres tels que l'artificialisation des sols ou la consommation des espaces agricoles. La disponibilité de données spatio-temporelles peut grandement améliorer la formulation de stratégies de développement urbain éclairées et efficaces.
- **La caractérisation de la morphologie urbaine :** Est nécessaire pour comprendre l'impact des espaces urbanisés sur les échanges radiatifs et énergétiques entre la surface urbaine et la canopée urbaine, cela requiert une connaissance précise des types de surfaces et des matériaux utilisés dans les constructions. Les images multi-spectrales voire hyper-spectrales à haute et très haute résolution spatiale peuvent fournir les informations nécessaires aux modèles météorologiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des impacts de la ville sur son environnement.
- **L'inventaire de la végétation urbaine et la cartographie des espèces :** Sont essentiels dans le contexte actuel où la problématique de la végétation en ville est en pleine expansion. Cela est lié à plusieurs thèmes tels que la biodiversité urbaine, le bien-être des populations urbaines, la qualité du cadre de vie, et l'impact des zones végétalisées sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain ainsi que sur le réchauffement climatique. L'inventaire et la caractérisation des enjeux et des éléments exposés peuvent être définis par télédétection pour des aléas naturels et/ou anthropiques. L'identification des enjeux structurels, des aménités naturelles, ou autres dans des zones à risque peut aider à développer des stratégies d'adaptation pour ces zones.

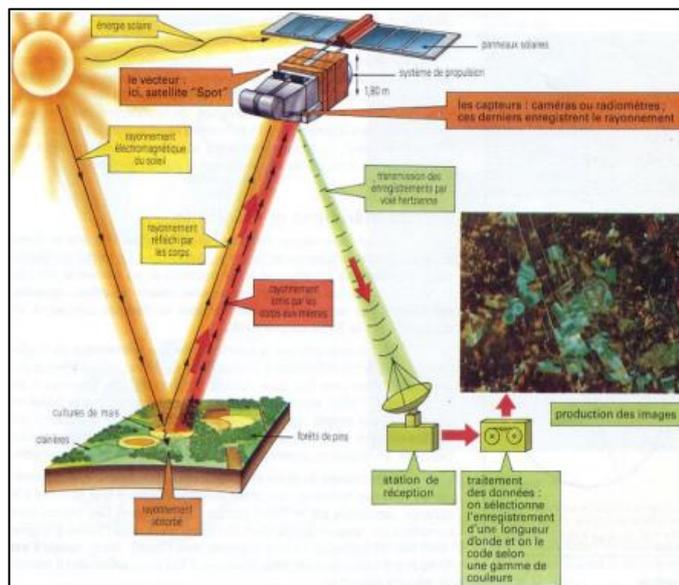


Figure III. 11 : La télédétection spatiale. (Source : Durand, 2019)

III.5.1.2. La méthode de mesures fixes : Consiste à utiliser des stations météorologiques ou des capteurs fixes installés en des emplacements statiques tels que les toits des maisons ou les arbres. Elle vise à fournir des données météorologiques à l'échelle de l'agglomération. Cependant, en raison de leur entretien et de leurs coûts d'installation élevés, ces stations sont rares en milieu urbain. Les stations météo situées à l'extérieur de la ville peuvent servir de points de référence en comparant les écarts de température entre le centre-ville et la périphérie pour caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Par exemple, afin de comprendre la variation spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain en été, Chebli et al. (2020) ont réalisé des mesures fixes et itinérantes à divers endroits dans l'agglomération de Kairouan, en Tunisie.

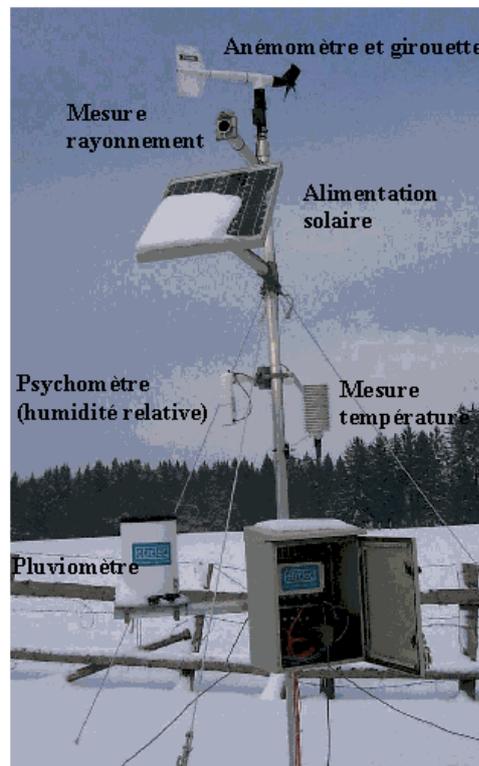


Figure III. 12 : Station météorologique. (Source : echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html)

III.5.1.3. La méthode de mesures instantanées in situ : Consiste à réaliser des mesures sur le terrain, permettant ainsi la collecte immédiate des différents paramètres microclimatiques de l'environnement thermique urbain afin d'estimer le microclimat dans les espaces extérieurs. Il réfère à une méthode la plus fréquemment utilisée lors des études climatiques des phénomènes thermiques à une échelle de quartier-agglomération, utilisant des instruments météorologiques portables tels que le PCE-320, l'AVM-40, le Testo-480, le HD100, etc. Par exemple, les études menées par Chatzidimitriou et Yannas (2017), Elwy et al. (2018), ainsi qu'Ahmadi Venhari et al. (2019) ont utilisé des mesures in-situ pour valider et vérifier la fiabilité des logiciels de simulation.



Figure III. 13 : Les instruments de mesures mobiles. Source : (Ahmadi Venhari et al., 2019)

III.5.2. La méthode de simulation numérique (modèles numériques développés)

Dans le domaine de la prévision du microclimat urbain et dans l'objectif de rendre la complexité des milieux urbains abordable à travers la modélisation 2D et 3D, de nombreux modèles et outils numériques de simulation ont été développés pour soutenir la recherche scientifique, permettant ainsi aux concepteurs d'améliorer le confort thermique extérieur.

D'après Benzerzour (2005), la modélisation numérique urbaine s'articule autour de deux méthodes de simulation déployées au niveau de la canopée urbaine, qui prennent en considération la surface urbaine : la modélisation par discrétisation spatiale par maillage et par paramétrisation 2D et 3D. Cette classification a été établie en fonction des échelles spatiales du climat, allant de l'échelle climatique méso à l'échelle climatique locale, jusqu'à l'échelle microclimatique. Suivant cette classification, nous allons présenter les modèles numériques les plus utilisés dans la climatologie urbaine.

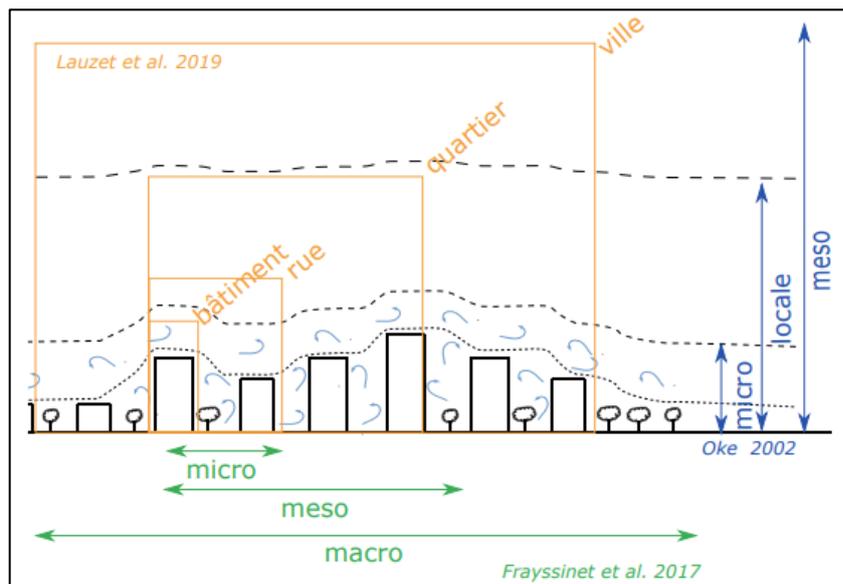


Figure III. 14: Les échelles de la simulation urbaine. (Source : Azam, 2021)

III.5.3. La modélisation par discrétisation spatiale par maillage

Cette méthode est applicable à des échelles microclimatiques plutôt qu'à des échelles locales. La simulation vise à étudier l'influence de la morphologie urbaine sur le confort thermique des usagers ; il est donc obligatoire de représenter explicitement la scène urbaine à l'échelle du quartier pour atteindre son but de simulation (Azam, 2021). Cette approche se focalise sur la reproduction minutieuse du milieu urbain en intégrant le tracé et les hauteurs réelles des espaces, des bâtiments, et des arbres.

Cette approche repose sur l'application d'un maillage assez fin des surfaces et des éléments de la canopée urbaine, permettant ainsi d'analyser les mécanismes de propagation des phénomènes physiques d'une maille à une autre. Parmi les logiciels utilisant cette méthode, on peut citer :

III.5.3.1. Le modèle RayMan

Ce modèle a été développé par Matzarakis et al. (2007) en Allemagne et permet le calcul et l'estimation de divers paramètres liés au microclimat urbain. Il inclut la température moyenne radiante (TMR), le facteur de vue du ciel (SVF), la durée d'ensoleillement, l'ombre, le rayonnement global, ainsi que les effets des nuages, dans des environnements simples et complexes. RayMan est apte à estimer les indices thermiques modernes utilisés en biométéorologie humaine, en intégrant le calcul des flux d'énergie du corps humain ainsi que des paramètres corporels pertinents (Matzarakis, 2012).

Ce logiciel prend en compte les structures complexes des bâtiments, adaptées à des fins de planification à différents niveaux, du micro au régional. Le résultat principal du modèle est le calcul de la température radiante (TMR), une grandeur cruciale pour l'équation du bilan énergétique humain et de ce fait, pour l'évaluation du bioclimat thermique (Matzarakis et al., 2007; Matzarakis et al., 2010).

RayMan permet de calculer la durée du soleil pour chaque jour de l'année, représentée graphiquement. Il évalue l'ombrage par les obstacles urbains (constructions) et naturels (arbres à feuilles caduques et conifères) pour chaque jour et chaque période spécifique de la journée, quantifiant les zones où les ombres se produisent et influencent les flux de rayonnement.

Il autorise également le calcul des moyennes horaires, journalières et mensuelles des flux de rayonnement à ondes courtes et à ondes longues. De plus, il permet le calcul thermiques tels que PMV, PET, UTCI, SET*, PT, et mPET peuvent également être calculés.

Une évaluation complète de la biométéorologie humaine pour chaque type de paysage ou de structure urbaine est possible grâce aux résultats du modèle RayMan.

Les données d'entrée introduites dans RayMan comprennent des données météorologiques de localisation telles que la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air, le rayonnement global et la couverture nuageuse. Des données topographiques et des données sur la morphologie urbaine (obstacles artificiels et naturels), ainsi que des images fish-eye nécessaires pour le calcul du facteur de vue du ciel (SVF), peuvent être estimées soit en dessinant manuellement le contexte urbain. Il existe également d'autres données liées à la morphologie urbaine qui peuvent être ajustées facilement, telles que l'albédo, le rapport de Bowen et la turbidité de l'air.

Plusieurs études recommandent l'utilisation du logiciel RayMan dans le domaine de la climatologie urbaine (Lin et al., 2010 ; Matallah et al., 2020) en raison de sa facilité d'utilisation, de son temps d'exécution rapide et de sa gratuité. Cependant, son inconvénient réside dans la limitation du calcul pour des points uniques (Matzarakis et al., 2007).

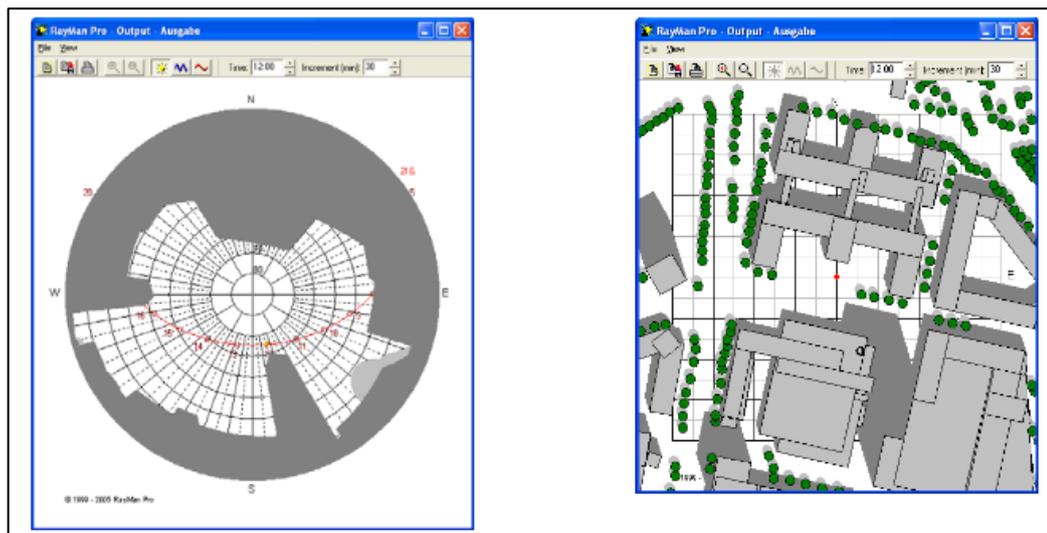


Figure III. 15 : Le calcul du SVF et la modélisation de l'environnement urbain avec le modèle RayMan. (Source : Matzarakis et al., 2007).

III.5.3.2. Le modèle SkyHelios

SkyHelios est un nouvel outil appliqué en climatologie urbaine, représentant un développement ultérieur du modèle RayMan. Il s'agit d'un modèle urbain à micro-échelle, conçu pour estimer les paramètres cruciaux de l'environnement urbain. Ce modèle fonctionne en régime permanent, indépendamment du temps, et a la capacité d'estimer plusieurs indices thermiques tels que PET, UTCI, PT et mPET.

De manière significative, SkyHelios peut calculer principalement le facteur de vue du ciel (SVF) ainsi que différents facteurs environnementaux en haute résolution spatiale et

temporelle en utilisant le processus graphique. Ces facteurs incluent la durée d'ensoleillement, l'ombrage, la vitesse et la direction du vent, spécifiques à des zones d'intérêt (AOI) et des points d'intérêt (POI). En créant des scènes virtuelles tridimensionnelles (3D) à partir de géo-informations urbaines 3D, telles que CityGML LOD 0,1 et 3D-Shapefiles, SkyHelios peut être considéré comme un modèle de ville 3D. Toutes les entités 3D de la scène 3D sont basées sur des géo-données vectorielles, permettant la spécification de la résolution spatiale pour tous les résultats sur demande (Matzarakis, 2012 ; Matzarakis et al., 2021).

L'avantage principal du modèle SkyHelios réside dans sa rapidité d'exécution et sa gratuité. Sa capacité à effectuer des évaluations rapides permet le calcul de longues séries temporelles, facilitant ainsi l'analyse de plusieurs scénarios pour soutenir la planification urbaine (Matzarakis, 2021).

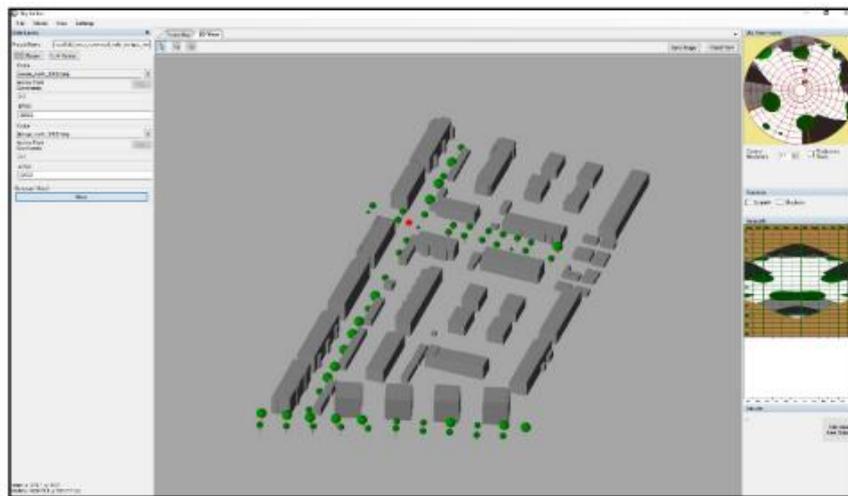


Figure III. 16 : Fenêtre principale de SkyHelios montrant une scène 3D. (Source : Matzarakis et al., 2021)

III.5.3.3. Le modèle ENVI-met

Le modèle ENVI-met est un programme numérique développé en 1998 par Michael Bruse en Allemagne, visant à prédire le microclimat dans les contextes urbains. C'est un modèle holistique non hydrostatique tridimensionnel conçu pour simuler les échanges interactionnels entre la surface, les plantes et l'air. Les modules de calcul d'ENVI-met regroupent un nombre important de disciplines scientifiques, en intégrant la dynamique des fluides, la thermodynamique, la physiologie des plantes et la science du sol. Le principe directeur d'ENVI-met consiste à inclure ces différentes approches dans un modèle unique, permettant à tous les éléments d'interagir entre eux et de reproduire les synergies observées. Il est fréquemment employé pour simuler des environnements urbains et évaluer les conditions thermiques extérieures. La résolution horizontale varie généralement de 1 à 10 mètres, avec des périodes de simulation allant jusqu'à 5 jours.

La taille de la zone du modèle se situe généralement entre 50×50 et 500×500 cellules de grille horizontalement, et entre 20 et 50 cellules de grille verticalement. Une application très typique serait une comparaison de deux scénarios (scénario de base par rapport à un cas vert) analysés sur une période de 48 heures, ayant une taille de zone de $250 \times 250 \times 30$ cellules de grille (X, Y, Z) à une résolution de 3 mètres, ce qui aboutit à une zone de 750×750 mètres (www.envi-met.com).

ENVI-met offre une multitude d'outils pour simuler et analyser le microclimat ainsi que le confort thermique d'une zone. Dans une étude exemplaire, des stratégies d'adaptation au climat peu invasives visant à atténuer l'excès de chaleur en milieu urbain ont été développées. Afin de quantifier les mesures optimales de la stratégie d'adaptation, la même zone a été simulée avec et sans ces modifications, telles que l'ajout de verdure, d'arbres avec de larges couronnes, d'étendues d'eau, ainsi que des interventions sur les bâtiments (www.envi-met.com).

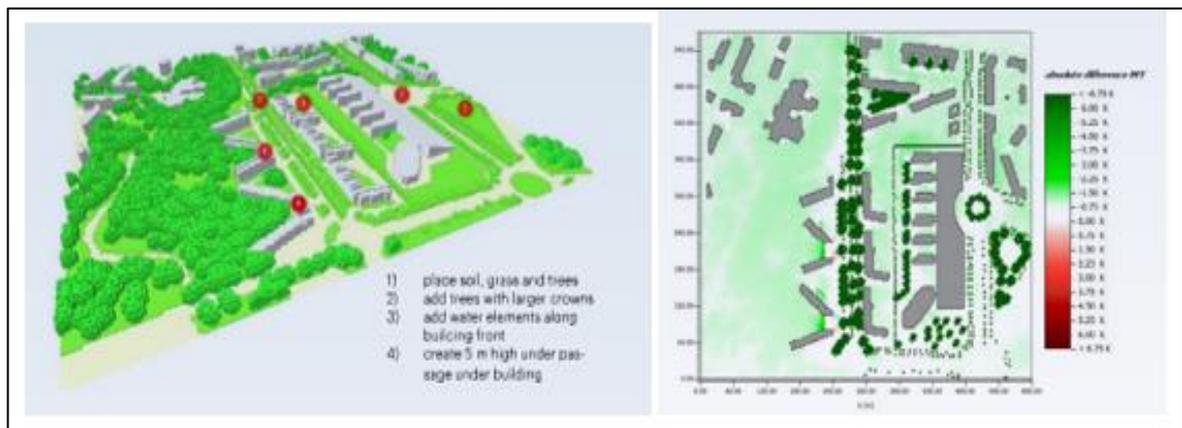


Figure III. 17 : Cas d'étude sur les stratégies d'adaptation au climat simulées avec ENVI-met, 2019. (Source : www.envi-met.com)

III.5.3.4. Le modèle SOLENE-microclimat

SOLENE-microclimat, développé depuis les années 1990 dans le laboratoire (CRENAU) de l'École d'Architecture de Nantes, représente un simulateur numérique conçu pour modéliser le climat urbain à l'échelle d'un quartier. Cet outil vise à analyser l'effet de l'environnement bâti sur les paramètres microclimatiques régissant le climat urbain, tels que la température, l'ensoleillement, le vent, etc., ainsi que sur le confort thermique et les consommations énergétiques des bâtiments. SOLENE-microclimat offre la possibilité d'examiner l'efficacité de diverses stratégies de rafraîchissement urbain, incluant la forme urbaine, la végétation, les surfaces d'eau, le choix des matériaux, etc. Il permet également la comparaison de différentes solutions d'aménagement urbain et la considération de scénarios prospectifs liés au changement climatique.

Ce modèle combine un outil de calcul d'ensoleillement (SOLENE), des modèles de paroi, un modèle de thermique du bâtiment, et un outil de mécanique des fluides numériques (CFD). Lorsqu'il est utilisé à l'échelle du quartier, SOLENE-microclimat offre la possibilité de calculer avec une résolution très précise, de l'ordre du mètre carré, des distributions de l'ensemble des paramètres climatiques tels que l'ensoleillement, la température de surface, la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent (Morille, 2018 ; Sadek, 2022).

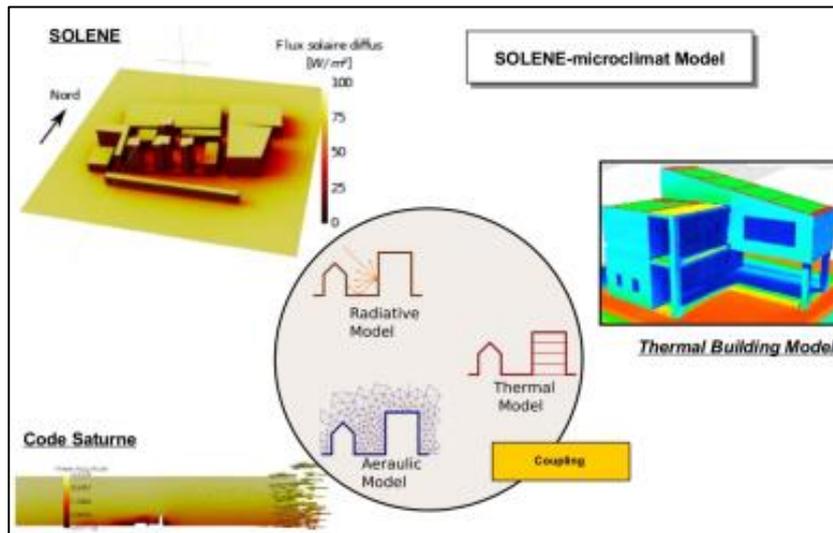


Figure III. 18 : Le modèle SOLENE-climat. (Source : Morille, 2018)

III.5.3.5. Le logiciel Lady bug tools

Ladybug Tools regroupe un ensemble d'applications informatiques gratuites dédiées à la conception environnementale. Parmi tous les progiciels de conception environnementale disponibles, Ladybug Tools se distingue comme l'un des plus complets. Il établit des connexions entre les interfaces de conception assistée par ordinateur (CAO) 3D et une variété de moteurs de simulation validés (www.ladybug.tools). Il est principalement accessible par le biais d'une série de plugins Grasshopper de la programmation visuelle, associé au logiciel de modélisation Rhinoceros, et plus récemment, l'accès est également possible via Dynamo en association avec Revit. Ladybug Tools propose plusieurs modules, dont :

- **Ladybug** : Ce module facilite l'importation des fichiers météo EnergyPlus standard dans Grasshopper, simplifiant la création de graphiques interactifs 2D et 3D. Il offre une analyse détaillée des données climatiques, permettant la production de visualisations personnalisées et interactives pour une conception respectueuse de l'environnement. Il est principalement dédié aux études de rayonnement solaire, d'ombre et au confort thermique extérieur.
- **Honeybee** : Ce plugin crée, exécute et visualise des simulations de lumière du jour en utilisant des modèles de rayonnement et d'énergie avec OpenStudio et EnergyPlus.

- **Butterfly** : Ce plugin Grasshopper/Dynamo et la bibliothèque Python permettent la création et l'exécution de simulations avancées de dynamique des fluides computationnelle (CFD) à l'aide d'OpenFOAM. Il inclut des simulations extérieures pour modéliser les modèles de vents urbains et analyse le confort thermique extérieur.
- **Dragonfly** : Facilite la création de modèles à l'échelle du quartier pour effectuer des simulations énergétiques avec URBANopt, la simulation d'infrastructure électrique avec OpenDSS, l'optimisation des énergies renouvelables avec REopt, et la modélisation des flots de chaleur urbains avec Urban Weather Generator (UWG).

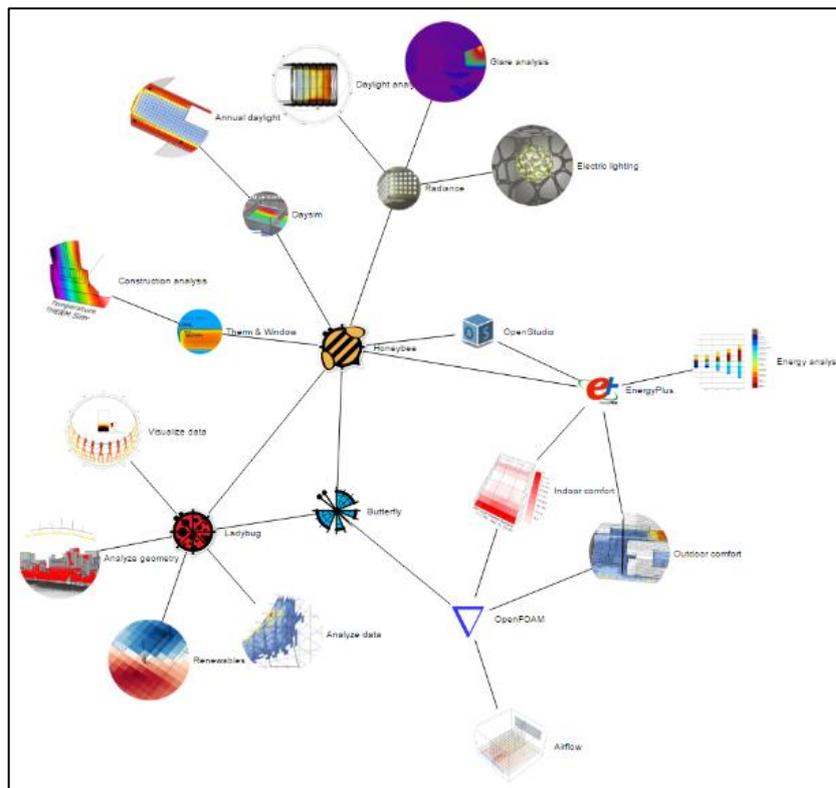


Figure III. 19 : Ladybug Tools. (Source: <https://www.food4rhino.com/en/app/ladybug-tools>)

III.5.4. La modélisation par paramétrisation

Cette méthode est appliquée à des échelles climatiques plus larges. Dans cette perspective, le but est de simuler des phénomènes à grande échelle spatiale comme le phénomène d'îlot de chaleur urbain, notamment à l'échelle méso et à l'échelle locale (Azam, 2021). Pour surmonter les défis liés à la complexité de reproduire intégralement la ville, des hypothèses ont été formulées afin de réduire cette difficulté à un ensemble de paramètres jugés suffisamment représentatifs de la forme urbaine. Sur la base de ces paramètres, deux modèles ont été développés :

III.5.5. La modélisation paramétrique 2D

La modélisation par paramétrisation a négligé, dans les modèles initiaux développés, un bon nombre de paramètres importants des phénomènes physiques liés à la troisième dimension (3D) de la surface urbaine. Parmi ces modèles, on trouve :

III.5.5.1. Le modèle SM2U (Sub-Meso Soil Model Urbain)

SM2U (Dupont, 2001), développé à l'École Centrale de Nantes, présente une extension du modèle appliqué à un sol naturel, appelé SM2 (Sub-Meso Soil Model). Ce modèle permet de simuler à la fois les échanges thermiques, hydriques, et radiatifs entre le sol et l'atmosphère à une échelle spatiale allant de l'échelle Sub-Méso (une échelle entre l'échelle locale et l'échelle Méso) jusqu'à l'échelle Méso.

III.5.5.2. Le modèle LUMPS (Local-scale Urban Meteorological pre-processing Scheme)

Ce modèle (Grimmond et Oke, 2002) est un schéma de prétraitement urbain qui fait usage de paramétrisations nécessitant des observations météorologiques standard, complétées par des connaissances de base sur les caractéristiques de surface de la zone urbaine cible (Fisher et al, 2005). Il permet l'évaluation du bilan énergétique résultant de la surface urbaine, en prenant en compte le rayonnement net comme source principale d'énergie.

III.5.6. La modélisation paramétrique 3D

La modélisation paramétrique 3D prend en considération la troisième dimension. Elle s'applique à des échelles spatiales locales et méso.

III.5.6.1. Le modèle TEB : L'abréviation de (Town Energy Balance), TEB, est un modèle qui représente la ville comme un agencement de canyons urbains. Il bénéficie de l'acceptation de la communauté scientifique en climatologie urbaine, corroborée par des campagnes de mesures réalisées en sites urbains. Le couplage se fait de manière itérative, consistant d'abord à récupérer les températures des surfaces calculées par TEB. Ces dernières sont ensuite introduites dans EnergyPlus en tant que conditions d'adjacence pour les parois du bâtiment. Ce choix est motivé par le fait qu'EnergyPlus simplifie le calcul du rayonnement de grande longueur d'onde entre les surfaces qui composent l'enveloppe du bâti et les surfaces urbaines environnantes.

Le modèle TEB constitue un modèle physique permettant de paramétrer des processus complexes radiatifs, énergétiques, hydriques et turbulents aux interfaces entre les surfaces artificielles bâties et l'atmosphère, au prix d'une géométrie urbaine quelque peu simplifiée (voir Figure 3.3). Dans sa version originale, le paysage urbain est représenté par un réseau de rues

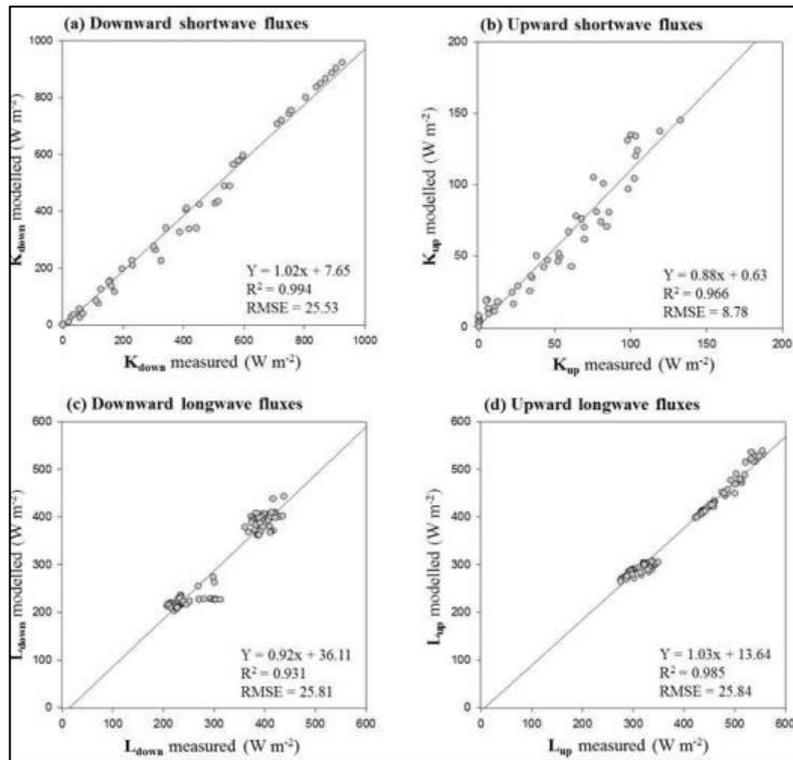
canyon de longueur infinie sans intersections et dont les directions sont équiprobables. Chaque point du territoire urbanisé se voit attribuer les caractéristiques génériques du canyon auquel il appartient (rapport d'aspect, hauteur du bâti, propriétés thermiques et radiatives des composants - toitures, murs, chaussées). Cette hypothèse, qui peut paraître simplificatrice, est cependant assez réaliste à une haute résolution spatiale (100-200 m).

III.5.6.2. Le logiciel SOLWEIG

Le modèle Solar LongWave Environmental Irradiance Geometry (SOLWEIG) est un logiciel informatique qui simule les variations spatiales en 3D de la température moyenne radiante, des flux de rayonnement à ondes longues et courtes, ainsi que les modèles d'ombre dans des environnements urbains complexes. SOLWEIG, développé par le groupe de Climat Urbain de Göteborg, est incorporé dans le prédicteur environnemental multi-échelle urbain (UMEP) (Gaitani et al., 2018).

Le modèle requiert un ensemble restreint de données d'entrée, comprenant le rayonnement direct, diffus et global à ondes courtes, la température de l'air, l'humidité relative, ainsi que la géométrie urbaine représentée par des modèles numériques (DEM) du sol et des bâtiments à haute résolution, ainsi que les informations géographiques (latitude, longitude et altitude) (Lindberg et al., 2008 ; Lindberg et Grimmond, 2011).

Selon une étude menée par Lindberg et al. (2018) à Séoul, les résultats de corrélation indiquent que le modèle simule assez précisément les changements et les valeurs des flux radiants dans les zones résidentielles, soulignant ainsi la faisabilité d'obtenir une évaluation détaillée de la vulnérabilité thermique en utilisant le modèle SOLWEIG.



Graph III.3 : Les valeurs de corrélation des flux radiatifs mesurés et simulés. (Source : Lindberg et al., 2018)

III.6. Positionnement méthodologique

III.6.1. L'approche adoptée dans l'étude de l'influence de la morphologie urbaine sur le climat urbain

Dans cette section, nous mettrons en lumière l'une des approches largement utilisées par les chercheurs pour analyser l'impact de la morphologie urbaine sur le climat urbain : la démarche d'investigation.

La démarche d'investigation est définie comme « un processus intentionnel de diagnostic des problèmes, de critique des expériences réalisées, de distinction entre les alternatives possibles, de planification des recherches, de recherche d'hypothèses, de recherche d'informations, de construction de modèles, de débat avec ses pairs et de formulation d'arguments cohérents » (Linn, David et Bell, 2004 : cité par Rocard et al., 2007).

Cette démarche d'investigation repose sur des principes fondamentaux et des étapes d'organisation, commençant par le questionnement initial (problématique) pour aboutir à l'interprétation des résultats et à la validation ou non des hypothèses posées. Cette démarche s'effectue selon plusieurs méthodes, s'appuyant sur le modèle de Dominique Rojat, qui propose six phases pour la démarche d'investigation (Gigan et Duchemann, 2020) :

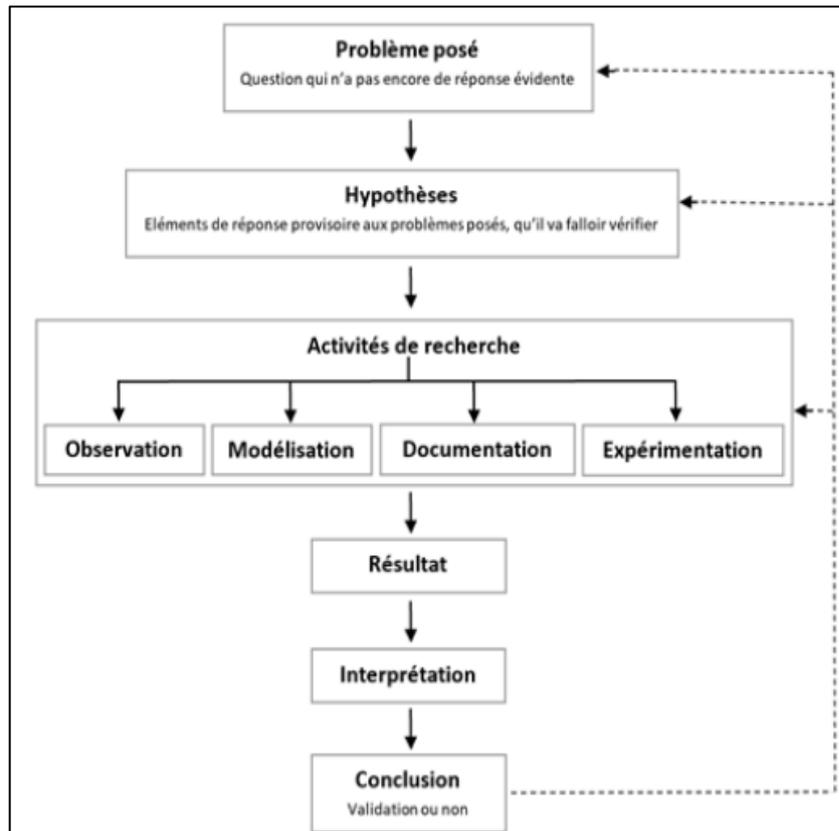


Figure III. 20 : Le processus de la démarche d'investigation. (Source : Gigan et Duchemann, 2020)

La démarche d'investigation se décline en plusieurs méthodes présentant un ensemble de processus suivis par le chercheur afin d'aboutir à un résultat. Ces méthodes sont utilisées conformément aux besoins dictés par sa recherche.

Dans notre travail de recherche, la démarche d'investigation s'avère la plus adéquate aux objectifs de notre recherche, en s'appuyant sur trois méthodes complémentaires : la télédétection comme moyen de mesures à distance, les mesures instantanées réalisées sur le terrain, et enfin la simulation numérique.

III.6.1.1. La première méthode (La télédétection) : Elle fait appel à la télédétection spatiale par le biais d'images satellitaires telles que Landsat 5, 7 et 8. Les images thermiques de surfaces (LST) permettent de traduire l'énergie émise par les surfaces urbaines. Cette méthode est considérée comme l'unique permettant une grande possibilité de quantifier les températures de surfaces au niveau du sol à grande échelle et d'établir une description spatio-temporelle du phénomène d'îlot de chaleur urbain surfacique (ICUs) (Lebaut, Hassani et Drogue, 2022).

Cette méthode illustre la variation spatiale des températures de surfaces (LST) diurnes de la ville de Batna pour différentes périodes (1986, 2000, 2019). Cette étape est d'une grande importance, car elle permet de mettre en évidence la relation entre la densité et la compacité

urbaines de la ville de Batna avec les variations des températures de surfaces au niveau du sol (LST). Elle permet également de corréler les températures surfaciques avec l'occupation du sol).

Afin d'étudier la densité et la compacité urbaines de la ville de Batna, nous avons eu recours aux Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les données de télédétection spatiale seront traitées par le SIG, fournissant la possibilité de générer des solutions efficaces par l'analyse et l'interprétation des données satellitaires. Les SIG permettent de calculer efficacement la densité et la compacité urbaines de la ville de Batna à travers une étude diachronique pour les périodes (1986, 2000, 2019). L'étude de l'évolution spatio-temporelle apporte des informations importantes sur l'effet de la morphologie urbaine sur le climat urbain.

III.6.1.2. La deuxième méthode (Les mesures in situ) : Cette méthode concerne l'application de mesures in situ à l'aide d'instruments de mesure, permettant de réaliser des relevés instantanés des paramètres climatiques dans nos cas d'étude. Elle constitue le moyen privilégié pour ceux qui visent à révéler les ambiances thermiques en milieu urbain, fournissant une assise pour le diagnostic du phénomène d'îlot de chaleur urbain au niveau de la couche de canopée urbaine. Ces mesures incluent la température de l'air ainsi que d'autres facteurs climatiques tels que la température moyenne radiante, l'humidité et la vitesse du vent, qui ont un impact sur le confort thermique dans les espaces extérieurs étudiés.

C'est une méthode qui offre plus de détails par rapport à la première, car elle se fait à une échelle plus réduite que celle de la ville. Elle s'effectue à l'échelle du quartier, ce qui nous permet d'étudier de manière précise l'impact des indicateurs morphologiques et géométriques sur le microclimat, notamment le confort thermique dans les espaces extérieurs.

III.6.1.3. La troisième méthode (La simulation numérique) : Elle repose sur la simulation numérique, permettant une évaluation pertinente de l'effet de la morphologie des milieux urbains sur les paramètres microclimatiques, et la quantification du confort thermique extérieur dans les tissus urbains choisis pour l'investigation.

La méthode numérique permet également la création des différents aménagements urbains à travers des scénarios, qui seront expliqués en détail dans les prochains chapitres (05 et 06). Cette méthode est basée sur l'application numérique via le logiciel tridimensionnel ENVI-met 4.4.6, qui sera notre sujet d'étude dans le chapitre 05.

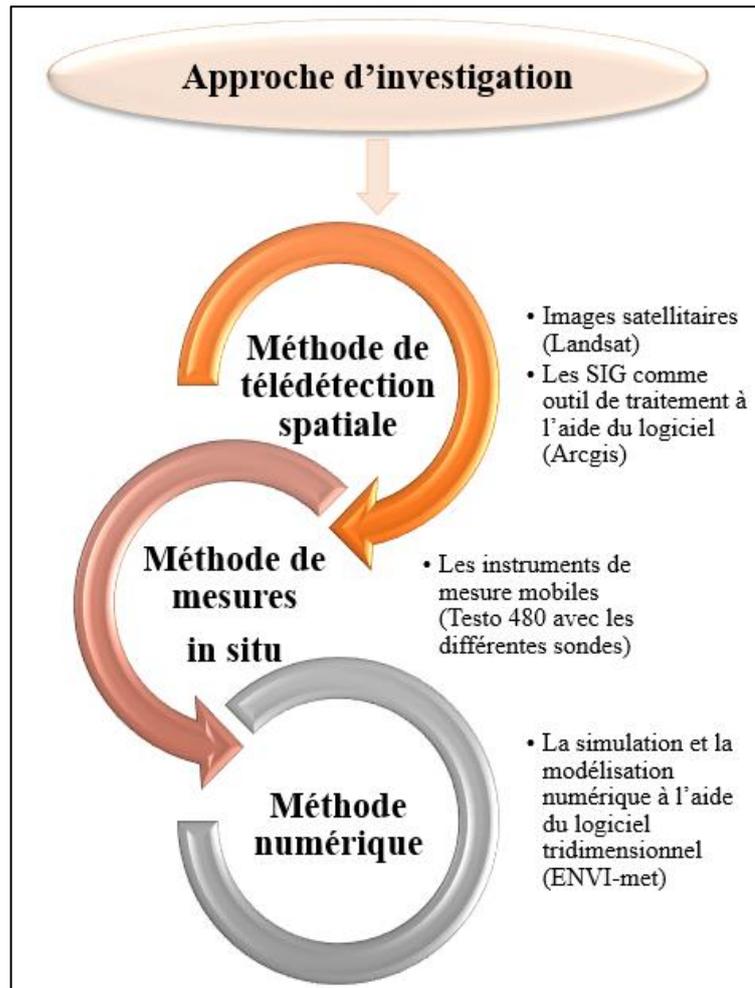


Figure III. 21 : Les démarches appliquées pour le présent travail de recherche. (Source : Auteure, 2021)

Conclusion

Ce chapitre a exploré l'état de l'art à travers une série d'études antérieures mettant en relation la morphologie urbaine à différentes échelles (échelle de la ville, échelle du tissu urbain et échelle de l'espace public) avec le domaine de la climatologie urbaine. Ces études antérieures nous ont permis d'exposer leurs résultats de manière concise afin de tirer des synthèses et des méthodes qui seraient utiles pour nos objectifs de recherche ciblés.

D'après les résultats de ces recherches, plusieurs méthodes de caractérisation du climat en milieu urbain ont été identifiées. Certaines études se basent principalement sur l'investigation à distance à l'aide de la télédétection spatiale, devenue un moyen incontournable dans le domaine de la cartographie urbaine et de la climatologie, permettant d'étudier les phénomènes urbains et climatiques à une échelle spatiale plus vaste (échelle macro).

Cependant, d'autres études reposent sur les mesures sur le terrain, la surveillance instantanée, ou sur l'expérimentation et la simulation numérique, devenue un processus

indispensable pour la recherche scientifique grâce à la gratuité de certains modèles et à leur rapidité d'acquisition des résultats de simulation.

Nous avons ainsi présenté un ensemble de modèles numériques largement utilisés dans la quantification du microclimat urbain et dans l'évaluation des interactions entre les paramètres microclimatiques et la morphologie de la forme urbaine sur le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs. Parmi ces modèles numériques, citons le logiciel ENVI-met, qui sera notre logiciel choisi pour la simulation et qui sera approfondi dans les futurs chapitres.

Sans oublier la présentation de l'approche de recherche adoptée pour notre travail, qui constituera une démarche d'investigation réunissant un ensemble de méthodes scientifiques pertinentes afin d'apprécier les répercussions de la morphologie urbaine sur le microclimat et le bien-être thermique dans les espaces extérieurs urbains. Ces méthodes comprennent respectivement la technique de la télédétection spatiale, la campagne de mesures sur le terrain, et enfin la simulation numérique. La combinaison de ces trois méthodes se révèle indispensable selon les objectifs soulignés de notre recherche.

Partie pratique

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

« La Science porte sur la quantité et s'exerce au
moyen de la mesure »

(Ullmo, 1969, p 23)

Introduction

Les chapitres précédents posent une plate-forme théorique permettant d'aborder la partie pratique de notre recherche. Cette partie repose sur une série de chapitres qui présente un enchaînement logique dans l'objectif d'étudier l'effet de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

Ce chapitre sert de point d'articulation entre l'interprétation des résultats d'investigation ; dans un premier temps, cette étude s'appuie sur la télédétection spatiale menée pour la ville de Batna, sélectionnée comme cas de recherche. Cette approche nous offre la possibilité d'étudier les conséquences de la morphologie urbaine sur le climat urbain à l'échelle de la ville. La méthode a démontré son efficacité dans l'analyse des données extraites à partir d'images satellitaires telles que celles provenant des satellites (Landsat, Sentinel, SPOT...) offrant une échelle locale ou globale, pour détecter les changements spatio-temporels au fil des décennies. Pour notre cas d'étude, nous avons utilisé des données des images du capteur Landsat pour étudier la répartition spatio-temporelle de la tache urbaine et ses répercussions sur le climat urbain de la ville de Batna, en étudiant le phénomène d'îlot de chaleur urbain à travers la température de surface du sol (LST), enregistrée pour une journée typique, pendant la période de surchauffe pour différentes périodes de temps, d'un intervalle d'une quinzaine d'années de 1986, 2000 jusqu'à 2019 qui présente l'année d'investigation.

La température de surface du sol est considérée comme un paramètre impératif dans l'analyse du bilan énergétique de surface et dans l'étude des îlots de chaleur surfaciques. Son augmentation est principalement liée aux interactions énergétiques entre l'atmosphère et les surfaces terrestres (Sekertekin et Bonafoni, 2020 ; Gherraz, 2021).

Ensuite, nous procéderons à un échantillonnage morphologique pour choisir les tissus urbains les plus convenables à notre objectif d'étude, basé sur les résultats de la télédétection spatiale et des critères morphologiques, comprenant principalement un ensemble d'indicateurs morphologiques tels que la densité et la compacité urbaines, et géométriques tels que le prospect H/L et le FVC. Ces indicateurs morphologiques et géométriques sont des éléments déterminants dans la création des ambiances thermiques extérieures, comme le suggère la littérature scientifique portant sur l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

Les tissus urbains qui constitueront notre cas d'étude sont des quartiers résidentiels principalement choisis en fonction de leur densité urbaine. Cela nous aidera à comprendre la

relation entre la densité et la compacité urbaines ainsi que les indicateurs géométriques (le ratio H/L et FVC).

Les instruments utilisés lors de la campagne de mesures comprenaient un appareil multifonctionnel, le Testo 480, équipé d'un capteur de pression différentielle haute précision pour les mesures. Cet appareil est doté de différentes sondes permettant la mesure de la température de l'air (T_a), de l'humidité relative de l'air (HR), de la vitesse de l'air (V_a) et de la température du globe noir (T_g). D'autre part, cette phase d'investigation a permis de réaliser diverses comparaisons entre les paramètres climatiques afin de déduire leur influence sur le microclimat.

Les tâches prévues incluent :

- Réaliser une étude diachronique de la ville Batna pour évaluer l'impact de son évolution spatio-temporelle sur le climat local grâce à l'utilisation de la télédétection.
- Effectuer une analyse morphologique des tissus urbains pour sélectionner les échantillons à étudier.
- Comparer les différents indicateurs morphologiques au niveau des tissus urbains et au niveau des stations de mesure.
- Mesurer les différents paramètres climatiques pour chaque tissu urbain et pour chaque station.
- Comparer les différentes variables climatiques mesurées dans les deux échantillons sélectionnés (réaliser une étude comparative).
- Faire une comparaison des paramètres climatiques mesurés sur le terrain avec ceux de la station météorologique de Batna.

IV.1. Présentation générale de la ville de Batna : (Localisation géographique et analyse climatique de la ville de Batna)

Dans les Aurès, la wilaya de Batna est localisée dans la partie orientale de l'Algérie, plus précisément au nord-est du pays. Elle s'inscrit dans une vallée entre deux chaînes montagneuses (l'Atlas tellien et saharien). Avec une altitude supérieure à 900m au-dessus du niveau de la mer, elle est comprise entre les 4° et 7° de longitude est et 35° et 36° de latitude nord. Batna se trouve à une distance de 425km au sud-est d'Alger ; elle est à la croisée de Biskra, Sétif, Constantine et Tébessa. Cette position géographique lui confère des caractéristiques climatiques spécifiques influant sur les conditions de vie humaine.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Batna est édiflée sur un site sous forme de cuvette relativement plate au centre, s'élevant en pente douce en s'éloignant de ce dernier, notamment dans sa partie sud, ce qui a facilité son développement spatial (Benyahia et Dridi, 2017). Couvrant une superficie de 12.038,76Km², et elle occupe le cinquième rang dans la hiérarchie des villes algériennes (Monographie de Batna, 2007).

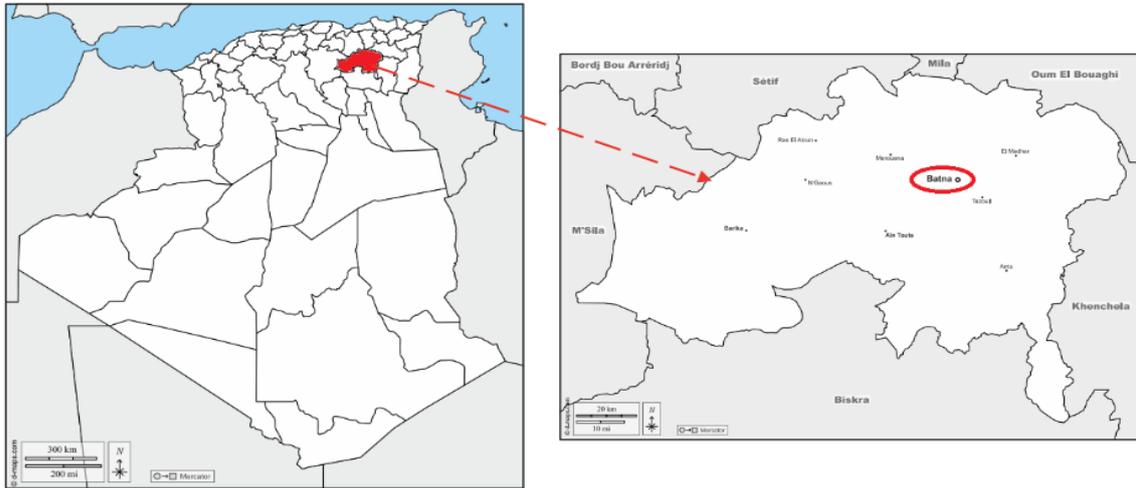


Figure IV. 1: La situation géographique de la wilaya de Batna. (Source : d.maps.com (réadapté par auteure))

La wilaya de Batna est administrativement délimitée par :

- Au nord par la wilaya de Mila
- À l'est par la wilaya de khenchela
- À l'ouest par la wilaya de M'sila
- Au sud par la wilaya de Biskra
- Au nord /ouest par la wilaya de Sétif
- Au nord /est par la wilaya d'Oum El Bouaghi.



Figure IV. 2: Les limites administratives de la wilaya de Batna. (Source : www.google.com/search (Réadapté par auteure))

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

La ville de Batna se localise au nord/est du territoire de la wilaya de Batna. Historiquement considérée comme la capitale des Aurès, elle est à la fois chef-lieu de la wilaya et de la commune de Batna. S'étend sur une superficie totale de 11641 hectares, elle s'élève à 1058m au-dessus du niveau de la mer.

La ville est limitée par les communes suivantes :

- Tazoult au sud,
- Fésdis au nord,
- Ouyoun El Assafer à l'est,
- Oued Chaâba à l'ouest

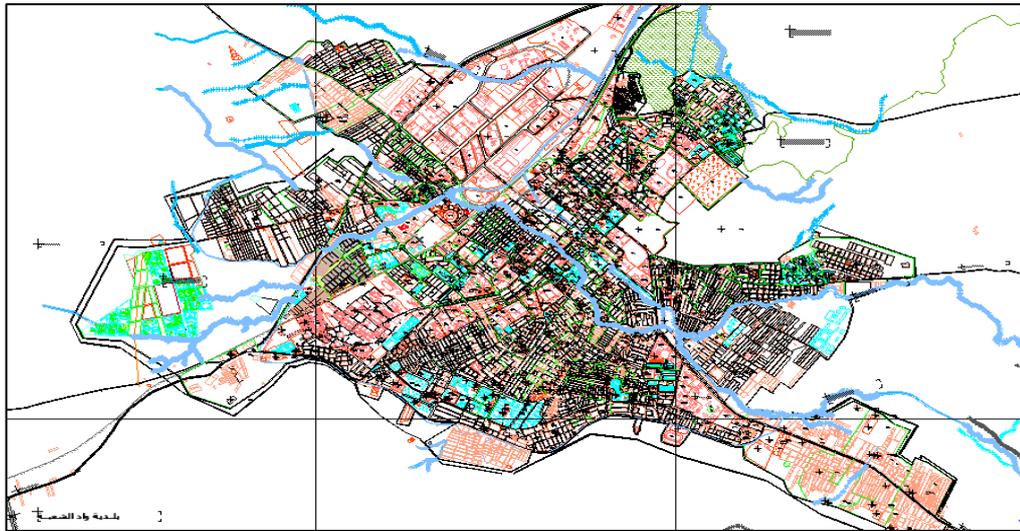


Figure IV. 3 : La ville de Batna. (Source : PDAU, 2017)

Selon les recommandations architecturales algériennes de 1993, le zonage climatique pour l'Algérie présente deux zones distinctes (les zones climatiques d'été et les zones climatiques d'hiver), comme illustré dans la Figure (IV.4). Selon ce zonage, la ville de Batna se caractérise par :

- Un été plus chaud et moins humide (zone E2) avec d'importants écarts de températures diurnes.
- Un hiver très froid et humide (zone H2b : Atlas saharien-montagne / Altitude 1500m), également marqué par des écarts de températures diurnes significatifs. (Ministère de l'habitat, Recommandations Architecturales, ENAG édition, Alger, 1993).

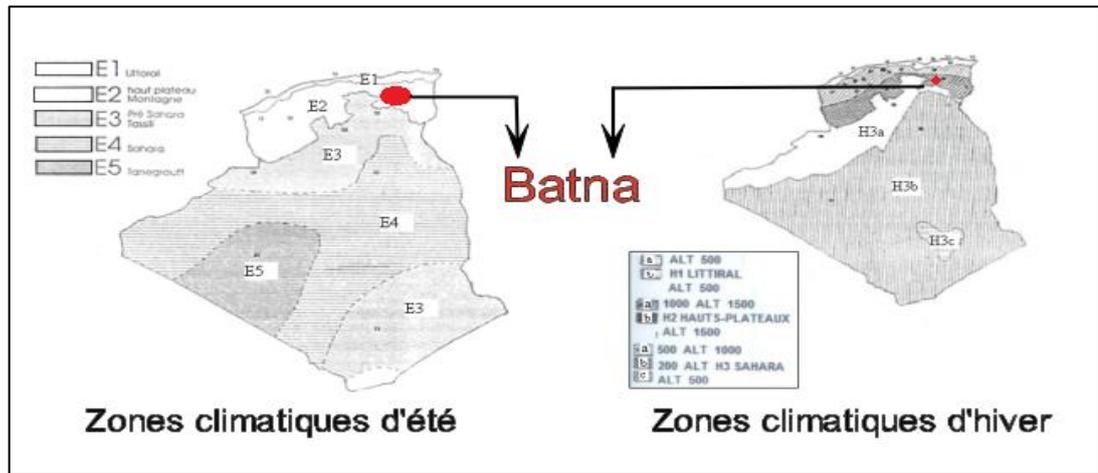


Figure IV. 4: Les zones climatiques d'été et d'hiver en Algérie. (Source : Ministère de l'habitat, Recommandations Architecturales, ENAG, 1993, (Réadapté par auteure))

D'après le zonage climatique établi pour l'Algérie par Borel, la ville de Batna se trouve localisée dans la zone C, désignée comme une zone semi-aride caractérisée par un régime bioclimatique marqué par des saisons bien distinctes. Cette zone, à laquelle appartient Batna, est caractérisée par des températures maximales absolues atteignant 42°C en été et des températures minimales absolues atteignant -5°C en hiver, selon les données de la station météorologique de Batna pour l'année 2019.

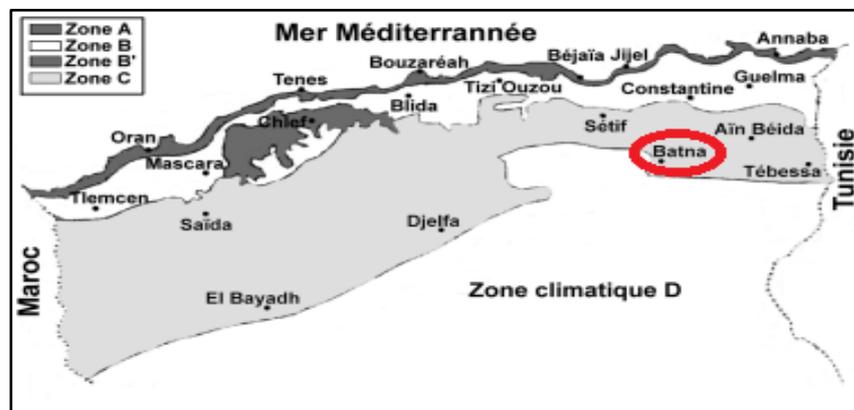


Figure IV. 5: Le zonage climatique de l'Algérie selon Borel. (Source : El Hassar et al., 2002, (Réadapté par l'auteure))

IV.2. Les paramètres climatiques de la ville de Batna

En raison de sa position géographique, Batna bénéficie d'un climat semi-aride, influencé par la topographie de la région et sa proximité du désert du Sahara. Cette combinaison crée un environnement unique caractérisé par des températures extrêmes et des précipitations relativement faibles. La ville profite également d'un taux élevé d'irradiation solaire et d'un taux d'humidité faible, ce qui peut rendre la chaleur plus difficile à supporter pendant la saison chaude.

IV.2.1. La température de l'air

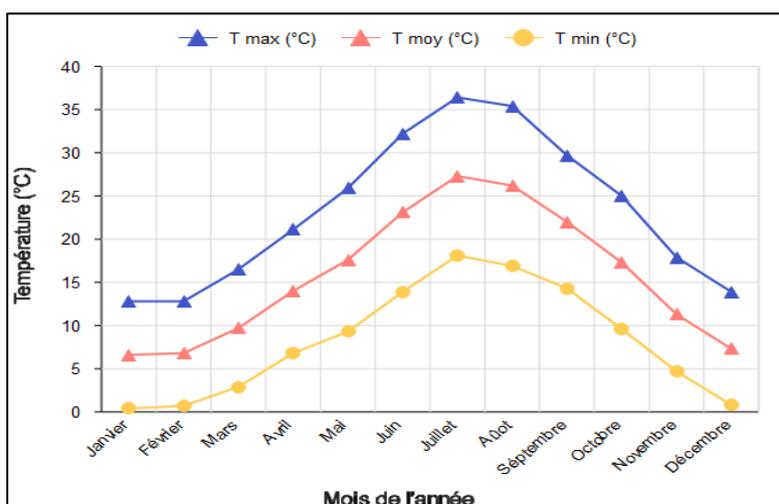
Les données recueillies à la station météorologique de Batna ont été présentées sous forme de tableau (IV.1) et de graphique (IV.1), illustrant la variation mensuelle de la température de l'air sur une décennie (2009-2018) à Batna, en utilisant les données de température maximale (T max), minimale (T min), et moyenne (T moy) enregistrées au cours de cette période.

Les résultats montrent une température maximale annuelle de 23,2°C, avec un pic de 36,4°C en juillet et un minimum de 0,4°C en janvier. Le mois le plus chaud de l'année est juillet, avec une température moyenne de 30,3°C, tandis que le mois le plus froid de l'année est janvier avec une température moyenne de 6,3°C. Cela montre clairement le caractère continental du climat de Batna, avec des hivers froids et des étés chauds.

D'après les données, on remarque également un écart de température important se fait ressentir, particulièrement pendant l'été, avec une variation pouvant atteindre 18,3°C entre le jour et la nuit. En outre, l'écart saisonnier des températures se révèle remarquable, atteignant un seuil de 20,7°C. Cette amplitude notable dans les conditions climatiques explique les disparités observées d'une saison à l'autre.

Tableau IV.1 : Les moyennes mensuelles de la température de l'air de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)

	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Août	Sépt	Oct	Nov	Déc
T moy max (°C)	12.8	12.8	16.5	21.1	25.9	32.2	36.4	35.4	29.7	25.0	17.9	13.9
T moy (°C)	6.6	6.8	9.7	14.0	17.6	23.1	27.3	26.2	22.0	17.3	11.3	7.3
T moy min (°C)	0.4	0.7	2.9	6.8	9.3	13.9	18.1	16.9	14.3	9.6	4.7	0.8



Graph IV. 1: Les moyennes mensuelles de la température de l'air de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)

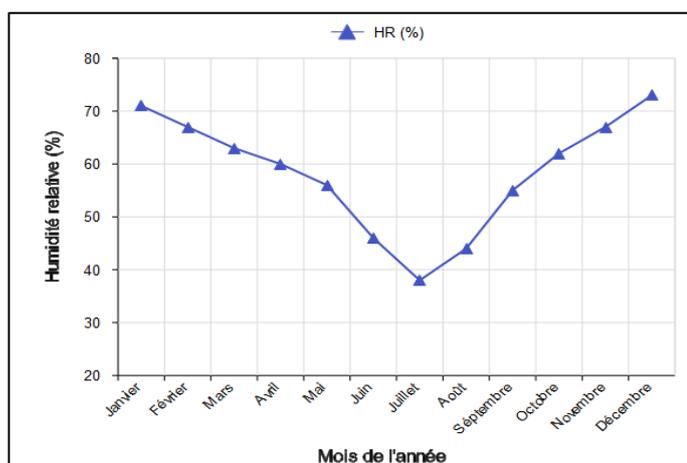
IV.2.2. Humidité relative

D'après les relevés climatiques obtenus de la station de Batna, le tableau (IV.2) et le graphique (IV.2) ci-dessous illustrent les moyennes de l'humidité relative pendant la décennie (2009-2018). Les valeurs démontrent que les taux les plus élevés sont enregistrés pour les mois les plus froids avec un maximum qui atteint une moyenne de 73% au mois de décembre, alors que le minimum est enregistré en juillet, avec une moyenne de 38%.

Les résultats obtenus montrent une augmentation de l'humidité relative pendant la saison hivernale, avec des valeurs dépassant les 70%. Cependant, la période estivale montre des valeurs supérieures à 50%, tandis que le printemps et l'automne présentent des valeurs moyennes.

Tableau IV. 2 : Les moyennes mensuelles de l'humidité relative de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Août	Sép	Oct	Nov	Déc
HR Moy %	71	67	63	60	56	46	38	44	55	62	67	73



Graphe IV. 2 : Les moyennes mensuelles de l'humidité relative de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna)

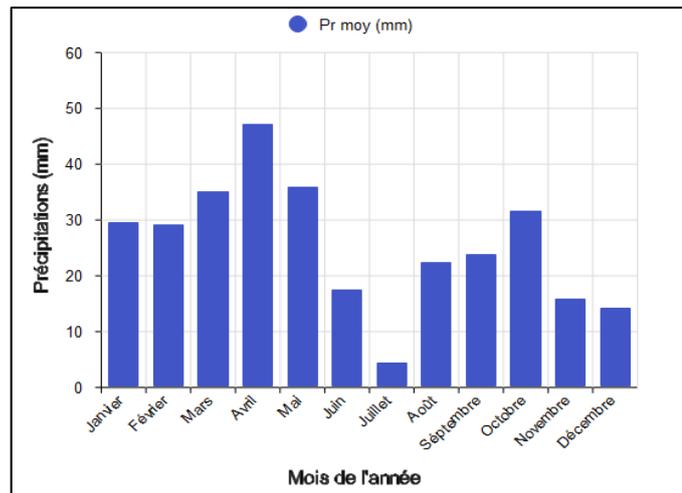
IV.2.3. Précipitations

À travers les données recueillies par la station météorologique de Batna illustrées dans le tableau (IV.3) et le graphique (IV.3), la ville peut connaître des précipitations annuelles allant de 300 à 400mm. Les mois d'avril et de mai se distinguent comme les périodes les plus pluvieuses, enregistrant respectivement des moyennes de 47,1mm et 35,8mm de pluie. En revanche, avec une moyenne de seulement 4,4mm de précipitations, juillet semble être le mois le plus sec de l'année.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Tableau IV. 3 : Les moyennes mensuelles des précipitations de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)

	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Précip Mm	29.5	29.2	35.0	47.1	35.8	17.4	4.4	22.4	23.8	31.5	15.9	14.2



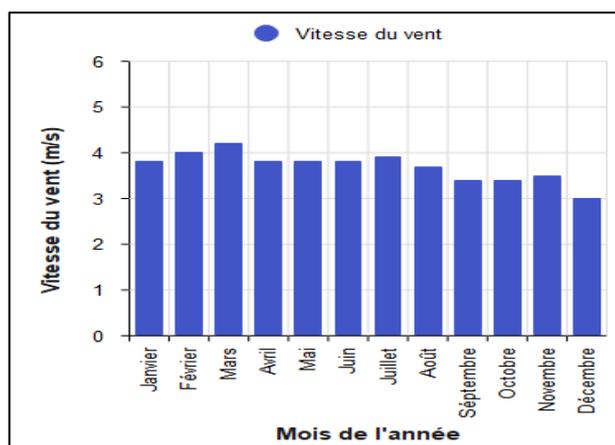
Graphe IV. 3 : Les moyennes mensuelles de précipitations de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)

IV.2.4. Vitesse du vent

Selon les informations illustrées dans le tableau et la représentation graphique (IV.4) qui suit, les vitesses des vents observées à Batna sont caractérisées par leur faible à modéré niveau. Les vents prédominants proviennent du nord-est, correspondant au « siroco » durant la période estivale, et du sud-ouest pour le reste de l'année, dont la valeur maximale est de 4,2m/s enregistrée au mois de mars et une valeur minimale de 3m/s enregistrée au mois de décembre.

Tableau IV. 4 : Les moyennes mensuelles des vitesses du vent de 2009 à 2018. (Source : Station météorologique de Batna, 2019)

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui	Août	Sép	Oct	Nov	Déc
Vent(m/s)	3.8	4	4.2	3.8	3.8	3.8	3.9	3.7	3.4	3.4	3.5	3



Graph IV. 4 : Les moyennes mensuelles des vitesses du vent de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)

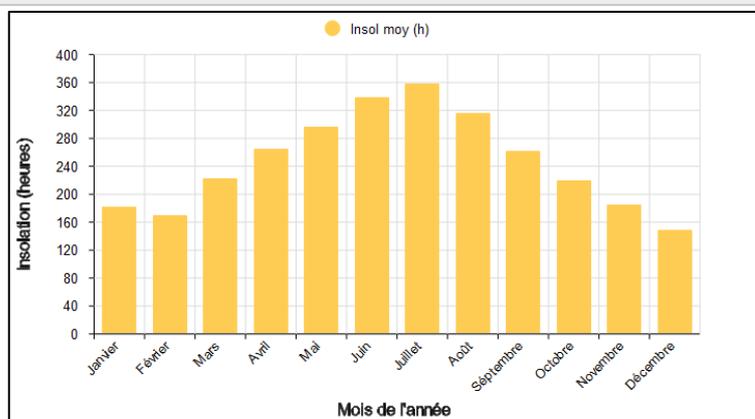
IV.2.5. L'insolation

Les moyennes mensuelles de l'insolation pour les années (2013-2018) sont représentées dans le tableau (IV.5) et le graphique (IV.5) ci-dessous. La durée de l'ensoleillement a souvent été un élément central pour la compréhension des conditions météorologiques, elle est directement liée à la nébulosité et à l'intensité de l'irradiation directe de l'endroit en question.

Juillet s'est avéré être le mois présentant la plus grande exposition solaire avec 358 heures d'ensoleillement, expliquant ainsi en grande partie les conditions thermiques élevées. Cependant, le mois de décembre présente la quantité la plus basse des taux d'ensoleillement, avec seulement 148 heures, en raison de la présence d'une forte nébulosité (ciel couvert de nuages).

Tableau IV. 5 : Les moyennes mensuelles d'insolation de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)

	Janv	Fév	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Insol moy (h)	181	170	222	265	296	338	358	316	262	219	185	148



Graph IV. 5 : Les moyennes mensuelles d'insolation de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)

IV.3. Détermination des isothermes de la ville de Batna :

La grille des isothermes présente différentes zones, comprenant trois périodes distinctes.

(Voir le tableau IV.6) :

Tableau IV. 6 : Isothermes déterminant les différentes zones thermiques de l'année 2018. (Source : Auteure, 2019)

0.00	4.4	3.6	7.9	11.3	13.4	18.9	25.4	20.2	19.6	13.4	7.9	4.5
2.00	3.1	2.6	7.4	9.8	11.9	16.8	23.4	19.1	18.6	12.7	6.9	3.4
4.00	2.4	1.5	6.9	8.6	10.9	15.3	22.0	17.3	17.3	11.4	5.9	2.6
6.00	1.9	0.6	6.5	7.6	9.8	14.1	20.7	16.2	16.6	10.6	4.9	1.1
8.00	1.3	1.0	7.5	10.2	13.5	19.3	25.3	19.3	18.1	14.5	5.7	0.5
10.00	6.2	5.3	12.1	15.4	17.6	23.9	30.7	24.5	23.4	15.8	11.1	6.0
12.00	11.1	8.7	14.2	18.4	20.4	27.3	34.8	28.5	26.9	18.9	14.8	10.9
14.00	13.7	10.5	15.3	19.9	21.8	29.7	36.9	30.3	29.0	20.4	16.8	14.0
16.00	14.3	10.9	15.5	20.7	22.5	30.4	37.9	29.7	28.9	21.2	16.9	14.7
18.00	11.7	9.1	14.3	19.0	21.1	29.0	36.6	27.9	27.0	18.2	13.6	11.8
20.00	7.6	6.2	10.9	15.2	17.4	24.8	31.5	24.0	23.7	15.7	10.9	7.5
22.00	5.8	4.7	9.1	12.5	14.7	21.2	27.2	21.9	21.3	14.5	9.2	5.6
	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sép	Oct	Nov	Déc

- **Zone de sous-échauffement :** Elle couvre les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre, représentant la période avec la température la plus basse de l'année. Durant ces mois, les températures sont fréquemment en deçà de la limite du confort thermique, ce qui justifie l'utilisation de chauffages d'appoint.
- **Zone de confort :** Elle comprend les mois d'avril et mai. Cette période offre des températures neutres allant de 20.4°C jusqu'à 25.3°C. C'est une période durant laquelle une personne éprouve une sensation de bien-être sans nécessiter l'utilisation de systèmes de chauffage ou de climatisation.
- **Zone de surchauffe :** Elle inclut les mois de juin, juillet, août et septembre. Cette zone est caractérisée par une augmentation des températures de l'air ambiant dépassant le seuil du confort. Cela nécessite l'utilisation de la climatisation artificielle.

IV.3.1. Indice d'aridité « I » (de Martonne 1923)

L'indice d'aridité, noté « I », se définit comme étant le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles. Cet indice permet de déterminer le degré d'aridité d'une région donnée.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Pour le calculer, on utilise la formule (IV.1) suivante :

$$I = \frac{P}{T} + 10 \quad (\text{IV. 1})$$

- I : Indice d'aridité de Martonne.
- P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm.
- T : Température moyenne annuelle en °C.

Selon de-Martonne les différents types des climats sont les suivantes (tableau IV.7) :

Tableau IV. 7 : L'indice d'aridité. (Source : Auteure)

Valeur I	Type de climat
I<5	Désertique
5< I<10	Aride
10< I<20	Semi-aride
20< I<30	Subhumide
30<I	Humide

En se basant sur les données climatiques recueillies sur une décennie (2009-2018) provenant de la station météorologique de Batna, il est possible de déterminer l'indice d'aridité pour la ville de Batna sur la même période en utilisant la formule de de Martonne :

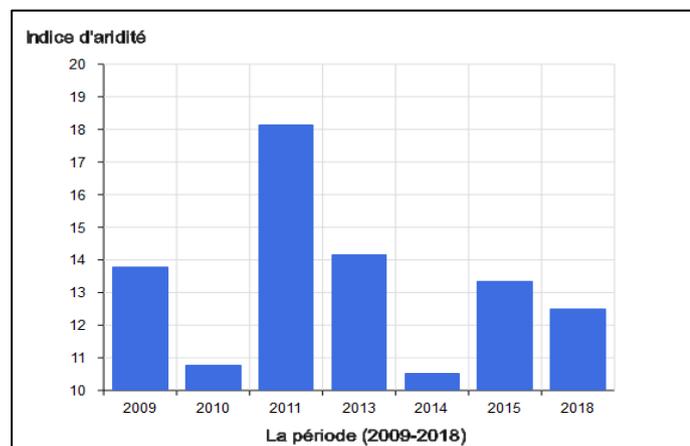
La précipitation P = 297.15mm

La température annuelle T = 15.76°C

Donc : $I = P/T + 10 = 297.15/15.76 + 10 = 11.53$

I= 11.53 Cette valeur correspond à un climat de type **semi-aride**.

À travers cette formule, nous avons calculé l'indice d'aridité de la ville de Batna durant cette période, les résultats préfigurent dans le (graphique IV.6) :



Graphique IV. 6 : Indice d'aridité de la ville de Batna de 2009 à 2018. (Source : Auteure, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Batna, 2019)

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

En 2012, 2016 et 2017, des valeurs de l'indice ont été enregistrées en dessous de 10, indiquant des périodes de sécheresse qui ont touché la wilaya de Batna en raison d'une insuffisance de précipitations pendant ces années.

Les valeurs les plus basses de précipitations de la décennie (2009-2018) ont été enregistrées en 2012, 2016 et 2017, selon les données climatiques de la station météorologique de Batna :

- 2012 : précipitation annuelle de 207.8 mm
- 2016 : précipitation annuelle de 210 mm
- 2017 : Précipitation annuelle de 169.7 mm

D'après les informations obtenues auprès de l'ONM (Office National de la Météorologie), la ville de Batna présente un climat de type semi-aride, marqué par d'importantes fluctuations saisonnières concernant la température, l'humidité et les précipitations.

IV.4. Analyse urbaine de la ville de Batna

La ville de Batna a subi diverses évolutions qui ont contribué à son essor urbain au fil des années, engendrant une diversité de formes urbaines. L'objectif de l'analyse urbaine est de comprendre le processus de développement de la structure urbaine de la ville de Batna à travers le temps, afin de sélectionner l'ensemble des formes urbaines et les modes d'urbanisation qui ont participé aux transformations de la ville. Cette démarche prend en considération les caractéristiques morphologiques des tissus urbains ainsi que la configuration spatiale actuelle de la ville.

IV.4.1. La morphogenèse de la ville de Batna à travers les différentes périodes

Batna est passée par deux périodes distinctes qui ont marqué son existence et son développement urbain : la période coloniale, une période de fondation de la ville, et la période post-coloniale (après l'indépendance).

IV.4.1.1. La période coloniale (période d'implantation)

Cette période est divisée en quatre sous-périodes :

➤ La période coloniale de 1844-1923 (La fondation de la ville et la création du noyau)

La ville de Batna a été établie dans une zone marécageuse en forme de cuvette. En 1844, le Duc d'Aumale a érigé un camp militaire au sud-est, constituant ainsi le premier centre de la future ville de Batna. Un décret de Napoléon III a officiellement institué cette dernière, daté du 12 septembre 1848.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Le camp initial présentait une configuration rectangulaire, délimitée par un mur d'enceinte doté de quatre portes d'accès. Il se caractérisait par l'intersection de deux axes perpendiculaires, représentés par les rues Mously et de France, qui reliaient ces différentes entrées (Voir la figure IV.6).

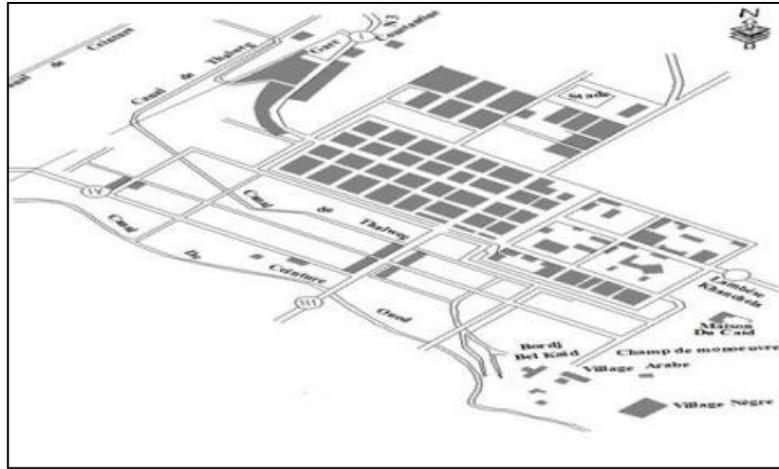


Figure IV. 6 : Carte du noyau colonial. (Source : PDAU, 1998)

Batna était considérée comme la porte du sud de l'Algérie, dont la première vague d'européens est arrivée en 1850. Le noyau initial de la ville a été principalement érigé dans le but de contrôler la région Aurésienne. En 1923, ce camp a dépassé ses limites et a été divisé en deux par un oued.

La première partie, située au nord, constituait le noyau colonial occupé par des colons de différentes nationalités, dont des Français, des Juifs, des Russes, des Allemands, etc. (Amrouni, 2013). Cette partie se caractérisait par une architecture moderne, des îlots réguliers souvent de forme carrée ou rectangulaire, des habitations à un ou deux niveaux avec des toitures inclinées en tuile, des façades pourvues d'ouvertures vitrées en longueur, des allées bordées d'arbres, des rues rectilignes, ainsi que des places publiques (figure IV.7) :

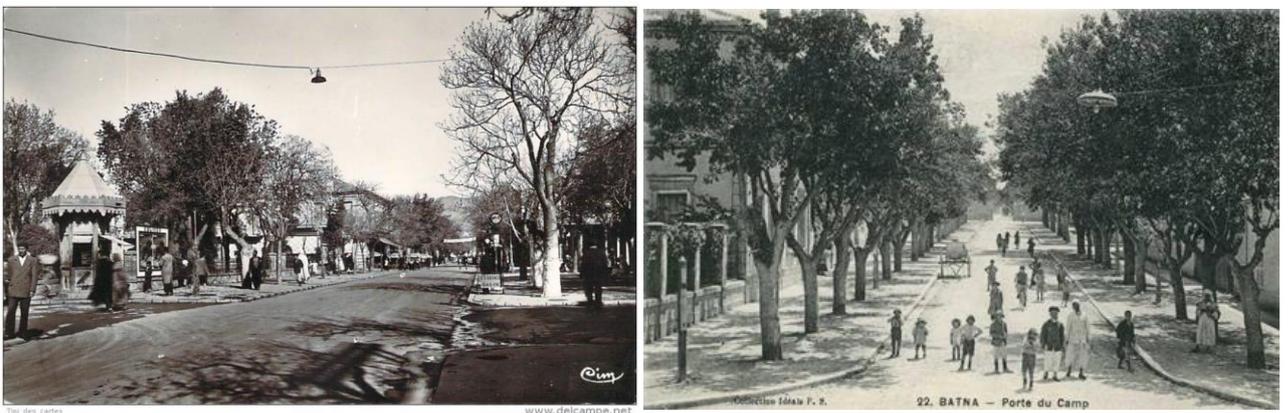


Figure IV. 7 : Anciennes photos du centre-ville de Batna. (Source : Revue info-Batna et Delcamp.net)

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

La seconde partie consistait en Z'mala, le quartier traditionnel ou quartier des indigènes, localisé au sud, destiné à être habité par les autochtones de la ville. Ce quartier se distinguait par un tissu urbain dense, comprenant de nombreuses habitations individuelles de type Gourbis, ainsi que des ruelles étroites et sinueuses (Cianfarani, 1995).



Figure IV. 8 : Ancienne photo de Batna (Quartier des indigènes). (Source : Delcamp.net)

Au cours de cette expansion, diverses infrastructures essentielles ont été construites à Batna, comprenant notamment deux écoles, un tribunal, un théâtre, une église, une subdivision militaire, une mairie, un marché, et un cimetière chrétien (voir figure IV.9).

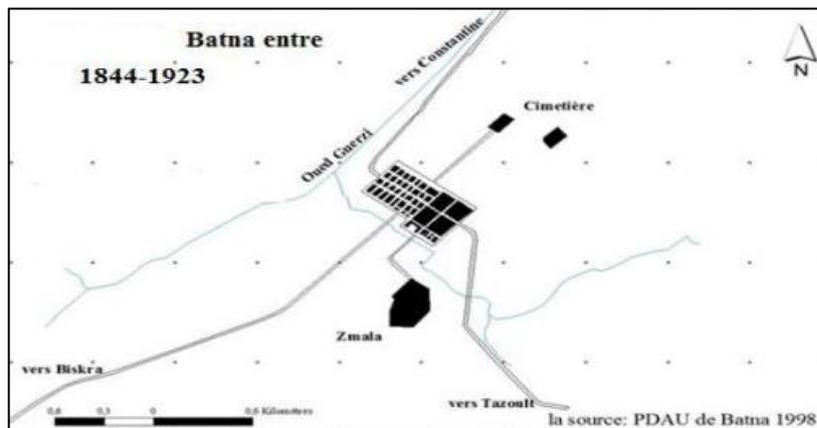


Figure IV. 9 : Carte de Batna entre 1844 – 1923. (Source : PDAU de Batna, 1998)

➤ La période coloniale de 1923-1945

Au cours de cette période, Batna a assumé un rôle administratif et commercial de grande envergure, renforcé par la qualité des infrastructures qui lui ont été attribuées. En plus des équipements existants, des ajouts notables ont inclus la construction d'un aéroport au sud-ouest du noyau colonial et la mise en place d'une ligne de chemin de fer à l'ouest, s'étendant du nord au sud.

Cette expansion a exercé un attrait sur de nouveaux colons. Cela a entraîné une augmentation de la population de 11 000 habitants en 1925 à 15 000 en 1940 (Bendib, 2017).

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Cette croissance a conduit à la fragmentation du noyau urbain dans trois directions (SCU de Batna, 2010) :

- L'établissement du quartier Stand avec une trame orthogonale le long de la rue Mously dans la partie nord-est.
- La création du quartier Fourrière près de la gare au nord-ouest.
- Les premières constructions des futurs quartiers Chikhi et Bouakal dans les directions sud-est et sud-ouest de l'agglomération.

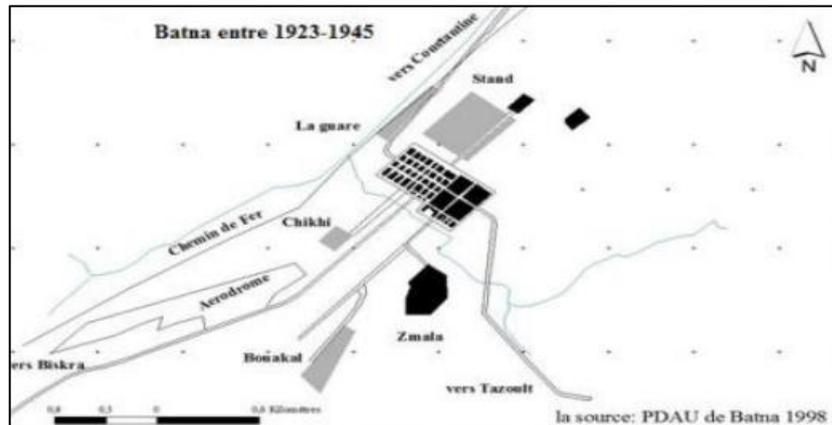


Figure IV. 10 : Carte de Batna entre 1923 – 1945. (Source : PDAU de Batna, 1998)

➤ La période coloniale de 1945-1962

Cette période est caractérisée par le déclenchement de la guerre de libération en 1954, suivie du lancement du plan de Constantine en 1958, motivé par des considérations économiques et sociales. En réalité, ce plan visait à apaiser la population algérienne qui exprimait son mécontentement. Sur le plan spatial, cela s'est concrétisé par la mise en place de diverses infrastructures telles que des casernes pour le renforcement militaire et des immeubles collectifs dans les quartiers européens. Cette période a également marqué l'émergence des premières cités de relogement et le début des quartiers informels à venir.

Le programme du plan de Constantine du 06 Octobre 1958 se présente comme suit :

- Au nord, les quartiers européens : des immeubles collectifs «HLM», le renforcement du potentiel militaire par la construction des casernes au nord/est du noyau colonial et le Camp (rue de France).
- Au sud, les quartiers traditionnels : la réalisation des cités de recasement :

La cité Chikhi 252 logements, la cité évolutive 192 logements, Kechida 262 logements. L'apparition de nouveaux quartiers informels ont également émergé, tels que Kechida, Parc à Fourrage à l'est, et l'extension des quartiers traditionnels. Les deux parties nord et sud sont

séparées par le quartier de la verdure. La ville a continué à se structurer autour du noyau militaire jusqu'à 1962.

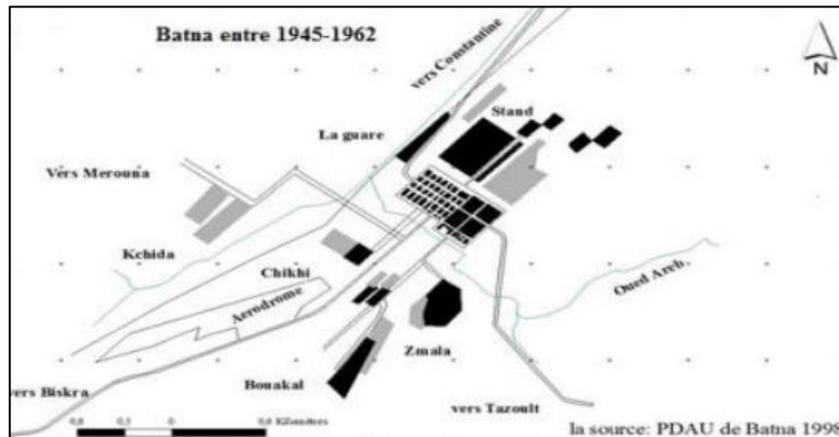


Figure IV. 11 : Carte de Batna entre 1945 – 1962. (Source : PDAU de Batna, 1998)

IV.4.1.2. La période post coloniale (Après 1962)

➤ La période de 1962-1978 (l'extension des quartiers traditionnels)

Pendant cette période, la croissance urbaine de Batna s'est principalement manifestée par une extension informelle des quartiers traditionnels tels que Bouakal, Chikhi et Parc à Fourrage. Toutefois, en 1968, le programme spécial Aurès a été lancé en urgence pour stimuler le développement urbain et compenser le retard accumulé depuis la guerre de libération. Cette impulsion s'est concrétisée sur le terrain par un programme de développement qui a donné lieu à la réalisation de divers projets dans les domaines du logement et du socio-économique, grâce à des équipements d'infrastructures.

Parmi les réalisations les plus importantes dans le secteur d'habitat, on note : 150 logements ruraux, 375 logements urbains, cité 150 logements, cité 20 Août 114 logements, cité Gruyère 27 logements, cité 84 logements (PDAU-Batna, 2011).

➤ La période de 1978-1984 (l'éclatement de l'agglomération)

Pour remédier aux problèmes de dysfonctionnement urbain et à l'éparpillement de l'agglomération, principalement attribuables aux flux migratoires de la population en quête d'emploi, de scolarisation et de divers services (santé, administration, etc.), un plan d'urbanisme directeur (PUD) de la ville de Batna, complété par le plan de modernisation urbaine, a été promulgué en 1978. Ce plan a initié un vaste programme comprenant la construction de logements collectifs et individuels, de coopératives, de lotissements, ainsi que de nouvelles zones d'habitat urbain (ZHUN).

- **Le programme de l'habitat collectif**

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

L'habitat collectif est principalement concentré au niveau des zones d'habitat urbain nouvelles (ZHUN) et sur les terrains encore disponibles à l'intérieur de l'agglomération, notamment dans le centre-ville. Diverses cités accueillent cette typologie d'habitat, telles que la cité des 742 logements, cité Gruyère 220 logements, cité Fourrière 64 logements, CNEP et 30 logements Wilaya, cité des fonctionnaires 92 logements, cité 41 logements Camp, cité 64 logements, cité 50 logements, et cité 293 logements.

- ZHUN I : Cité 1200 et 1000 logements, cité Sonatiba et cité 220 logements.
- ZHUN II : Cité 64 logements, cité 72 logements Casorec, cité 32 éducation, cité police 40 logements, cité 800 logements, cité 500 logements collectif, Kchida 340 logements, et cité 150 logements industrie (PDAU-Batna, 2011).

En simultané avec un large programme de logements planifié par les autorités publiques, un autre type d'habitat s'est développé sous la pression démographique. Sur le terrain, cela s'est manifesté par la construction de logements individuels en périphérie urbaine, entraînant la consommation des réserves foncières initialement prévues pour de futurs projets ainsi que la perte de terres agricoles. Cette expansion non réglementée a généré une forme d'anarchie urbaine.

➤ La période de 1984-1995 (la saturation du tissu urbain)

La décennie noire a caractérisé cette période, marquée particulièrement par l'insécurité et un flux migratoire massif. Cela a rendu les objectifs anticipés du programme d'urbanisme directeur (PUD) de 1978 inatteignables en raison de l'ampleur et de la rapidité avec lesquelles les constructions informelles se sont développées, en particulier dans les quartiers du sud (Bouakal et Tamachit), sans oublier les quartiers Kechida, Parc à Fourrage, Bouzzorane et la route de Tazoult.

Cette situation a poussé les autorités à élaborer un deuxième PUD en 1985 dans le but de réorganiser, rééquilibrer et contrôler l'urbanisation rapide et spontanée des quartiers informels. Cela s'est concrétisé par le lancement d'un programme qui englobe plusieurs opérations urbaines, dont la rénovation du centre-ville, la réalisation d'équipements dans tous les quartiers, et la restructuration des quartiers périphériques qui souffraient du manque d'infrastructures de base et n'étaient pas connectés aux divers réseaux d'assainissement et de voirie (Bendib, 2017). Cette période a également vu le lancement du Plan Directeur d'Aménagement Urbain (PDAU) de la ville de Batna en 1994, qui n'a été approuvé qu'en 1998.

➤ **La période de 1995-2005 (l'expansion sans limite)**

L'adoption d'une politique centrée sur le secteur industriel, caractérisée par la création d'une zone industrielle, a entraîné une saturation du tissu urbain et un important exode rural (Bendib, 2017). Ces décisions ont eu des conséquences graves à la fois sur le plan spatial et social, se manifestant par une urbanisation excessive caractérisée par l'émergence et l'expansion de l'habitat illicite. Cela a conduit à la consommation de terres fertiles par une extension horizontale.

Afin de remédier aux problèmes liés à ces déséquilibres urbains, un plan directeur d'aménagement et d'urbanisme a été approuvé en 1998 pour la commune de Batna. L'objectif principal visait à établir des directives fondamentales pour l'aménagement du territoire et à identifier les secteurs propices à une expansion future à court, moyen et long terme.

IV.4.1.3. L'urbanisation actuelle

Malgré les objectifs définis par le Plan directeur d'aménagement et d'urbanisme (PDAU) de 1998, les secteurs de la ville de Batna ont été développés en marge des instruments de planification qui n'ont pas pu être concrétisés sur le terrain en raison de la rapidité de l'urbanisation observée, de l'absence d'une politique foncière claire et efficace, ainsi que du manque d'implication des autorités locales dans l'exécution des projets prévus. En conséquence, une expansion non contrôlée de l'urbanisation dans toutes les directions a créé avec le temps des dysfonctionnements dans l'organisation du tissu urbain. La contrainte majeure réside dans le statut foncier, et la saturation du territoire a conduit la collectivité locale à utiliser des terres agricoles pour l'urbanisation. Parallèlement, les parcelles foncières réservées à différents usages selon le PDAU sont occupées par des habitations illicites.

Face aux conséquences néfastes de cette croissance désordonnée, qui entraîne une occupation irrationnelle du sol et la consommation prématurée des secteurs d'extension définis par le PDAU de 1998, la ville de Batna se trouve confrontée à des obstacles naturels et artificiels qui entravent son extension tels que la zone militaire au nord-est, la zone industrielle au sud-ouest, et les massifs montagneux de Bouzorane au nord et de Tamachit au sud. Il a été nécessaire de réviser à nouveau le PDAU en 2005 avant l'expiration des délais réglementaires pour contourner les contraintes foncières auxquelles la ville est exposée. L'extension se fait aujourd'hui en dehors de ses limites, vers trois directions principales linéaires englobant les communes de Tazoult, Fésdis et Oued Châaba. Deux pôles urbains ont été créés : le pôle résidentiel de Hamla dans la commune d'Oued Châaba et le pôle universitaire dans la commune de Fésdis.

IV.4.2. Classification des morphologies urbaines de la ville de Batna

La ville de Batna se distingue par une diversité de morphologies urbaines, témoignant des différentes périodes de son histoire, chacune racontant une histoire, une civilisation et une identité distinctes. Chaque morphologie urbaine de Batna représente une époque spécifique :

Tableau IV. 8 : Récapitulatif sur les typologies des tissus urbains dans la ville de Batna. (Source : Auteure, 2019)

Type de morphologie urbaine	Images des tissus urbains (Google Earth Pro)	Caractéristiques morphologiques	Bref historique Sur chaque morphologie
Tissu colonial			
Tissu dense		Un tissu dense avec une trame géométrique orthogonale, des rues rectilignes structurées de largeur moyenne, des îlots de forme rectangulaire de taille standard avec des immeubles relativement hauts	Un tissu qui suit les règles de l'urbanisme moderne fonctionnel, caractérisé par des îlots réguliers et des rues rectilignes
Tissu traditionnel			

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

<p>Tissu très dense et compact</p>		<p>Un tissu urbain dense, voire très dense, se caractérise par une trame irrégulière, des rues parfois étroites et sinueuses, sans ordre géométrique apparent.</p>	<p>Un tissu qui s'est formé de manière aléatoire, caractérisé par une grande compacité du bâti et des rues continues et sinueuses.</p>
<p>Tissu auto construit planifié (lotissement + coopérative)</p>			
<p>Tissu dense</p>		<p>Tissu dense avec une trame régulière, des rues géométriques structurées selon une certaine logique : rues principales, rues secondaires et rues tertiaires, des îlots de forme rectangulaire.</p>	<p>Le lotissement forme un tissu dense mais suit une logique de répartition des espaces avec une trame régulière formant une certaine hiérarchie des rues de desserte.</p>
<p>Tissu d'habitat collectif</p>			

<p>Tissu lâche de faible densité</p>		<p>Tissu lâche et éclaté avec des formes variées (barres, tours, plots, îlots...), formant de grands espaces ouverts (espaces verts, parkings, espaces de jeux), mais souvent sans aménagement.</p>	<p>Ces grands ensembles résultent d'idées fonctionnalistes adoptées après la Deuxième Guerre mondiale. L'Algérie avait opté pour ce modèle principalement pour des raisons économiques, privilégiant la quantité au détriment de la qualité.</p>
--	--	---	--

IV.5. Méthodologie du travail

Ce chapitre se divise en deux parties distinctes pour le travail d'investigation : la première aborde la télédétection, tandis que la seconde est consacrée à la campagne de mesures.

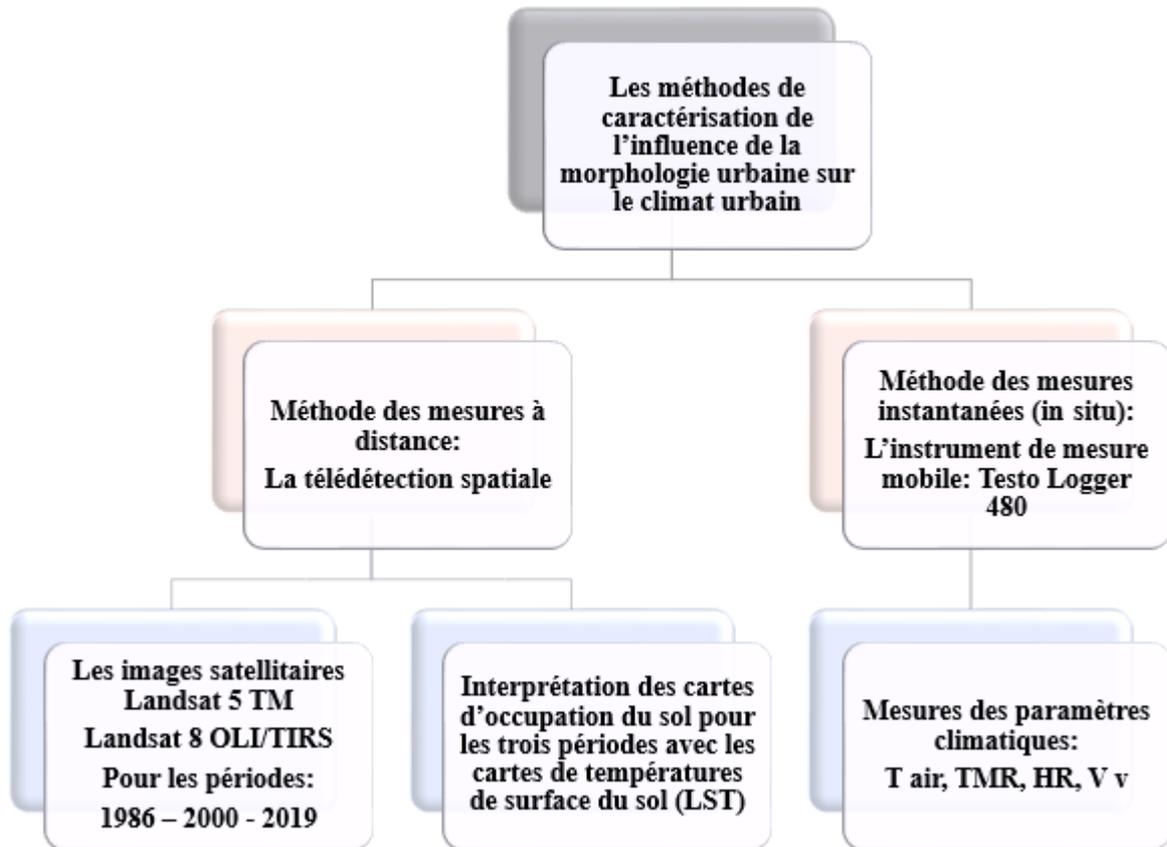


Figure IV. 12 : La méthodologie du travail. (Source : Auteure, 2021)

IV.5.1. Données de télédétection et méthodologie du travail (première partie)

Dans cette partie dédiée à la méthode de télédétection spatiale, notre objectif est d'établir une corrélation entre la densité urbaine et la température de surface du sol (LST), afin d'estimer les îlots de chaleur au sein de la surface urbaine de la ville de Batna.

Les données utilisées pour cette investigation comprennent une série d'images chronologiques Landsat acquises par les capteurs Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI/TIRS.

Toutes les données d'images ont été téléchargées gratuitement depuis le site de la NASA : l'USGS (United States Geological Survey), avec une résolution spatiale de 30 mètres par pixel dans le visible (RVB), 120 mètres pour le thermique Landsat TM, et 100 mètres pour le thermique Landsat OLI.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Ces données brutes Landsat sont projetées sur le système de coordonnées Universal Mercator Transverse (UTM), basé sur la géodésie mondiale, avec le système de référence (WGS84) de 1984.

Les images, obtenues sous forme de données géo-référencées, ont été capturées sur une période de 15 ans, couvrant les années 1986, 2000, jusqu'à 2019, année de l'investigation sur le terrain.

Toutes les images ont été acquises pendant la même saison, à savoir la saison estivale représentée par le mois de juillet, une période propice à l'observation des phénomènes de surchauffe urbaine. Les détails des données sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau IV. 9 : Dates d'acquisition et caractéristiques des données images utilisées. (Source : Auteure, 2021)

Satellite	Date d'acquisition	Heure	Nombre de bandes	Résolution	L'azimuth	Sun-elevation	Cloud-cover	WRS/Path
Landsat 5	15/07/1986	09 :30 :05	7	30m	108.96	58.77	0.00	193
TM	12/07/2000	09 :50 :28	7	30m	112.36	61.70	0.00	194
Landsat 8 OLI/TIRS	17/07/2019	10 :13 :27	11	30m	121.05	65.44	0.00	194

Les données de télédétection ont été traitées à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) avec le logiciel ArcGIS (version 10.2.1). Cette étape de traitement d'image est essentielle car elle permet de générer des cartes d'usage du sol et des cartes de température de surface du sol (LST). L'objectif est de caractériser et de surveiller l'évolution du climat local de la ville de Batna en détectant les îlots de chaleur urbains surfaciques.

La morphologie urbaine à l'échelle de la ville de Batna a également été étudiée par des indicateurs de densité (surface des bâtis/la surface totale considérée) et de compacité urbaine (indice Gravelius), après le calcul des différentes données nécessaires à leur évaluation.

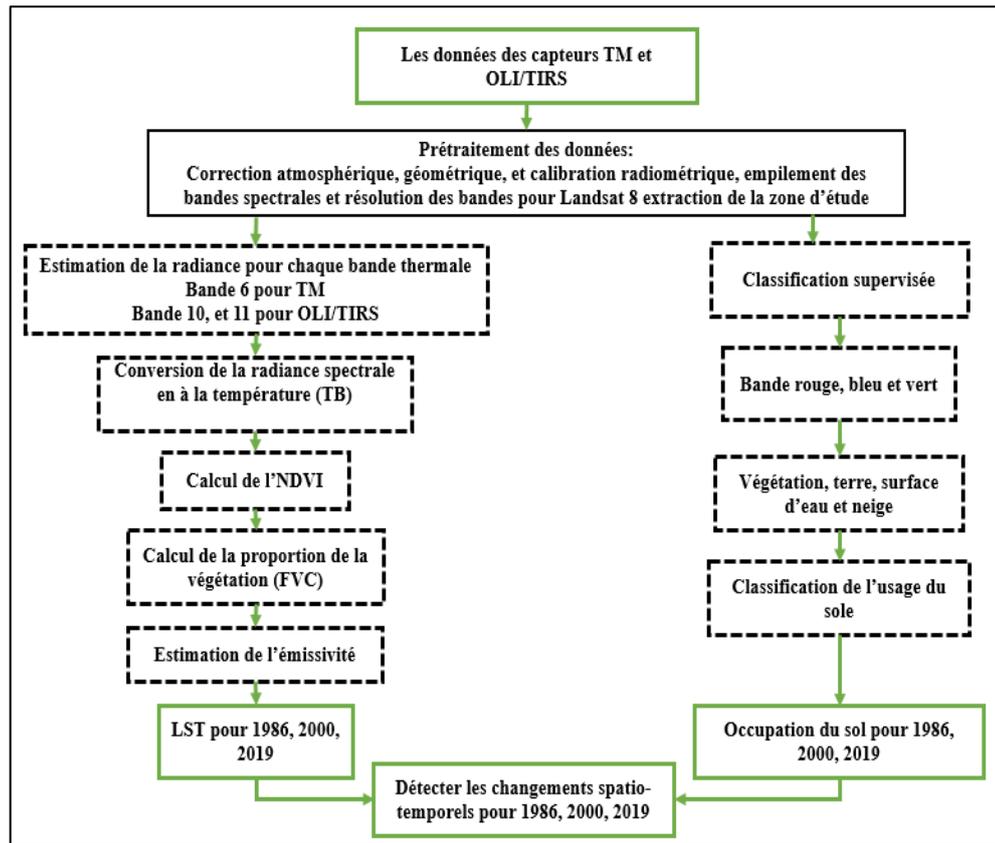


Figure IV. 13 : Le processus de travail. (Source : Auteure, 2021)

IV.5.1.1. Caractéristiques spatiales et spectrales des données d’images satellites utilisées dans l’étude :

Tableau IV. 10 : Les caractéristiques spécifiques du capteur Landsat 5 TM. (Source : Auteur, 2021)

LANDSAT 5 THEMATIC MAPPER (TM)

	BANDES	Longueur d’ondes (micromètre (µm))	Résolution (mètre (m))
1	Bleu	0.450 – 0.520	30 m
2	Green	0.520 – 0.600	30 m
3	Red	0.630 – 0.690	30 m
4	NIR	0.760 – 0.900	30 m
5	SWIR-1	1.550 – 1.750	30 m
6	Thermal	10.40 – 12.50	120*30 m
7	SWIR-2	2.080-2.350	30 m

Tableau IV. 11 : Les caractéristiques spécifiques du capteur Landsat 8 OLI/TIRS. (Source : Auteur, 2021)

LANDSAT 8 OPERATIONAL LAND IMAGER (OLI) AND THERMAL INFRARED SENSOR (TIRS)			
BANDES	Longueur d'ondes (micromètre (µm))	Résolution (mètre (m))	
1	Ultra (côtier/aérosol)	0.435 – 0.451	30 m
2	Blue	0.452 – 0.512	30 m
3	Green	0.533 – 0.590	30 m
4	Red	0.636 – 0.673	30 m
5	NIR	0.851 – 0.879	30 m
6	SWIR-1	1.566 – 1.651	30 m
7	SWIR-2	2.107 – 2.294	30 m
8	Pan	0.503 – 0.676	15 m
9	Cirrus	1.363 – 1.384	30 m
10	TIRS 1	10.60 – 11.19	100*30 m
11	TIRS 2	11.50 – 12.51	100*30 m

IV.5.2. Le prétraitement des images satellitaires

Le prétraitement consiste à étudier les images numériques et leurs transformations dans le but d'améliorer leur qualité ou d'extraire des informations.

L'étape de prétraitement des images englobe un ensemble de tâches, permettant la correction atmosphérique, géométrique, la calibration radiométrique, l'empilement des bandes spectrales et l'extraction de la zone d'étude, réalisée par un système d'information géographique (SIG) avec le logiciel ArcGIS (version 10.2.1). Cette étape garantit la correction géo-référencée précise des images, assure l'obtention d'une unique image lorsque notre zone est couverte par plusieurs images, et effectue le découpage des images selon l'étendue de notre zone d'étude.

IV.5.3. Extraction d'information

IV.5.3.1. Les indicateurs morphologiques calculés

Dans le but d'étudier la morphologie urbaine à l'échelle de la ville de Batna, deux principaux indicateurs ont été retenus : la densité urbaine et la compacité urbaine.

La densité urbaine : Cet indicateur fournit des informations sur le pourcentage (%) des surfaces occupées par les structures bâties. Son calcul requiert des données concernant la superficie totale bâtie et la superficie totale du périmètre d'étude.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Les détails de ces données sont présentés dans le tableau ci-après pour chaque période sélectionnée :

Tableau IV. 12 : Les valeurs de densité urbaine pour différentes périodes. (Source : Auteure, 2021)

	1986			2000			2019		
	Bâti	Non bâti	Végétation	Bâti	Non bâti	Végétation	Bâti	Non bâti	Végétation
Superficie (Ha)	2212.11	7083.18	2418.30	2485.71	5971.41	3256.47	3915.54	5178.42	2624.85
(%) du bâti	18%			21%			34%		

L'obtention des résultats concernant les superficies des différentes classes s'est révélée particulièrement complexe en raison de difficultés rencontrées lors de la classification supervisée des images satellites. Ces difficultés sont principalement liées à la confusion entre les zones bâties et d'autres espaces présentant des couleurs similaires. Par conséquent, la fiabilité de ces résultats est directement influencée par la qualité des images satellites.

Les données du tableau ci-dessus mettent en évidence une progression significative de l'espace bâti, reflétant une augmentation du taux d'urbanisation à Batna. L'expansion du bâti occupe une part croissante de l'espace au fil des années, signalant une consommation excessive des terres naturelles et agricoles.

Concernant l'évaluation de **la compacité urbaine**, nous utilisons l'indice morphologique de Gravelius. Cet indice, recommandé par Honvo et Dossou-Yovo (2021), permet de saisir la structure de la forme d'urbanisation de la ville. Il sert également à mesurer le degré de fragmentation ou de compacité du tissu urbain bâti, prenant des valeurs élevées en présence d'une fragmentation importante. Pour calculer cet indice, il est nécessaire de disposer des données sur le périmètre « P » et la superficie « S » de la forme bâtie (Saouli et al., 2020).

L'équation de l'indice de compacité (Maignant. 2005 ; Honvo et Dossou-Yovo, 2021) :

$$K = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}} \quad (IV. 2)$$

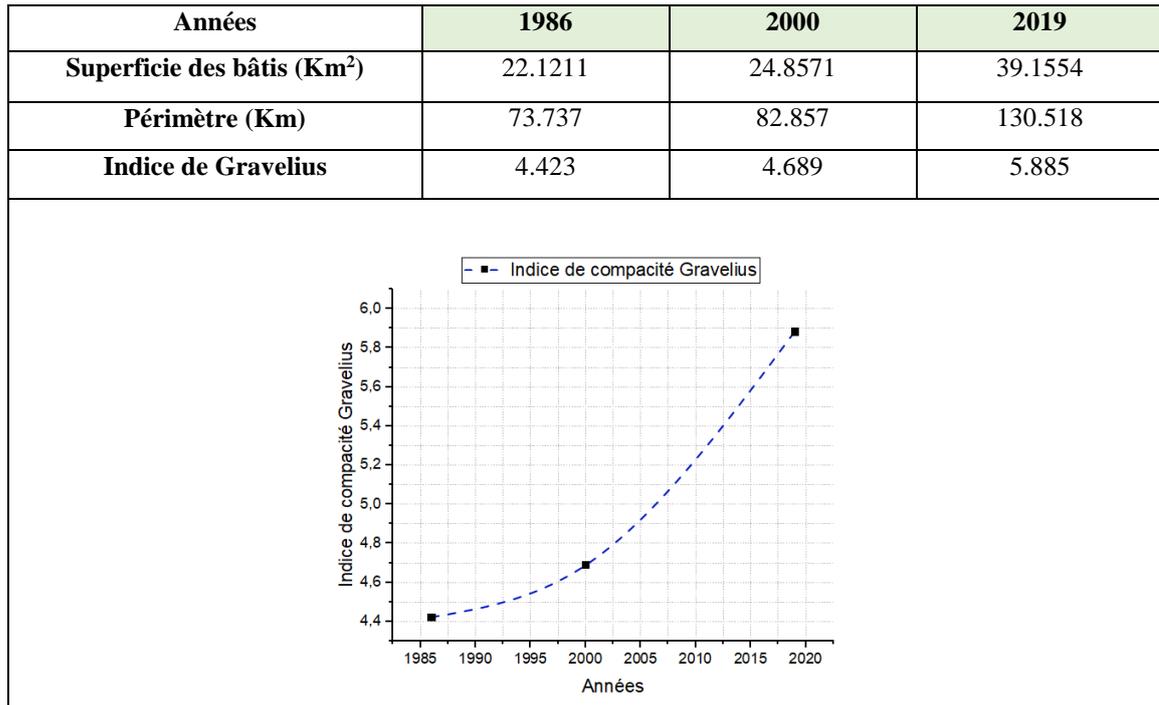
Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Avec :

- **K** : indice de Gravelius
- **P** : périmètre en Km
- **S** : superficie des bâtis en Km²
- π : 3.14

Les données sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau IV. 13 : Les valeurs de l'indice de compacité Gravelius pour différentes périodes étudiées. (Source : Auteure, 2021)



L'examen du tableau ci-dessus met en évidence la forme étalée de la ville de Batna, comme indiqué par les valeurs élevées de l'indice de compacité, dépassant l'unité (1). L'indice de compacité présente une variation de 4.42 à 4.68 entre 1986 et 2000, révélant une forme relativement allongée de la ville. En revanche, sa valeur a tendance à augmenter progressivement, atteignant l'ordre de 5.88 en 2019, ce qui explique l'expansion croissante de la ville de Batna.

IV.5.3.2. L'occupation du sol

Les données présentées dans le tableau ci-dessous proviennent d'un traitement par classification supervisée des images Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI/TIRS. L'objectif était de cartographier l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol de Batna pour les périodes 1986-2000-2019. Les cartes d'occupation du sol ont été générées avec le logiciel SIG : ArcGIS

(version 10.2.1). Cette étape de création des cartes d'occupation du sol permet ainsi la collecte de plusieurs valeurs nécessaires pour le calcul des indicateurs morphologiques.

Pour comprendre comment la morphologie urbaine affecte les variations des paramètres environnementaux, l'évolution de la surface bâtie a été retenue comme un facteur déterminant.

➤ **La méthode de classification supervisée**

Les cartes d'occupation du sol sont obtenues à travers la méthode de classification supervisée. Cette méthode s'appuie sur l'identification des classes d'information des différents types de surfaces, qui sont ensuite utilisées pour définir les classes spectrales les représentant par l'algorithme du maximum de vraisemblance, qui calcule la probabilité d'un pixel d'appartenir à chaque classe afin de déterminer la « signature » numérique de chacune des classes.

IV.5.3.3. Température de surface du sol (LST)

La température de surface du sol (LST) offre la possibilité d'analyser et d'identifier les zones de chaleur modérée, de chaleur intense ou de fraîcheur dans la ville de Batna durant la période estivale, qui présente une période de surchauffe urbaine.

Les images satellites ont été choisies en fonction de leur représentativité, c'est-à-dire que seules les images avec une couverture nuageuse égale à 0.00 ont été prises en compte.

La température de surface du sol (LST) a été calculée pour Landsat 5 TM à travers la bande thermique TM 6 et la bande thermique TIR 10 pour Landsat 8 OLI/TIRS.

L'extraction de la température surfacique suit un processus très complexe qui nécessite un ensemble d'étapes et de traitements spécifiques selon le capteur. Les étapes sont présentées comme suit :

Extraire la température de surface du sol (LST) pour Landsat 5 TM : (D'après Giannini et al., 2015 ; Farah et al., 2021 ; Gherraz, 2021) :

La récupération de la température de surface du sol (LST) se fait à partir de la bande thermique 6. Les étapes de récupération de la (LST) sont les suivantes :

Etape 1 : Estimation de la radiance spectrale de la bande 6 au sommet de l'atmosphère, (Atmospheric reflectance) :

$$L\lambda = \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{Q_{\text{cal max}} - Q_{\text{cal min}}} \right) \times (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{cal min}}) + L_{\min} \quad (\text{IV. 3})$$

Avec :

- **L λ :** Radiance spectrale du sommet de l'atmosphère (TOA) ;

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

- **Qcal max** : La valeur maximale du pixel calibré quantifié en DN ;
- **Qcal min** : La valeur minimale du pixel calibré quantifié en DN ;
- **Qcal** : La valeur du pixel calibré quantifié en DN de la zone d'étude ;
- **L min** : La radiance spectrale correspondant à Qcal MIN (DN = 0) ;
- **L max** : La radiance spectrale correspondant à Qcal MAX (DN = 255).

Etape 2 : Estimation de la température de luminosité (TB) de la bande 6 en Celsius, (Atmosphere Brightness Temperature) :

L'étape suivante consiste à convertir la radiance spectrale en température de luminosité au sommet de l'atmosphère (TOA) par l'équation suivante :

$$TB = \frac{K2}{\ln(K1 / L\lambda')} + 1 \quad (IV.4)$$

Avec :

- **TB** : (TOA) Température de luminosité ;
- **L λ** : Rayonnement spectrale ;
- **K1 – K2** : Constantes de conversion thermique pour la bande fichier de métadonnées.

Etape 3 : Estimation de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (IV.5)$$

- **NDVI** : Indice de végétation, est calculé à partir de la lumière visible et proche infrarouge réfléchi par la végétation. Les valeurs du **NDVI** s'étendent dans l'intervalle [-1, +1]. Les valeurs négatives correspondent à l'eau. Les valeurs proches de 0 correspondent à des sols nus. Les valeurs basses entre 0,2 à 0,6 indiquent la présence de surfaces végétalisées moins denses, et les valeurs maximales autour de 0,8 indiquent la présence d'une végétation très dense et active.
- **NIR** : Bande du proche infrarouge (Bande 4) et bande rouge (Bande 3) : **(bande 4 – bande 3) / (bande 4 + bande 3)**.

Etape 4 : Estimation de la couverture végétale fractionnelle (FVC) pour une image en utilisant le NDVI :

$$Pv = \left[NDVI - \frac{NDVI_{min}}{NDVI_{max}} - NDVI_{min} \right] 2 \quad (IV.5)$$

Etape 5 : Estimation de l'émissivité de la surface terrestre (LSE) :

$$E = 0.004 \times PV + 0.986 \quad (IV.6)$$

Etape 6 : Estimation de la température de surface du sol (Land Surface Temperature LST) :

$$LST = \frac{TB}{1} + W \times \frac{TB}{P} \times \ln(E) \quad (IV. 7)$$

Extraire la température de surface du sol (LST) pour le capteur Landsat 8 OLI/TIRS :
(D'après Boudjellal et Bourbia (2018) ; Farah et al., (2021) ; Gherraz (2021))

Le calcul de la température de surface du sol (LST) pour le capteur Landsat 8 OLI/TIRS se fait à partir des données de la bande thermique 10 et la bande thermique 11.

Pour récupérer la température de la surface terrestre, un algorithme de type métadonnées a été créé et développé au moyen du calculateur de raster d'ArcGIS (version 10.2.1). Les étapes suivantes expliquent le calcul de la LST :

Étape 1 : Estimation de la radiance spectrale de la bande 10 du sommet de l'atmosphère, (Atmospheric reflectance) :

$$L\lambda' = ML \times Q_{cal} + AL \quad (IV. 8)$$

Avec :

- **Lλ'** : TOA Réflexion spectrale planétaire, sans correction pour l'angle solaire,
- **M_L** : Facteur de remise à l'échelle multiplicatif spécifique à la bande,
- **Q_{cal}** : Image de la Bande 10,
- **AL** : Facteur de remise à l'échelle additif spécifique à la bande, et est la correction pour l'image de la bande 10.

Étape 2 : Estimation de la température de luminosité (TB) de la bande 10 en Celsius, (Atmosphere Brightness Temperature) :

$$TB = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda' + 1}\right)} - 272.5 \quad (IV. 9)$$

Avec :

- **TB** : Température de luminosité,
- **K1 et K2** : Constantes de conversion thermique spécifiques à la bande provenant des métadonnées,
- **Lλ'** : Rayonnement spectrale.

Étape 3 : Estimation de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (IV.10)$$

Avec :

- **NDVI** : Indice de végétation, calculé à partir de la lumière visible et proche infrarouge réfléchi par la végétation.
- **NIR** : Bande du proche infrarouge (Bande 5) et bande rouge (Bande 4) : **(bande 5 – bande 4) / (bande 5 + bande 4)**.

Étape 4 : Estimation de la couverture végétale fractionnelle (FVC) pour une image en utilisant le NDVI :

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (IV.11)$$

Avec :

Étape 5 : Estimation de l'émissivité de la surface terrestre (LSE) :

$$E = 0.004 \times PV + 0.986 \quad (IV.12)$$

Estimation de la température de surface du sol (Land Surface Temperature LST) à l'aide de l'algorithme de l'équation suivante :

$$LST = \frac{TB}{1} + W \times \frac{TB}{P} \times \ln(E) \quad (IV.13)$$

Avec :

W : Longueur d'onde de la radiançe émise (à la longueur d'onde de la bande 10).

IV.6. Interprétation des résultats

IV.6.1. L'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol

Par une approche de classification supervisée qui utilise la méthode de l'algorithme du maximum de vraisemblance, soutenue par la plateforme ArcGIS, seuls trois types d'occupation du sol sont inclus dans la classification : (1) la tache urbaine, qui représente le bâti en couleur blanche ; (2) les sols nus, qui représentent le non bâti en couleur marron ; et (3) la végétation en couleur verte.

Les cartes d'occupation du sol pour les périodes 1986, 2000, et 2019 sont présentées ci-dessous:

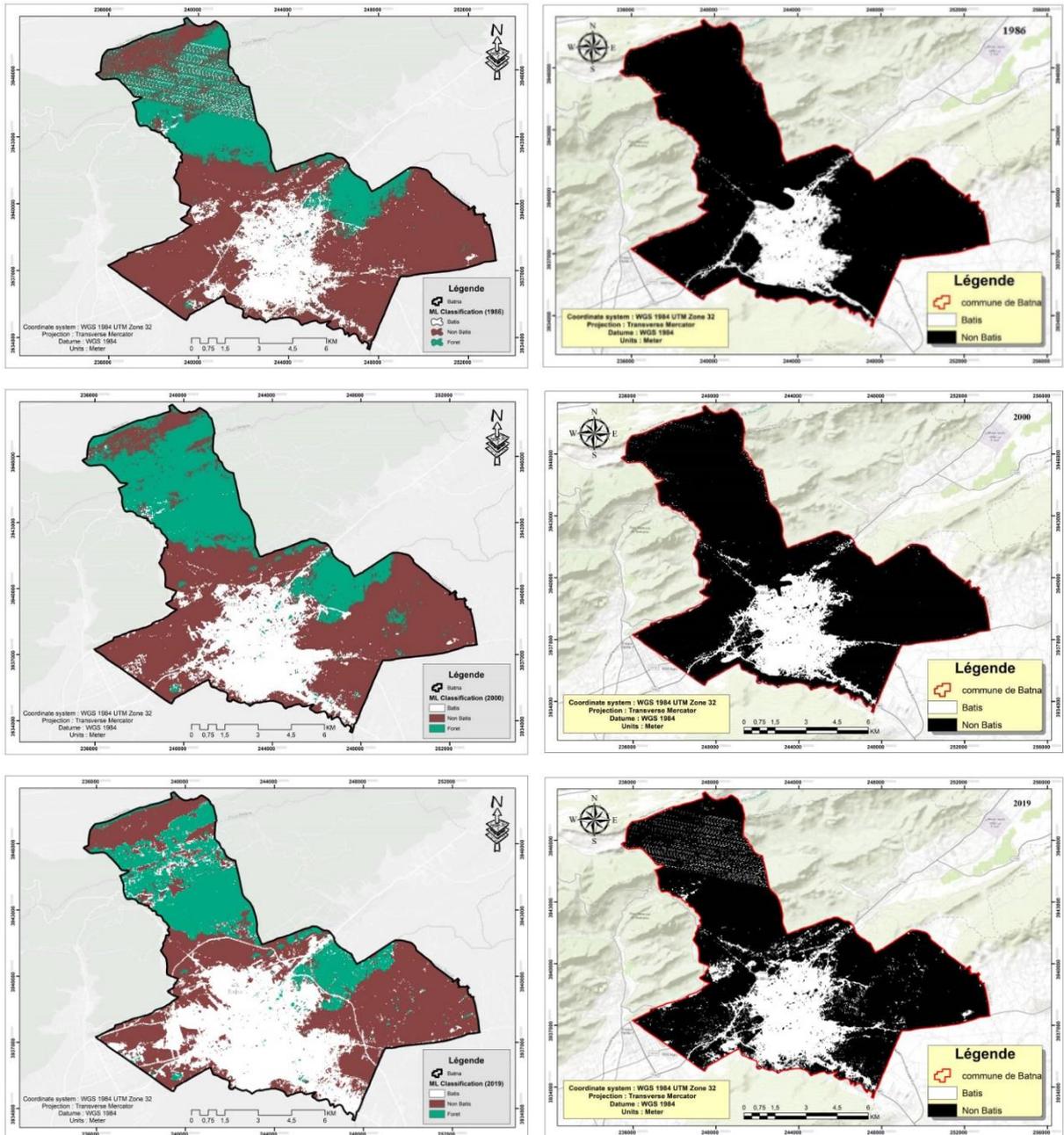


Figure IV. 14 : L'évolution spatio-temporelle de la ville de Batna pour les périodes 1986, 2000, 2019, (La tache urbaine en blanc). (Source : Auteure, 2021)

Les cartes d'occupation du sol (figure IV.14) illustrent l'évolution de la tache urbaine de la ville de Batna de 1986 à 2000 à 2019. Les résultats dévoilent une progression cohérente entre les valeurs de densité urbaine et de compacité pour les trois périodes.

Les valeurs de densité et de compacité fournissent des informations sur l'évolution de la surface urbanisée et de sa forme durant la période de 1986 à 2019. Cette évolution est la résultante de la mise en œuvre de différents programmes d'habitat au cours de cette période, notamment le lancement de programmes d'habitat collectif comme les ZHUN, ainsi que des

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

programmes d'habitat individuel sous forme de lotissements et de coopératives visant à maîtriser et à freiner l'urbanisation incontrôlée.

Pendant la période de 1986 à 2000, qui est caractérisée par une urbanisation excessive et l'apparition de l'habitat illicite, la ville a connu une expansion dans toutes les directions en raison de l'exode rural pendant la décennie noire et de la concentration des différents secteurs économiques et industriels. Par conséquent, l'augmentation rapide de la population a engendré une demande croissante d'assiettes foncières pour différents projets d'habitat, au détriment des terrains forestiers et agricoles, favorisant ainsi une urbanisation spontanée et incontrôlée.

Pour la période 2000-2019, qui se fait également remarquer par une urbanisation galopante et sans limites pour la ville de Batna malgré les divers règlements d'urbanisme, la ville a connu un étalement urbain grandissant le long des principaux axes routiers, ce qui a poussé vers la création d'un bâti continu le long de ces axes.

Les répercussions de cette urbanisation aléatoire sur l'environnement naturel sont irréversibles, conduisant à la dégradation et à la détérioration du milieu naturel et à l'artificialisation des terres fertiles et agricoles.

IV.6.2. L'évolution spatio-temporelle de la température de surface du sol (LST)

La température de surface du sol (LST) a été récupérée à travers un processus compliqué, et les cartes de la température de surface du sol (LST) sont exposées ci-dessous :

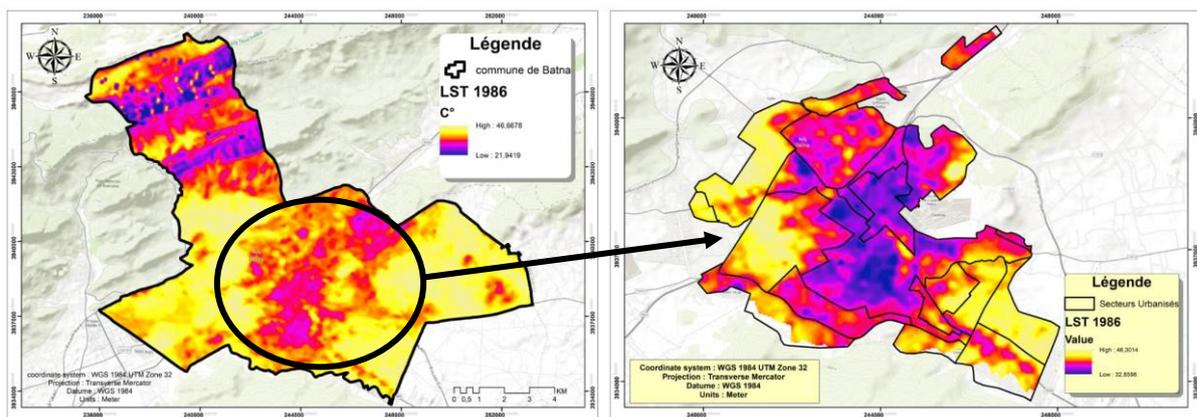


Figure IV. 15 : Cartes des températures de surface du sol (LST) pour la commune et ville de Batna en 1986.
(Source : Auteure, 2021)

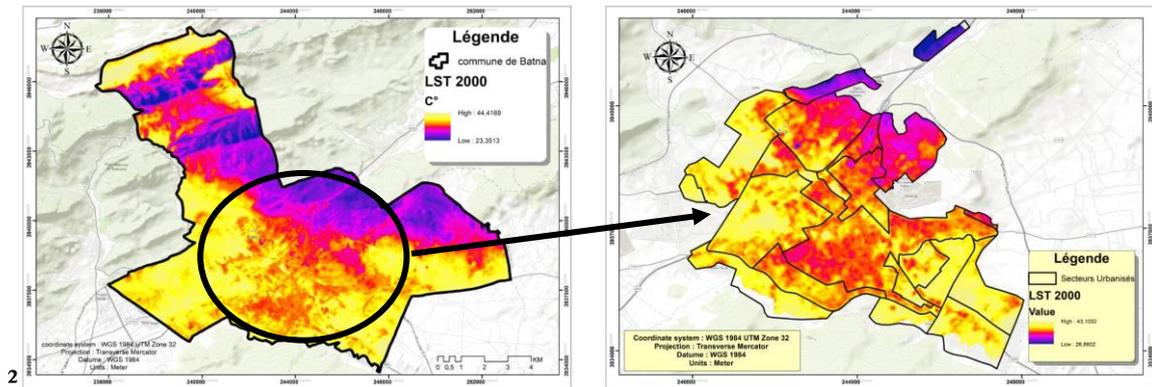


Figure IV. 16 : Cartes des températures de surface du sol (LST) pour la commune et la ville de Batna en 2000. (Source : Auteure, 2021)

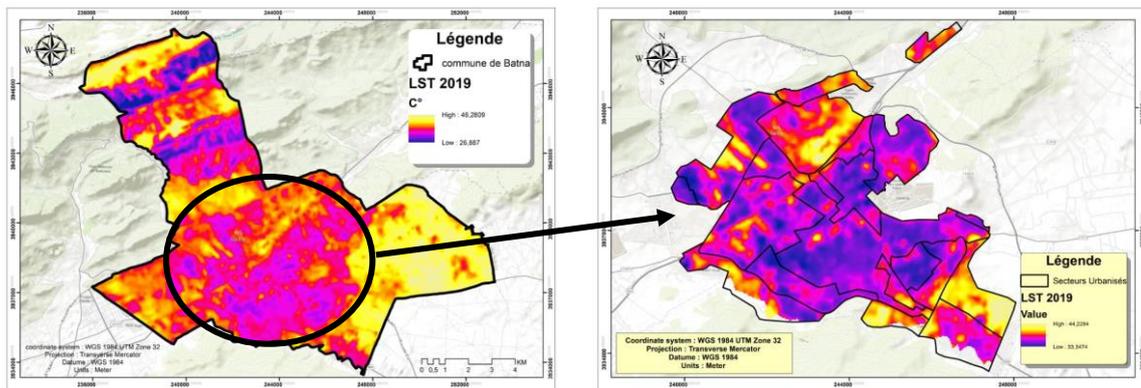


Figure IV. 17 : Les cartes de température de surface du sol (LST) pour la ville de Batna (1986, 2000, 2019). (Source : Auteure, 2021)

Les cartes de la température de surface du sol (LST) (figure IV.15, 16 et 17) montrent une différence remarquable entre les périodes. On enregistre des valeurs qui varient entre (21.94°C et 46.66°C) pour le mois de Juillet 1986, avec une moyenne de 34.15°C, entre (23.35°C et 44.41°C) en Juillet 2000, avec une moyenne de 33.88°C, et entre (26.88°C et 46.28°C) en Juillet 2019, avec une moyenne de 36.58°C.

L'analyse des résultats dévoile que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les surfaces de terres nues en raison de leur réflexion élevée (Gherraz, 2021), tandis que les valeurs les plus faibles sont enregistrées dans les zones forestières en raison de la présence d'une forte densité de végétation. Les zones urbaines enregistrent des valeurs relativement élevées, mais qui varient d'une zone urbaine à une autre. La zone industrielle et une partie du centre-ville enregistrent les valeurs les plus élevées en raison de la concentration des sources anthropiques diverses (activités, population, véhicules, etc.). Par ailleurs, des valeurs élevées de température de surface du sol ont été détectées dans les zones qui présentent une faible densité bâtie par rapport aux zones urbaines denses et compactes qui se situent à une distance considérable du centre-ville et de ses sources anthropiques.

Par conséquent, on peut conclure que les îlots de chaleur urbains surfaciques ont été localisés dans des zones urbaines dispersées (Chen et al., 2006). La présence des espaces ouverts qui captent une grande quantité d'irradiation solaire, ainsi que la couverture du sol par des matériaux de revêtement de couleurs sombres à faible albédo (asphalte et bitume) peuvent être les principaux facteurs de ce phénomène, ce qui produit une augmentation de la température de surface du sol (LST).

Ces résultats confirment que le taux d'urbanisation à une échelle régionale ou globale contribue à la modification de la couverture des sols à travers la minéralisation des milieux naturels en les remplaçant par des surfaces en béton et en asphalte, ce qui influe à son tour sur la modification du climat urbain par la formation des îlots de chaleur urbains.

IV.6.3. Synthèse :

Les résultats de la télédétection ont révélé une forte corrélation entre l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol et celle de la température de surface du sol (LST). Ces résultats ont permis de localiser les zones présentant des températures élevées et basses dans les tissus urbains de la ville de Batna. Les îlots de chaleur urbains de surface se concentrent dans les zones urbaines dispersées, caractérisées par une faible densité urbaine. En revanche, les zones urbaines denses et compactes montrent une réaction favorable contre la surchauffe urbaine, due essentiellement à l'abondance d'espaces ombragés, qui assurent une protection contre le rayonnement solaire.

Dans la seconde partie de l'étude, une analyse approfondie sera menée au niveau des tissus urbains et de leurs espaces extérieurs afin de mieux appréhender l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat à une échelle plus fine. Nous envisageons donc de quantifier le phénomène des îlots de chaleur urbains au niveau de la couche de canopée urbaine, en se basant sur la température atmosphérique.

IV.7. La deuxième partie du chapitre

Cette section aborde la méthode des mesures in situ réalisée à travers une campagne de mesures effectuée dans les tissus urbains sélectionnés pour l'investigation. Avant de procéder à la méthode des mesures instantanées, nous effectuerons d'abord un échantillonnage basé à la fois sur les résultats antérieurs de la télédétection spatiale et sur des critères purement morphologiques.

IV.7.1. Présentation des sites d'investigation

IV.7.2. Critères de choix des sites d'étude

Les résultats précédents obtenus à travers la télédétection nous ont permis d'identifier les zones chaudes et fraîches dans la ville de Batna. Cela facilite le processus d'échantillonnage, de ce fait notre choix sera focalisé sur des zones urbaines chaudes et d'autres fraîches durant la période de stress thermique extrême (saison d'été).

Dans le même contexte, la ville de Batna possède une morphologie urbaine variée avec des formes urbaines multiples et un programme d'habitat diversifié. Pour mettre en évidence à une échelle plus réduite l'influence de la morphologie urbaine sur les variations microclimatiques, il fallait choisir des formes de densité urbaine différentes, allant de faible à forte densité pour des configurations urbaines contemporaines.

Le choix des configurations contemporaines est lié à la réglementation urbaine algérienne, qui exige que le secteur d'habitat soit conforme à son cadre formel avec l'application en vigueur des différents instruments d'urbanisme. Ces programmes d'habitat nouveaux sont tenus d'atteindre plusieurs objectifs, parmi lesquels on peut citer :

- La cohérence avec la réglementation urbaine.
- Le maintien de la qualité de l'environnement, qui est notre objectif d'étude.

Afin d'atteindre cet objectif, notre choix s'est concentré sur deux échantillons planifiés, dont le premier appartient à l'habitat collectif de grands ensembles (ZHUN) et le deuxième à l'habitat individuel (lotissement).

Le choix de ces deux configurations urbaines contemporaines est effectué selon la représentativité de chaque tissu urbain selon une grille de critères (Mouada, 2019) : climatiques et morphologiques.

- **Critères climatiques** : À partir des résultats précédemment obtenus par la télédétection.
- **Critères urbanistiques** : Densité urbaine comme un indicateur principal de la morphologie du tissu urbain interprétée par le coefficient d'emprise au sol (CES), la structure urbaine et le mode d'urbanisation (auto-construit/collectif).
- **Critères architecturaux** : L'enveloppe bâtie et le style architectural.
- **Critères historiques** : Période de construction.
- **Critères juridiques** : Statut juridique (réglementé ou non réglementé).

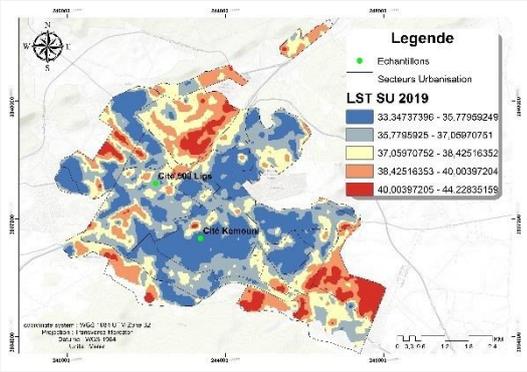
À noter aussi que dans notre échantillonnage des sites d'étude, nous avons essayé d'éviter certains facteurs qui pourraient intervenir sur notre campagne de mesures :

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

- ✓ Eviter le centre-ville où de nombreuses les activités sont concentrées pour négliger l'effet de la pression de la chaleur anthropique.
- ✓ Nous avons choisi des sites avec un manque de végétation, ce qui nous permet de mener l'étude sans en tenir compte, car nous nous concentrons sur l'étude des indicateurs morphologiques.
- ✓ Adopter le choix des journées à ciel claire et dégagé.

Le tableau suivant illustre les différents critères mentionnés ci-dessus :

Tableau IV. 14 : Les caractéristiques climatiques et morphologiques des tissus urbains choisis. (Source : Auteure, 2021)

Critères de choix	Caractéristiques	Cité 500 logements	Lotissement Kemouni
Critères climatiques			
			
Température de surface du sol (LST)	Elevée	X	
	Moins élevée		X
Critères urbanistiques			
Densité urbaine (CES)	Forte Densité		X
	Faible densité	X	
Tracé parcellaire	Régulier	X	X
	Irrégulier		
Système viaire	Voies larges	X	
	Voies étroites		X
Critères architecturaux			
L'enveloppe bâtie	Extravertie	X	X
	Introvertie		
Critères historiques			
Période de construction	Nouveaux tissus		
	Anciens tissus	X	X
Critères juridiques			
Statut juridique	Tissu planifié	X	X
	Tissu non planifié		

En premier lieu, nous allons réaliser une classification des tissus urbains selon leurs degrés de densité urbaine, en prenant en compte le taux d'occupation du sol établi par le coefficient d'emprise au sol (CES). Cette approche offre la possibilité de classifier les différents types de tissus urbains et de comprendre leurs incidences sur les ambiances thermiques en extérieur, notamment sur le confort climatique.

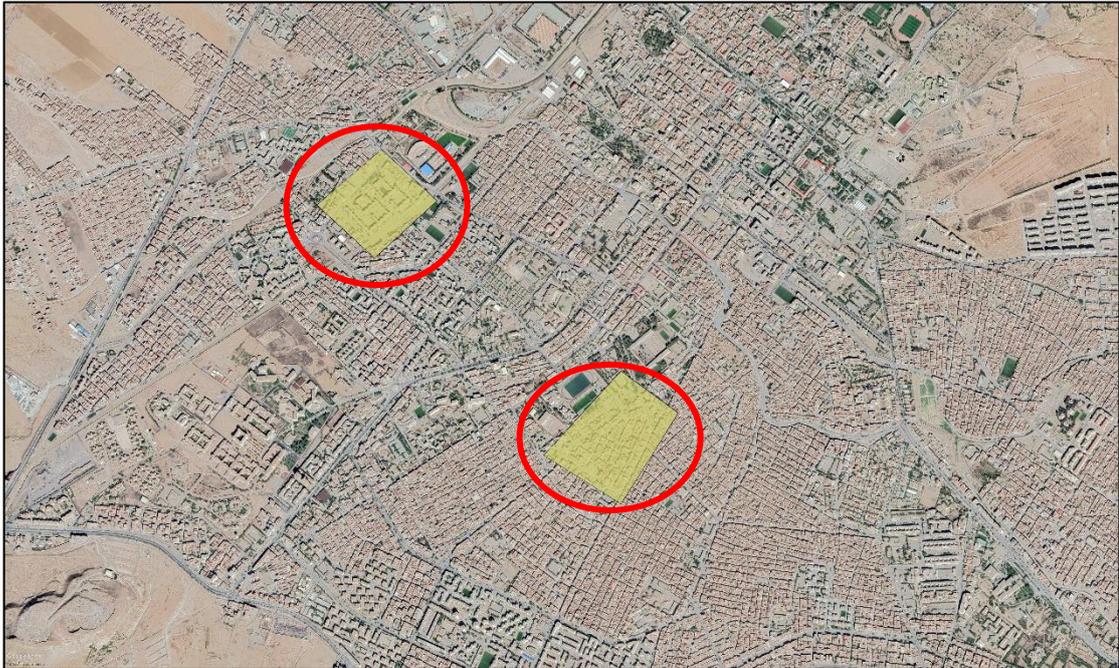


Figure IV. 18 : Les deux sites d'étude. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par l'auteure, 2019)

IV.7.3. Critères de choix des points de mesure

En second lieu, nous avons procédé à la localisation des points de mesure à l'intérieur des tissus urbains sélectionnés (figure IV.19, IV.20). Ces points de mesure sont positionnés dans les espaces extérieurs (espaces publics) réservés aux piétons et aux usagers, en se basant sur un ensemble d'indicateurs géométriques définis (le facteur de vue du ciel (FVC) et le prospect (H/L)).

Dans chaque tissu urbain, nous avons initialement identifié 07 stations de mesure. À la suite de l'analyse des résultats, des similitudes entre ces stations ont été constatées. C'est pourquoi, nous avons restreint notre choix à 04 points les plus représentatifs dans chacun des deux tissus urbains considérés, en suivant les critères géométriques préalablement déterminés.

➤ **Premier site d'investigation : Cité 500 logements**

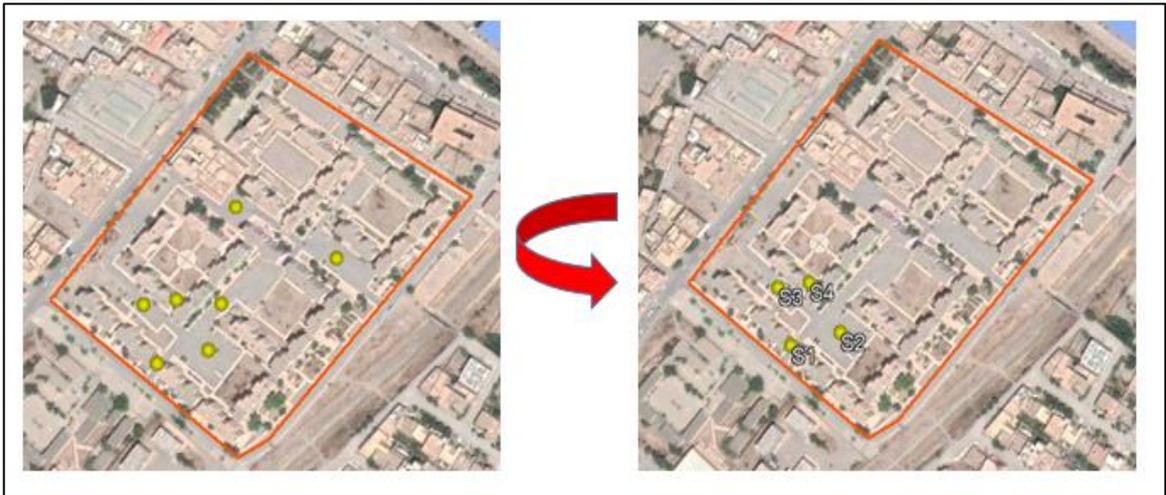


Figure IV. 19 : Les stations de mesure retenues pour l'investigation. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par l'auteur, 2019)

➤ **Deuxième site d'investigation : Lotissement Kemouni**

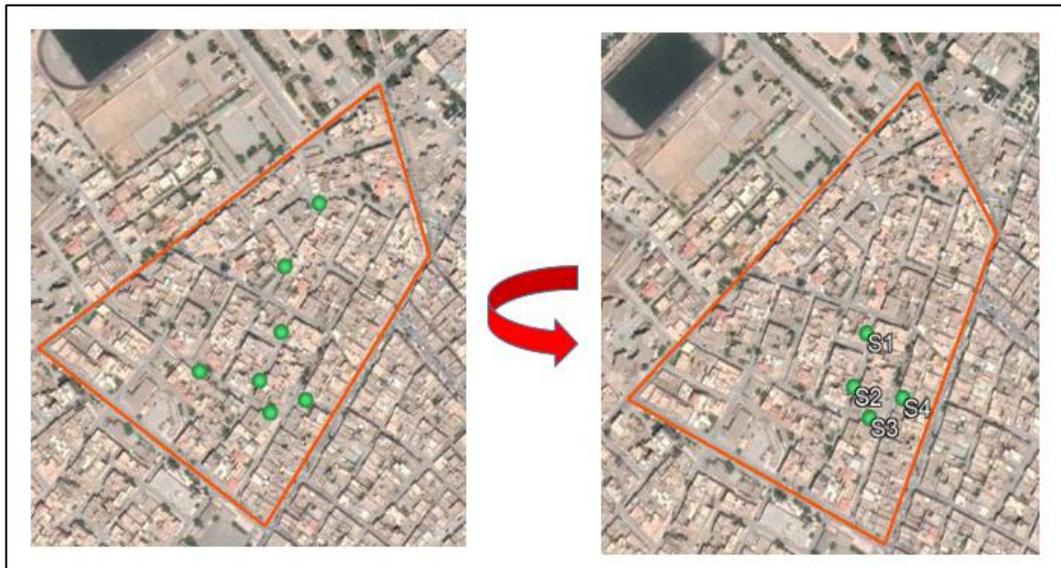


Figure IV. 20 : Les stations de mesure retenues pour l'investigation. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par l'auteur, 2019)

La détermination de la morphologie urbaine de deux configurations spatiales contemporaines a été réalisée au moyen d'un ensemble d'indicateurs :

Au niveau des tissus urbains, nous avons choisi la densité urbaine comme paramètre clé, évaluée par le coefficient d'emprise au sol (CES).

Au niveau des espaces extérieurs des tissus urbains, nous avons sélectionné des indicateurs géométriques, notamment le prospect H/L et le facteur de vue du ciel (FVC).

Notre objectif de recherche nécessite l'introduction de ces indicateurs à la fois à l'échelle du tissu urbain et à l'échelle de l'espace public.

Cette diversité morphologique et géométrique offerte par les deux sites nous permet de quantifier le microclimat et d'identifier les facteurs influençant les ambiances thermiques extérieures afin de répondre aux questions de notre problématique :

- Existe-t-il une interrelation entre les indicateurs morphologiques (densité et compacité) des tissus urbains et les indicateurs géométriques des espaces extérieurs de ces derniers?
- Les modifications microclimatiques, en particulier en ce qui concerne le confort thermique, sont-elles influencées par la morphologie urbaine, telle que mesurée par les indicateurs de densité et de compacité urbaines?

IV.7.4. Le corpus d'étude et le processus méthodologique

Le processus méthodologique est divisé en trois phases :

- Analyse morphologique des sites d'étude.
- Campagne de mesures pour quantifier le microclimat par des mesures in situ.
- Comparaison morphologique et climatique entre les deux sites d'investigation.

IV.7.5. Analyse morphologique des tissus urbains choisis comme sites d'étude

L'analyse morphologique est une méthode d'analyse urbaine qui étudie la forme urbaine du cadre bâti en fonction des types de bâtiments qui la composent et de leur distribution dans la trame viaire. En d'autres termes, cela consiste à considérer les relations dans la forme urbaine (trame viaire, parcellaires, limites, etc.). Elle permet la compréhension des différents éléments constitutifs de la structure physique et spatiale de l'espace urbain, à savoir l'étude d'un ensemble de systèmes dans le fait urbain :

- ✓ **La structure urbaine par le système du parcellaire et de voirie.**
- ✓ **La densité urbaine par le système du bâti et du non bâti.**
- ✓ **La compacité urbaine par le rapport de surface sur volume.**

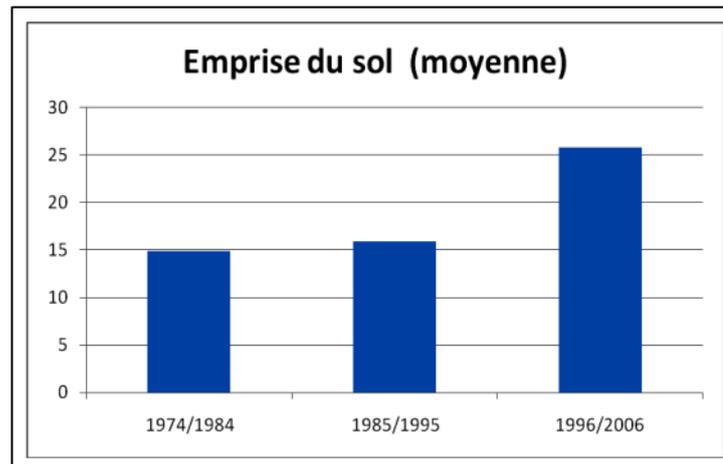
IV.7.6. Présentation du premier site d'investigation

La cité 500 logements est un quartier d'habitat collectif appartenant à la ZHUN II, située dans la partie ouest de la ville de Batna. Construit dans les années 80 comme une réponse à la crise du logement, il a été pris comme modèle représentant l'habitat collectif dans la ville de Batna. Il est considéré comme un tissu urbain lâche de faible densité urbaine, avec une valeur estimée de 17% de l'assiette foncière totale de la zone investiguée.

Les tissus urbains du secteur d'habitat collectif se caractérisent généralement par leur faible densité urbaine, souvent avec un coefficient d'emprise au sol compris entre 0.10 et 0.30.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Selon une étude menée par Benamouma (2019), qui consiste à étudier l'impact de la géométrie urbaine sur le confort thermique dans la ville de Batna, l'auteure a classé les tissus urbains d'habitat collectif en fonction de leur densité urbaine moyenne et de leur période d'apparition. Il ressort que la densité urbaine moyenne de l'habitat collectif dans la ville de Batna est faible. Toutefois, elle connaît une évolution avec le temps, ce phénomène étant généralement dû aux problèmes liés au foncier et à la nature juridique des terrains (terrains privés).



Graphes IV. 7 : L'évolution de l'emprise du sol moyenne de l'habitat collectif dans la ville de Batna. (Source : Benamouma, 2019)

➤ **La structure urbaine**

La cité 500 logements est située à la périphérie ouest de la ville de Batna. Elle est limitée au nord par une voie mécanique, au sud par le chemin de fer, à l'est par le lotissement Meddour, et à l'ouest par un lycée et un groupe d'habitat semi-collectif.

Le quartier 500 logements s'inscrit dans le projet d'habitat collectif de la zone d'habitat urbain nouvelle (ZHUN II), programmé dans le cadre du plan d'urbanisme directeur en 1978.

Il est réparti en regroupements de barres longues présentant des façades planes et caractérisé par une organisation spatiale fragmentée, ouverte et aérée, avec un espacement important entre les bâtiments. Chaque regroupement comporte au centre un espace ouvert, doté d'une structure géométrique bien définie destinée à servir d'espace vert, de parking ou d'aire de jeux. Ces vastes espaces libres facilitent un accès important au rayonnement solaire et favorisent un réchauffement notable des façades en modifiant considérablement les échanges de flux de chaleur et d'énergie (Mouada, 2019).

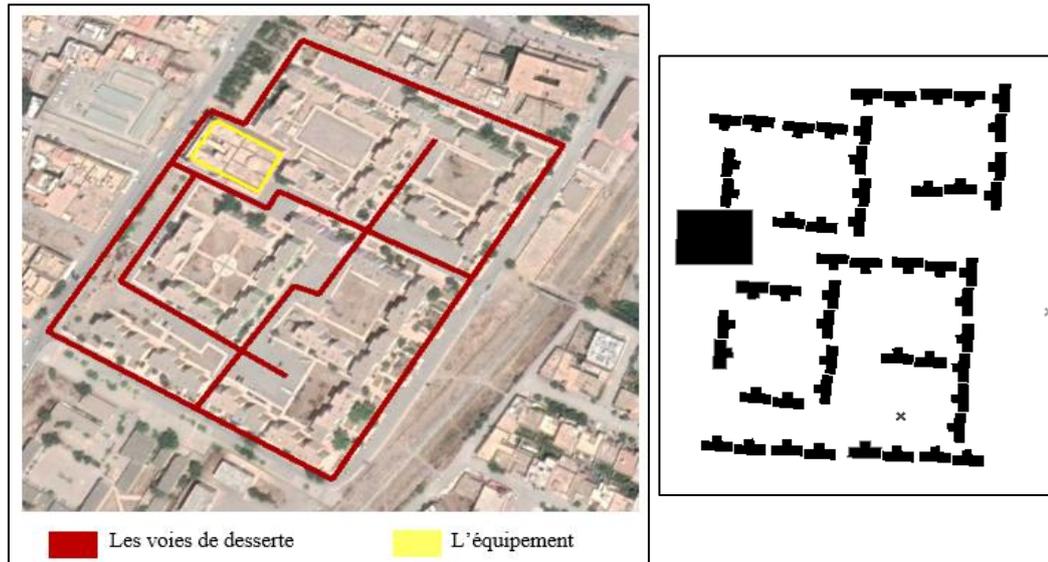


Figure IV. 21 : Les voies de desserte + un équipement dans la cité 500 logements. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par l'auteure, 2019)

➤ **La densité urbaine : (rapport entre bâti et non bâti)**

La densité bâtie est définie par le rapport de la surface totale de l'emprise du bâti au sol à la surface totale du périmètre du site considéré. Ce calcul s'effectue au moyen du coefficient d'emprise au sol : $\text{Emprise au sol} = \text{Surface bâtie} / \text{surface totale}$.

La cité des 500 logements est caractérisée par une densité très faible estimée de 17%. Cependant, **la compacité urbaine** est calculée à partir du coefficient de compacité (Cf), sa valeur est de l'ordre de 0.37, et un rapport entre les surfaces exposées et les surfaces non exposées de 5.23.

Tableau IV. 15 : Les valeurs de la densité et de la compacité urbaines pour la cité des 500 logements. (Source : Auteure, 2019)

Cité des 500 logements	
Surface totale de l'assiette foncière	65824 m ²
Surface totale bâtie	11476 m ²
La densité urbaine	
Coefficient d'emprise au sol (CES net) : au niveau de la parcelle	0.26
Coefficient d'emprise au sol (CES brut) : au niveau du quartier	0.174
La compacité urbaine	
Coefficient de forme (m²/m³)	0.37
Rapport surfaces exposées / surfaces non exposées	5.23

IV.7.7. Présentation du deuxième site d'investigation

Le deuxième site d'étude concerne le lotissement Kemouni, un lotissement auto-construit planifié d'habitat individuel, situé dans la partie sud/est de la ville de Batna, limité au nord par l'ancien quartier Z'mala, et au sud par le lotissement El Boustane, à l'est par le quartier Bouakal 03 et à l'ouest par Hai Chouhada. Il a été construit à la fin des années 1977, et s'inscrit dans un large programme du (PUD) 1978, dont l'objectif principal de ce dernier était la définition des zones d'extension tout en assurant un développement harmonieux de la ville. Il est considéré parmi les premiers lotissements planifiés d'ordre étatique de la ville de Batna.

➤ **La structure urbaine**

Le lotissement Kemouni représente le premier lotissement communal de l'après-indépendance, où l'habitat était auto-construit de type individuel. Les habitations ont une hauteur qui varie de R+1 jusqu'à R+5 ou plus. Il a une forme trapézoïdale, avec une organisation spatiale plus ou moins régulière. La trame viaire résulte pratiquement du processus d'emplacement des îlots, avec un réseau viaire rectiligne composé de différents types de rues : rues principales de 12m, rues secondaires de 6 à 8m, et rues tertiaires de 5m.

Il renferme 326 lots de formes et de surfaces variées, d'une superficie totale de 120360m². Il est divisé en trois secteurs (A, B, C). Il compte également quelques équipements tels qu'une mosquée, une annexe d'APC, un cinéma, et une école), couvrant une superficie de 9200m².

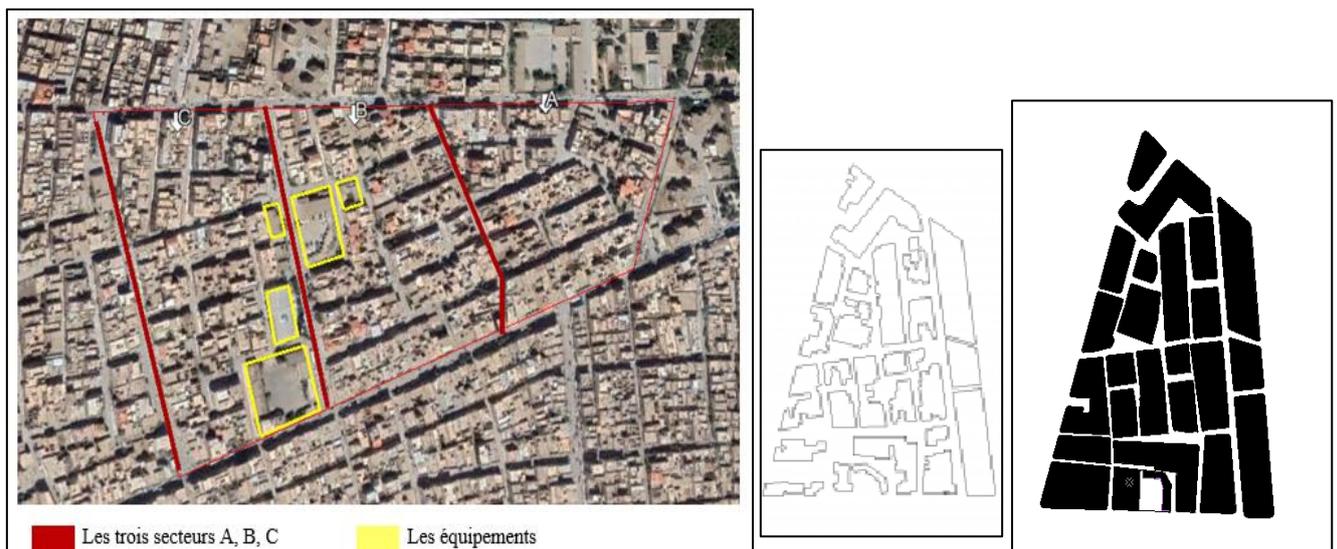


Figure IV. 22 : Les différents secteurs + les équipements du lotissement Kemouni. (Source : Google Earth Pro, réadaptée par l'auteure, 2019)

➤ **La densité urbaine**

La densité brute du tissu urbain Kemouni est estimée à 67%, tandis que la densité nette est de 0.97%. Avec un coefficient de forme (Cf) s'établissant à 0.23 et un rapport de surfaces exposées/surfaces non exposées de 1.73, ces valeurs lui confèrent un aspect dense et compact.

Tableau IV.16 : Les valeurs de la densité et de la compacité urbaines pour le lotissement Kemouni. (Source : Auteure, 2019)

Lotissement Kemouni	
Surface totale de l'assiette foncière	120360 m ²
Surface totale du bâti	80798.18 m ²
Densité urbaine	
Coefficient d'emprise au sol (CES net) : au niveau de la parcelle	0.671
Coefficient d'emprise au sol (CES brut) : au niveau du quartier	0.97
Compacité urbaine	
Coefficient de forme (m²/m³)	0.23
Rapport surfaces exposées / surfaces non exposées	1.73

IV.8. Le protocole de déroulement de la campagne de mesures

Comme d'autres villes à travers le monde, Batna a subi les effets des changements climatiques, avec une tendance à adopter un climat de plus en plus désertique, surtout en l'absence d'une densité végétale en milieu urbain. Cela fait de la saison estivale une véritable période de stress thermique. Les campagnes de mesures se sont déroulées pendant la saison de surchauffe, correspondant à la période estivale.

Les campagnes de mesures ont été réalisées en juillet 2019 sur une période de trois jours, soit le 22, le 23 et le 24. Ces jours sont considérés comme représentatifs, mais seules les valeurs du 23 ont été retenues en raison de leurs valeurs élevées. Le 23 juillet 2019 est considéré comme une journée typique avec un temps ensoleillé, peu venté et un ciel dégagé.

Cette expérience visait à mesurer quatre paramètres climatiques principaux pour quantifier le microclimat : la température de l'air (°C), la température du globe (°C) nécessaire pour le calcul de la température moyenne radiante (°C), l'humidité relative (%) et la vitesse du vent (m/s). Il convient de souligner que les relevés ont été effectués à l'ombre à une hauteur de 1.20 m du sol afin d'éviter toute interférence liée à des obstacles éventuels.

Les mesures ont été effectuées à un intervalle bi-horaire, de 06h00 du matin et se poursuivant jusqu'à 20h00 le soir. Cette plage horaire couvre l'ensemble de la journée pendant

laquelle les espaces extérieurs sont généralement fréquentés par les habitants. Cet intervalle permet également de suivre l'évolution du régime thermique journalier, c'est-à-dire :

- **Après le lever du soleil** : Début de l'évolution des gains à 06h00.
- **A midi** : Quand le soleil est perpendiculaire (au zénith) à 12h00.
- **L'après-midi** : Un maximum cumul de la chaleur emmagasinée à 16h 00
- **Après le coucher du soleil** : Le temps du début de la restitution de la chaleur à 20h00.

En outre, chaque mesure a duré entre 2 et 5 minutes, garantissant ainsi la stabilité des paramètres climatiques. Cette stabilité a été favorisée par la proximité des points de mesure les uns des autres, comme indiqué par Djaghrouri (2021). Par ailleurs, les paramètres climatiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) de la station météorologique de Batna ont été pris en compte dans le but de les comparer avec ceux mesurés sur le terrain.

IV.8.1. Les instruments de mesure (description des appareils de mesure)

Pour assurer une campagne de mesures in situ, l'utilisation d'instruments portatifs est indispensable pour obtenir des mesures instantanées, avec l'enregistrement direct des valeurs sur l'instrument lui-même.

Dans notre processus de travail in situ, nous avons opté pour l'utilisation de l'instrument appelé Testo 480, équipé de différentes sondes. Le Testo 480 est un appareil de mesure multifonctionnel doté d'une gamme de sondes numériques à programmation intelligente et spéciale. Ces sondes peuvent être étalonnées indépendamment de l'appareil et permettent la mesure de paramètres climatiques pertinents tels que la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la vitesse de l'air, etc.

Le Testo 480 est particulièrement adapté aux mesures de confort pour l'évaluation des postes de travail et des courants d'air dans et sur les installations de climatisation. Avec un seul appareil, il est possible de mesurer tous les paramètres climatiques de manière fiable et précise, tels que le débit, la température, l'humidité, la pression, l'intensité lumineuse, la chaleur rayonnante, le degré de turbulence, le CO₂, le PMV/PPD et la valeur WBGT.

Les programmes de mesure intégrés sont selon diverses normes internationales :

- ✓ Mesures CTA en réseau selon la norme EN 12599.
- ✓ Mesures PMV/PPD selon la norme ISO 7730.
- ✓ Mesures du degré de turbulence selon la norme EN 13779.
- ✓ Mesures WBGT selon les normes ISO 7243 ou DIN 33403.

Toutes les mesures ont été effectuées avec le Testo 480 data Logger et ces deux sondes :

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

- ✓ Sonde pour mesurer la température de l'air (°C) et l'humidité relative (%).
- ✓ Sonde pour mesurer la vitesse de l'air (m/s).
- ✓ Sonde pour mesurer la température globe (°C), cette grandeur a été mesurée par le même Testo 480 data Logger inséré dans une boule noircie de 5 cm de diamètre, où se réunissent toutes les températures surfaciques environnantes (Djarghrouri, 2021).

Ces mesures ont été prises à une hauteur de 1.20m, considérée selon les normes européennes comme la hauteur du centre de gravité du corps humain.

Le tableau montre l'appareil Testo 480 data Logger et les deux sondes utilisées lors de notre campagne de mesures :

Tableau IV. 17 : L'instrument Testo 480 data Logger utilisé dans la campagne de mesures. (Source : Auteure, 2019)

Testo 480 Data Logger					
Variables et	appareil	Référence de la sonde	Unité	Précision	
Méthode de stockage					
Température de l'air (Ta)	Testo 480 0563 4800	12 Φ 0636 9743	°C	+0.5 °C	
Automatique					
Humidité relative (RH)	-	12 Φ 0636 9743	%	+1.0%	
Automatique					
Vitesse du vent (Vv)	-	Helix 100 Φ mm 0635 9343	m/s	+0.1 m/s	
Automatique					
Température globe (Tg)	-	12 Φ (200 mm) 0635 1543	°C	+0.5 °C	
Automatique					

IV.8.2. Les paramètres climatiques mesurés

L'évaluation du confort thermique en milieu urbain demeure une étape essentielle pour assurer la qualité de vie des habitants et répondre aux enjeux climatiques et environnementaux de la ville. Le confort thermique est lié à cinq principales variables climatiques : la température moyenne radiante, le rayonnement solaire, la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Le but primordial de la campagne de mesures est de mesurer ces cinq paramètres ayant une incidence sur le microclimat et le confort thermique extérieur.

IV.8.2.1. La température de l'air : La température est un indicateur du niveau énergétique de l'air, résultant du bilan global des échanges de chaleur à l'emplacement et au moment de la mesure. Elle connaît des variations constantes dans l'espace et le temps. La conduction contribue à réduire la couche d'air en contact direct avec le sol chaud, tandis que la convection transfère la chaleur vers les couches supérieures. La prise de la température de l'air est systématiquement effectuée sous abri et à l'ombre pour assurer la précision des relevés (Givoni, 1978 ; Tabeaud, 2000). Les températures élevées de l'air sont généralement caractéristiques des climats semi-arides, en particulier pendant les périodes de surchauffe ou de canicule.

IV.8.2.2. La température moyenne radiante : La température moyenne radiante globalise les échanges thermiques par rayonnement entre un individu et son environnement. Cette variable thermique essentielle en milieu urbain varie fortement en fonction du rayonnement solaire incident. La température moyenne radiante peut doubler de valeur en cas de ciel clair par rapport à un ciel couvert (Grosdemouge, 2020). La TMR est une grandeur thermique pouvant être mesurée à partir d'un thermomètre à globe noir ou gris. Cet instrument se présente sous la forme d'un thermomètre ordinaire inséré à l'intérieur d'une sphère en cuivre noirci, d'un diamètre d'environ 10 à 15 cm (Thorsson et al., 2007).



Figure IV. 23 : Thermomètre 38 mm plat globe gris. (Source: Thorsson et al., 2007)

Dans la présente recherche, la température moyenne radiante (TMR) est calculée selon la méthode B décrite par Thorsson et al. (2007) (voir le chapitre II). Après avoir réalisé des mesures des différentes variables climatiques nécessaires à l'application de l'équation, la température du globe a été mesurée grâce à l'instrument Testo 480. Ensuite, les données climatiques mesurées sur le terrain (T_a , HR, V_v et T_g) ont été introduites dans le logiciel Matlab, qui permet de calculer la TMR en utilisant l'équation de la méthode B (Voir l'annexe 02):

$$T_{mrt} = [(T_g + 273)^4 + 2,5 \times 108 \times V_a^{0,6} \times (T_g - T_a)]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (IV. 13)$$

IV.8.2.3. L'humidité relative : En milieu semi-aride, le climat se caractérise par des taux d'humidité faibles et des températures élevées. Cette condition affecte l'air, le rendant sec pendant les saisons chaudes. Sa valeur indique l'humidité ou la sécheresse de l'air.

IV.8.2.4. La vitesse du vent : Le vent est caractérisé par le déplacement horizontal de l'air, généralement de haute à basse pression. Plus la différence de pression est grande, plus le vent est fort. Mesuré en (m/s) ou en (km/h), le vent est variable et instable, présentant plusieurs directions et pouvant être représenté par une rose des vents. Le vent en milieu urbain est un indicateur participant à l'amélioration ou à la détérioration du confort thermique des espaces extérieurs. Il affecte les échanges thermiques du corps humain.

IV.9. Interprétation des données mesurées pour chaque type de tissu urbain

Pour interpréter les données mesurées, nous analyserons chaque tissu indépendamment en interprétant les résultats de chaque station de mesure. Ensuite, une étude comparative entre les données des deux sites d'investigation sera effectuée pour étudier les variations microclimatiques au niveau du quartier et évaluer le microclimat dans chaque tissu en utilisant la température moyenne radiante (TMR).

La représentation graphique des graphes a été réalisée par le logiciel Origin Pro 2018 (Annexe 01), un outil complet d'analyse de données et de mise en forme graphique fournissant une gamme complète de fonctionnalités (analyse de pics, ajustement de courbes, statistiques, etc.) pour répondre aux exigences de qualité et aux besoins spécifiques de la communauté scientifique (chercheurs, ingénieurs, techniciens, etc.).

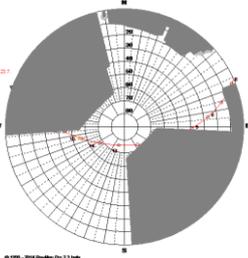
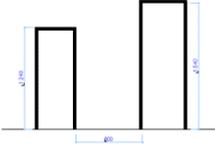
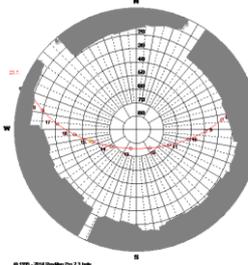
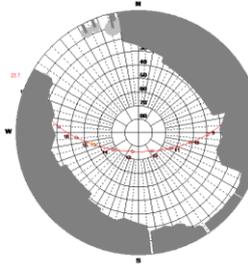
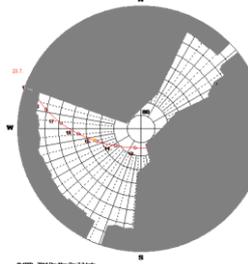
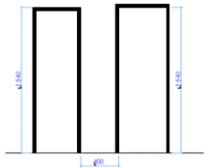
IV.9.1. Premier site d'investigation : Cité 500 logements

Dans un premier temps, nous effectuerons une analyse selon les critères morphologiques et géométriques pour chaque station de mesure. Ensuite, nous procéderons à l'analyse climatique des stations de mesure.

Stations N° 1, 2, 3, et 4 :

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

Tableau IV. 18 : Les indicateurs morphologiques et géométriques retenus pour chaque station. (Source : Auteure, 2019)

Cité 500 logements				
Densité urbaine : 17%				
Stations	H/L	FVC	Diagramme polaire	Coupe schématique
	1.73	0.67	NE/SO 	
	0.27	0.78	NO/SE 	
	0.46	0.74	NO/SE 	
	3.85	0.35	NE/SO 	

IV.9.2. Résultats d'évaluation des indicateurs morphologiques

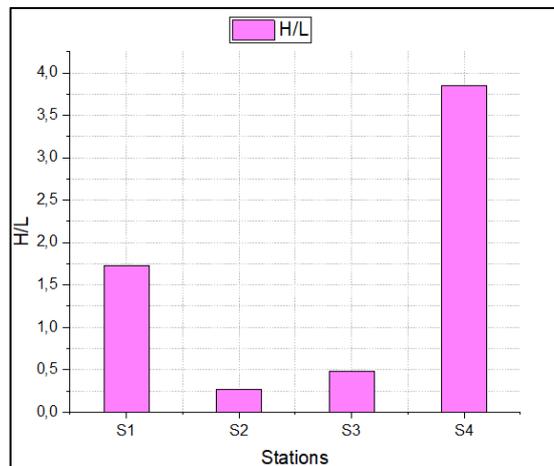
IV.9.2.1. Le ratio H/L

Les stations de mesure dans le quartier 500 logements sont réparties dans deux catégories d'espaces :

- Dans les espacements entre les bâtiments. Ce type de tissu crée des espaces utilisés comme des lieux de passage pour les habitants de la cité et se caractérisent par leur faible profondeur.
- Dans les espaces ouverts utilisés comme des parkings et des aires de jeux.

Les résultats du calcul du ratio H/L montrent une différence apparente entre les valeurs de cet indicateur. D'ailleurs, on observe une valeur faible de 0.27 dans la station 02, orientée NO/SE, qui représente un espace dégagé avec une distance de 56 mètres entre deux bâtiments. De même, la station 03, orientée NO/SE, affiche une valeur de 0.46. En revanche, les stations 01 et 04, orientées NE/SO, présentent les valeurs les plus élevées, respectivement 1.73 et 3.85. Ces résultats suggèrent que les bâtiments sont plus proches les uns des autres par rapport aux stations 02 et 03.

Les valeurs du ratio H/L sont illustrées dans le graphe ci-dessous :

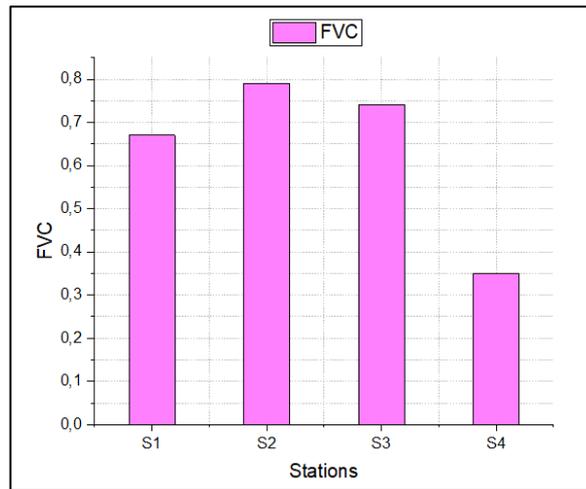


Graphe IV. 8 : Les valeurs du ratio H/L en fonction des stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)

IV.9.2.2. Le facteur de vue du ciel (FVC)

Le calcul de l'indicateur du facteur de vue du ciel révèle des différences de valeurs entre les quatre stations de mesure (01, 02, 03, et 04), qui affichent respectivement les valeurs de 0.67, 0.78, 0.74, et 0.35. Les stations 02 et 03 présentent les valeurs les plus élevées du FVC, avec 0.78 et 0.74 respectivement, en raison principalement de l'absence d'obstacles tels que les bâtiments ou les arbres de hauts tiges. Par ailleurs, la station 04 présente la valeur la plus faible du FVC, avec une valeur de 0.35.

Les valeurs du calcul du (FVC) sont illustrées dans le graphe ci-après :



Graph IV. 9 : Les valeurs du FVC en fonction des stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)

IV.9.3. Résultats des données climatiques mesurées

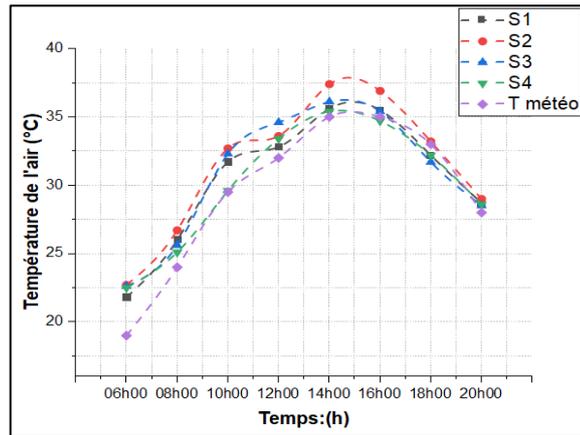
L'interprétation des résultats des variations climatiques (concernant les quatre paramètres climatiques mesurés : la température de l'air (°C), l'humidité relative (%), la vitesse du vent (m/s), et enfin la température moyenne radiante (°C)) a été effectuée pour chaque station de mesure dans l'intervalle de 06h00 du matin à 20h00 du soir.

IV.9.3.1. La variation de température de l'air

Le graphe (IV.10) illustre l'évolution journalière de la température de l'air ambiant pour chaque station de mesure au cours d'une journée représentative d'été et celle enregistrée par la station météorologique de Batna. La lecture du graphe montre que les valeurs de température de l'air ont tendance à augmenter graduellement dans toutes les stations à partir de 06h00 du matin jusqu'à 14h00, où la température atteint une valeur maximale de 37.4°C enregistrée dans la station 02 et une valeur minimale de 35.4°C enregistrée dans la station 04 à 14h00.

Après 14h00, la température de l'air dans toutes les stations commence à diminuer pour atteindre des valeurs basses de 32°C à 18h00, et à 20h00, les valeurs sont presque identiques, résultant de l'absence de la lumière du soleil. Après l'analyse des résultats, on conclut que les températures de l'air pour une journée d'été ensoleillée avec ciel dégagé et peu ventée tendent à s'accroître progressivement pour atteindre leur maximum de réchauffement entre 10h00 et 16h00, pour ensuite décroître jusqu'en fin de journée. Il paraît aussi clairement que dans toutes les stations, les températures sont hors de la zone de confort. La comparaison de ces résultats avec ceux de la station montre que les températures de l'air mesurées au niveau des stations du site des 500 logements indiquent une augmentation importante par rapport aux températures enregistrées auprès de la station météo de 06h00 à 16h00, ensuite les valeurs commencent à se rapprocher entre 18h00 et 20h00.

Le graphe ci-dessous illustre les valeurs de la température de l'air mesurée dans chaque station.

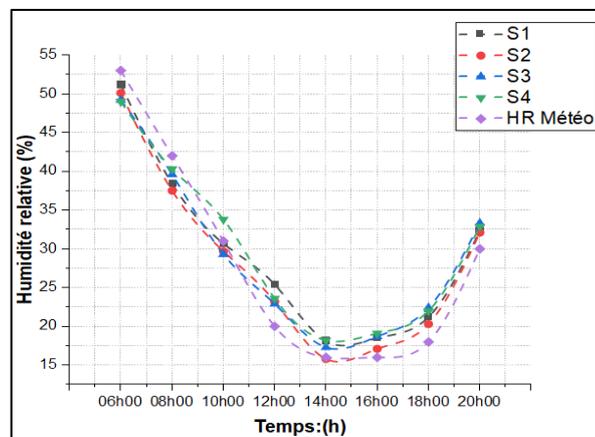


Graphe IV. 10 : Comparaison entre les températures de l'air mesurées au niveau des quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))

IV.9.3.2. La variation d'humidité relative

Le graphe (IV.11) illustre le parcours de la courbe d'humidité relative pour les quatre stations de mesure, montrant que les valeurs de l'humidité pour toutes les stations sont en relation inverse avec celles des températures, c'est-à-dire une haute valeur de température induit une basse valeur d'humidité. On remarque également que les valeurs d'humidité maximums commencent à décroître de 06h00 du matin jusqu'à 14h00 afin d'atteindre un état dit sec pour toutes les stations, où elles enregistrent leur minimum pour les stations respectivement 02, 03, 01, et 04.

À partir de 10h00 du matin les taux d'humidité relative pour toutes les stations de mesure commencent à accroître pour devenir supérieurs à ceux de la station météorologique de Batna et enregistrent des écarts d'augmentation à 12h00, 14h00, 16h00, 18h00 et 20h00, sauf à la station 02 à 14h00, où l'on enregistre une valeur minimale de 15.8% avec un écart de diminution $\Delta T = -0.2\%$ par rapport à la station météorologique.



Graphe IV. 11 : Comparaison entre les humidités relatives mesurées pour les quatre stations pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))

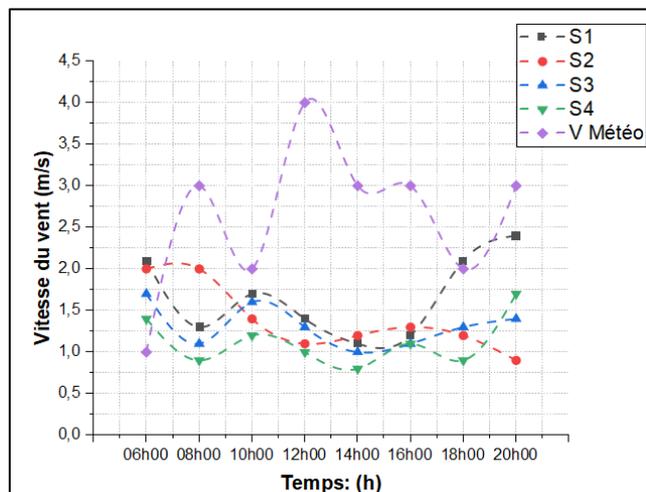
IV.9.3.3. La variation de vitesse du vent

Le graphe (IV.12) illustre l'évolution journalière de la vitesse du vent au cours d'une journée d'été peu ventée dans le quartier des 500 logements.

Les vitesses du vent dans ce quartier restent instables de 06h00 à 20h00 pour atteindre des valeurs minimales dans l'ensemble des stations 04, 03 et 01 respectivement à 14h00. Les vitesses commencent à diminuer entre 06h00 et 08h00, ensuite elles augmentent entre 08h00 et 10h00, puis elles recommencent à décroître une nouvelle fois de 10h00 jusqu'à 14h00, pour ensuite recommencer à augmenter de 14h00 à 16h00.

Les valeurs des vitesses du vent mesurées dans toutes les stations sont inférieures aux valeurs de la station météorologique, sauf à 06h00 du matin où toutes les stations enregistrent des vitesses supérieures à celles relevées à la station. Ces résultats s'expliquent par la présence d'obstacles artificiels (les bâtiments) dans les zones urbaines. Contrairement au milieu naturel où les stations météorologiques sont généralement implantées, les obstacles bâtis altèrent la vitesse du vent en milieu urbain.

En générale, les résultats montrent qu'au début et à la fin de la journée les vitesses du vent dans le quartier sont supérieures à celles relevée au cours de la période de la surchauffe diurne, cela justifie la raison pour laquelle les espaces étaient plus frais en ces moments, car cela permet la dissipation de la chaleur près du sol.



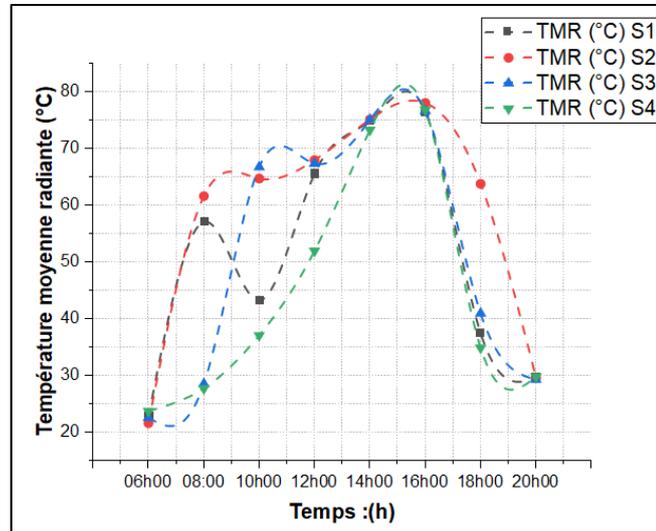
Graphe IV. 12 : Comparaison des vitesses du vent mesurées pour les quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))

IV.9.3.4. La variation de température moyenne radiante

Le graphe (IV.13) illustre les températures moyennes radiantes enregistrées dans chaque station de mesure. Ces valeurs présentent des variations d'une station à l'autre, avec une augmentation progressive des températures radiantes, bien que celles-ci diffèrent en termes de valeur et en termes de temps. Les températures maximales sont observées à la station 02,

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

atteignant leur point culminant à 78.15°C à 16h00, suivies respectivement par les stations 03, 01 et 04. Cela est remarquable durant les heures de pic de chaleur. Quant aux températures minimales, elles sont enregistrées à 06h00, 18h00 et 20h00 à cause de l'effet insignifiant des flux radiatifs.



Graph IV. 13 : Comparaison des températures moyennes radiantes pour les quatre stations. (Source : Auteure, (23/07/2019))

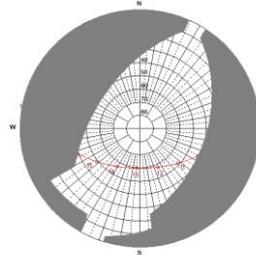
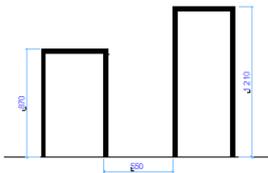
IV.9.4. Le deuxième site d'étude : Lotissement Kemouni

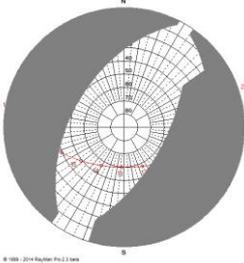
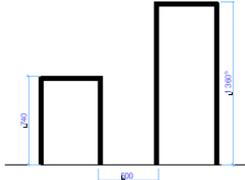
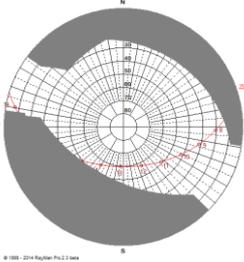
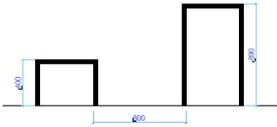
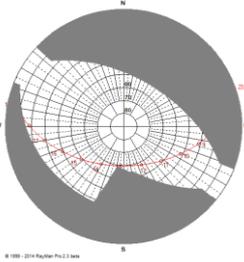
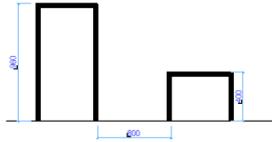
Les mêmes étapes d'interprétation des résultats précédentes ont été suivies pour le lotissement Kemouni.

IV.9.5. Les résultats des indicateurs morphologiques et géométriques

Station N° 1, 2, 3, et 4 :

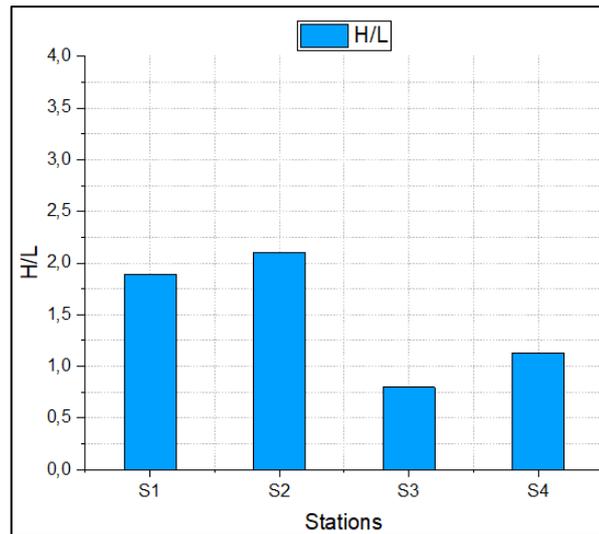
Tableau IV. 19 : Les indicateurs morphologiques et géométriques retenus pour chaque station. (Source : Auteure, 2019)

Lotissement Kemouni				
Densité urbaine : 67%				
Stations	H/L	FVC	Diagramme polaire	Coupe schématique
	1.89	0.33	NE/SO 	

	<p>2.10</p>	<p>0.29</p>	<p>NE/SO</p> 	
	<p>0.80</p>	<p>0.56</p>	<p>NO/SE</p> 	
	<p>1.13</p>	<p>0.44</p>	<p>NO/SE</p> 	

IV.9.5.1. Le ratio H/L

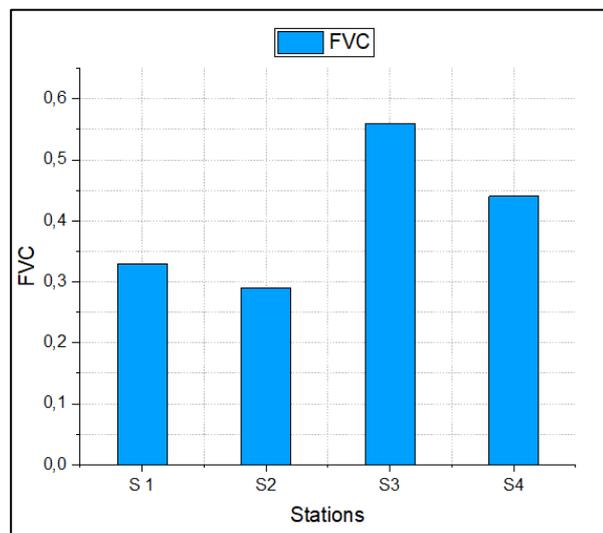
Les stations de mesure pour le lotissement Kemouni sont placées au milieu des rues qui forment les espaces extérieurs du quartier. Les résultats du calcul du ratio H/L montrent que les stations 01 et 02, orientées NE/SO, enregistrent les valeurs les plus élevées du ratio H/L avec des valeurs de 1.89 et 2.10 respectivement. En revanche, la station 03, orientée NO/SE, enregistre la valeur la plus faible avec 0.80, suivie de la station 04, orientée NO/SE, avec 1.13. Il faut aussi indiquer que le bâti au niveau du quartier Kemouni est moins distant par rapport au cas des 500 logements.



Graphe IV. 14 : Les différentes valeurs du ratio H/L en fonction des quatre stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)

IV.9.5.2. Le facteur de vue du ciel (FVC)

Pour le facteur de vue du ciel, chaque station dans le lotissement Kemouni enregistre une valeur différente par rapport à l'autre, allant de 0.29 pour la station 02 à 0.56 pour la station 03 en passant par 0.33 pour la station 01 et 0.44 pour la station 04.



Graphe IV. 15 : Les différentes valeurs du FVC en fonction des quatre stations de mesure. (Source : Auteure, 2019)

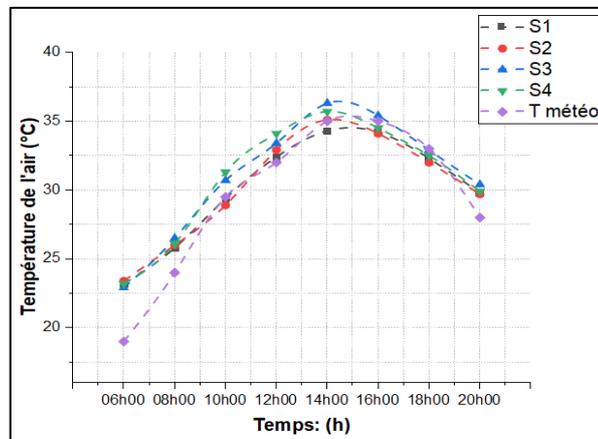
IV.9.6. Résultats des données climatiques mesurées

Les étapes d'interprétation des résultats climatiques sont les mêmes que celles entreprises pour le quartier des 500 logements, impliquant l'interprétation des données climatiques mesurées pour chaque station, suivie de leur comparaison avec les données requises de la station météorologique de Batna.

IV.9.6.1. La variation de température de l'air

Le graphe (IV.16) présente l'évolution journalière des températures de l'air mesurées aux quatre stations au cours d'une journée représentative d'été dans le lotissement Kemouni. Les courbes des températures ambiantes montrent que les stations 03 et 04 enregistrent les températures maximales les plus élevées, atteignant respectivement 36.3°C et 35.7°C, et les températures minimales ont été observées dans les stations 01 et 02, avec des valeurs respectives d'environ 34.3°C et 35.1°C.

Les températures de l'air relevées dans les quatre stations (01, 02, 03 et 04) sont plus élevées que celles de la station météorologique, avec des écarts variables d'une station à l'autre et d'un moment à l'autre. Notamment à 06h00 du matin, après le lever du soleil, et à 20h00 le soir, après le coucher du soleil, les températures de l'air dans le quartier Kemouni aux quatre stations de mesure présentent des écarts importants à ces moments particuliers de la journée par rapport à celles relevées à la station, avec un écart moyen $\Delta T = 4.17^\circ\text{C}$ à 06h00 et un écart moyen $\Delta T = 1.95^\circ\text{C}$ à 20h00. On peut dire que les stations 01 et 02 enregistrent des températures qui restent toutefois inférieures à celles de la station à 10h00, 14h00, 16h00 et 18h00. Cependant, les stations 03 et 04 maintiennent des températures élevées par rapport aux températures de la station de 06h00 à 16h00.



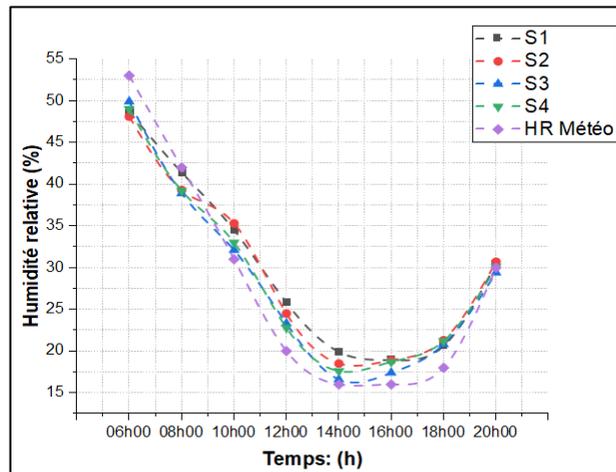
Graphique IV. 16 : Comparaison entre les températures de l'air mesurées pour les quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))

IV.9.6.2. La variation d'humidité relative

La même chose est à noter pour l'humidité relative dans le quartier Kemouni. Les niveaux d'humidité atteignent leur maximum au début de la journée vers 06h00 et leurs niveaux les plus bas vers 14h00. Les valeurs d'humidité les plus faibles sont enregistrées aux niveaux des stations 03 et 04, atteignant respectivement les valeurs minimales de 16.6% et 17.6% à 14h00, suivies des stations 02 et 01 avec des valeurs de 18.5% et 19.9% respectivement.

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

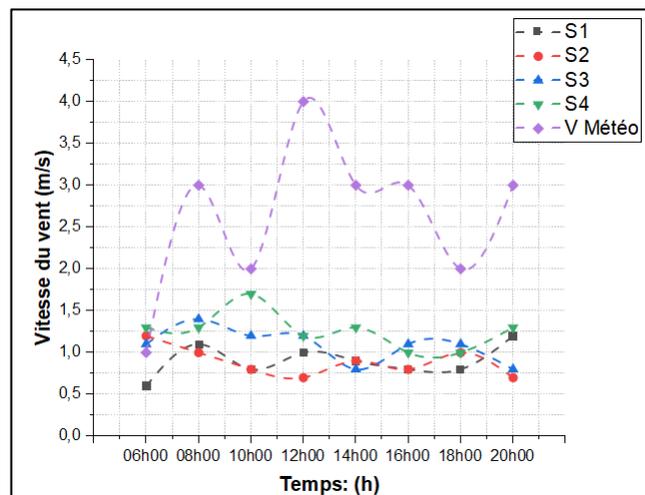
Les taux d'humidité relative enregistrés dans l'ensemble des stations du quartier Kemouni sont inférieurs à ceux de la station météorologique de Batna entre 06h00 et 08h00. Malgré cette tendance, les valeurs d'humidité relative mesurées in situ deviennent légèrement supérieures par rapport aux valeurs de la station météorologique entre 10h00 et 18h00, avec un écart moyen d'augmentation $\Delta T = 2.15\%$ à 14h00, un écart minimum de 0.6% pour la station 03 et un écart maximum de 3.9% pour la station 01.



Graph IV. 17 : Comparaison entre les humidités relatives mesurées pour les quatre stations pendant la période estivale. (Source : Auteure, (23/07/2019))

IV.9.6.3. La variation de vitesse du vent

Les vitesses du vent dans toutes les stations de mesure dans le quartier Kemouni demeurent inférieures à celles relevées à la station météorologique de Batna. Les valeurs des vitesses du vent révèlent des variations temporelles et spatiales qui, apparemment, ne suivent aucune logique dans leurs évolutions et restent instables. Les valeurs les plus basses sont obtenues dans les stations 01 et 02, suivies des stations 03 et 04.

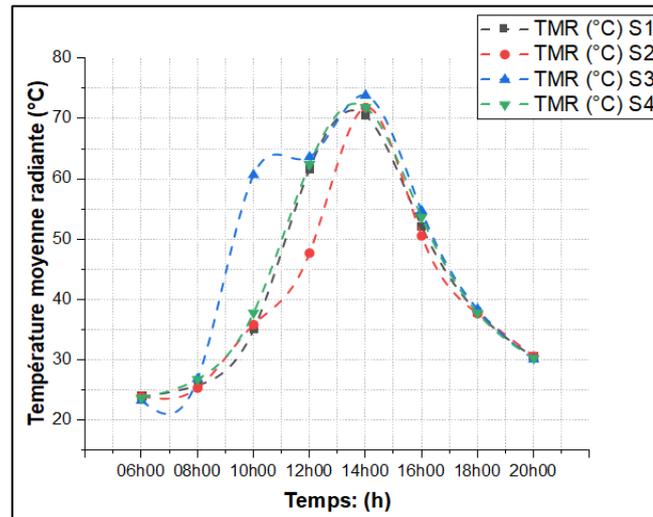


Graph IV. 18 : Comparaison des vitesses du vent mesurées pour les quatre stations, pendant la période estivale. (Source : Auteure, 23/07/2019))

IV.9.6.4. Température moyenne radiante

Pour la température moyenne radiante, elle progresse continuellement de 06h00 à 14h00 pour toutes les stations, pour ensuite commencer à décroître de 14h00 à 20h00. Cela peut être attribué à une exposition constante aux rayons solaires directs.

Les valeurs maximales sont enregistrées à 14h00, avec une valeur de 73.30°C au niveau de la station 03, suivie de la station 04 avec 71.86°C. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pour les stations 01 et 02 respectivement.



Graphique IV. 19 : Comparaison des températures moyennes radiantes pour les quatre stations. (Source : Auteure, 23/07/2019))

IV.10. Synthèse de l'analyse des résultats des deux quartiers

Les résultats de la comparaison morphologique et microclimatique entre les deux sites révèlent une relation directe entre les facteurs morphologiques (densité et compacité) et les indicateurs géométriques (ratio H/L et FVC). Les résultats indiquent une relation positive entre la densité surfacique bâtie, la compacité urbaine et le ratio H/L, indiquant que l'augmentation du ratio H/L est étroitement associée à une augmentation de la densité et de la compacité. Cependant, une relation négative a été constatée entre le facteur de vue du ciel (FVC) et la densité surfacique bâtie. Les valeurs du facteur de vue du ciel sont étroitement corrélées aux indicateurs morphologiques de densité et de compacité, dont l'augmentation de ces indicateurs entraîne une réduction des valeurs du FVC, et vice versa.

Dans le cas du quartier des 500 logements, la faible densité et compacité urbaines ont conduit à la création d'espaces ouverts offrant une grande ouverture au ciel, facilitant la pénétration des radiations solaires directes sur différentes surfaces (sol et façade). Cela rend le rayonnement solaire intense, surtout lorsque le soleil devient perpendiculaire (au zénith), ce qui affecte principalement la température moyenne radiante (TMR) dans les espaces extérieurs,

ainsi que les autres paramètres climatiques tels que la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent. Dans ce cas, les vitesses du vent sont généralement plus élevées en raison de la présence d'espaces ouverts qui facilitent la circulation du vent.

En revanche, dans le cas du lotissement Kemouni, caractérisé par un tissu dense et compact, les espaces extérieurs sous forme de rues profondes et relativement étroites avec la présence des éléments saillants comme les balcons ne permettent pas un accès direct aux radiations solaires incidentes en raison du ratio H/L élevé et du FVC réduit. La plupart des espaces extérieurs sont ombragés, révèlent des valeurs de température moyenne radiante (TMR) inférieures. Cependant, cette situation tend à s'inverser avant le lever et après le coucher du soleil, où l'on observe que les espaces ouverts du quartier des 500 logements se refroidissent plus rapidement par rapport aux espaces extérieurs du lotissement Kemouni, qui enregistrent des températures de l'air plus élevées. Cette différence s'explique par le piégeage radiatif dans les rues du lotissement, rendant la restitution de la chaleur emmagasinée plus lente.

Par ailleurs, l'orientation des rues a un effet considérable sur les températures de l'air et radiantes mesurées. Les stations orientées NE/SO sont moins exposées au soleil que les stations orientées NO/SE. L'orientation des rues semble donc être un paramètre déterminant dans l'évaluation du confort thermique extérieur. Conformément aux résultats de (Boucheriba et al., 2010), la géométrie urbaine influence la température ambiante et radiante au niveau des espaces publics.

Conclusion

De nos jours, l'apport des nouvelles technologies telles que les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et la télédétection est indispensable pour une meilleure gestion et surveillance de l'impact de l'expansion urbaine sur l'état de l'environnement climatique. L'approche méthodologique de télédétection a permis d'examiner l'impact de la densité et de la compacité urbaines à l'échelle de la ville sur la variable de température de surface du sol (LST). Les cartes d'occupation du sol et les cartes de LST constituent des outils précieux d'aide à la planification et à la prise de décision, notamment en matière de climat urbain. Ces données géospatiales offrent une assise scientifique solide pour la compréhension des effets de la morphologie urbaine sur les ambiances thermiques à l'échelle intra-urbaine.

Les résultats enregistrés montrent une corrélation inverse entre la densité, la compacité urbaine et la température de surface du sol (LST) dans le secteur urbain en raison de l'ombre générée par ces derniers. L'accroissement des niveaux de densité et de compacité urbaines conduit à une diminution des valeurs de LST au sein des tissus urbains. Alors qu'une relation

Chapitre IV : Investigation (Analyse des données par télédétection et par mesures in situ)

positive a été établie à une échelle globale entre l'évolution spatio-temporelle de la tache urbaine et la température de surface du sol (LST) à cause de la diminution des surfaces de végétation. En outre, les résultats obtenus révèlent une relation étroite entre LST et la répartition des caractéristiques morphologiques liées à l'usage du sol.

Les résultats obtenus sont très prometteurs et mettent en évidence l'importance et la faisabilité des données spatiales intelligentes pour évaluer le développement de l'environnement urbain à grande échelle, que ce soit à l'échelle locale ou globale. La méthode de mesures in situ dans les milieux urbains nous a permis de collecter des données atmosphériques, offrant ainsi un moyen efficace d'évaluer le microclimat à une échelle réduite. Ces données sont essentielles pour effectuer une simulation numérique des tissus urbains sélectionnés dans les chapitres suivants. Le but principal est de quantifier le confort thermique dans les espaces extérieurs et d'explorer des moyens d'améliorer ce confort en optimisant la forme urbaine à travers des indicateurs morphologiques et géométriques.

Les résultats de la télédétection concordent parfaitement avec les mesures in situ, confirmant que la distribution de la température de surface du sol (LST) sur les sites urbains présente des variations significatives en termes d'amplitude et d'intensité en fonction des caractéristiques de la vue du ciel et de la surface. Les zones présentant les températures de surface terrestre (LST) les plus élevées sont notamment celles avec un facteur de vue du ciel plus élevé, une couverture végétale plus faible, et une concentration plus importante de sources anthropiques.

Chapitre V : Simulation numérique

(Logiciel ENVI-met)

«ENVI-met nous fournit un outil incroyablement puissant pour examiner une série de critères de qualité environnementale et de confort thermique extérieur pendant que nous sommes dans le processus de conception. Cela était impensable il n'y a pas si longtemps et va révolutionner nos flux de travail. L'intégration via des plugins avec d'autres outils comme Sketchup met ces outils à notre portée et nous donne une méthodologie agile et décentralisée parfaitement adaptée aux réalités de la vie professionnelle d'aujourd'hui.»

(Steven Velegrinis,
envi-met.com)

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons entrepris d'évaluer le climat urbain de la ville de Batna par deux méthodes : la télédétection et les mesures in situ. Dans le présent chapitre, nous quantifierons le confort thermique extérieur grâce à une méthodologie numérique, en utilisant la modélisation et la simulation numérique. Cette méthode est indispensable pour le calcul de plusieurs indices thermiques tels que le PMV, le PET et l'UTCI. Cette approche, largement approuvée dans la littérature, s'est révélée efficace pour évaluer le microclimat à une échelle réduite, celle du quartier, en fournissant une estimation quantitative du confort thermique en milieu urbain. Elle offre la possibilité de reproduire le milieu urbain réel de manière détaillée, en incluant la totalité de ses composants tels que les bâtiments avec leurs vraies hauteurs, les matériaux de construction et de revêtement de surfaces, la végétation, les surfaces d'eau, etc. Elle permet d'étudier les interactions entre le microclimat extérieur de l'environnement bâti et d'estimer le confort thermique en un temps de simulation relativement court et rapide par rapport aux mesures sur le terrain, constituant ainsi un facteur important pour la recherche sur les formes urbaines et le processus d'optimisation à travers différents plans de conception (Tumini et al., 2016).

Dans ce cas, et face à la diversité des modèles numériques émergeant dans le domaine du climat urbain, qui sont capables d'examiner l'effet de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique dans les espaces extérieurs, notre choix s'est orienté vers le modèle numérique ENVI-met 4. C'est l'un des outils les plus compréhensibles pour évaluer le confort thermique extérieur et adapté à l'évaluation des paramètres microclimatiques sélectionnés suivant les objectifs ciblés de notre recherche. La fiabilité et la précision du logiciel tridimensionnel ENVI-met ont été examinées via plusieurs travaux de recherche antérieurs (Emmanuel, Rosenlund et Johansson 2007 ; Shahidan, 2015 ; Sözen et Koçlar Oral, 2018 ; Ahmadi Venhari, Tenpierik et Taleghani, 2019).

Dans ce chapitre, nous justifierons d'abord notre choix du logiciel ENVI-met. Ensuite, nous validerons les résultats du logiciel en établissant une corrélation entre les résultats mesurés et simulés. Cela nous permettra par la suite de calculer les indices thermiques suivants : PMV, PET et UTCI pour estimer le confort thermique dans les espaces extérieurs au niveau des deux sites d'investigation

V.1. La simulation numérique

C'est une méthode qui nécessite la modélisation des configurations urbaines complexes en reproduisant fidèlement la réalité de celles-ci. La modélisation de l'environnement bâti et de ses interactions avec les paramètres climatiques ou météorologiques reste complexe. En effet, il existe une interrelation entre diverses variables, notamment la situation géographique, la densité, la typologie, la géométrie des espaces extérieurs, ainsi que les matériaux qui déterminent conjointement la morphologie de la ville. Celle-ci résulte d'une combinaison complexe de multiples facteurs (Ghaffour, 2020).

V.1.1. Le Logiciel de simulation (ENVI-met)

Le logiciel ENVI-met, version 4.4.6, initialement développé en Allemagne à l'Institut de Géographie de l'Université de Bochum par son fondateur Michael Bruse (Bart De Maerschack et al., 2007), est un programme de simulation tridimensionnelle complet. Il est employé pour la modélisation numérique et la simulation 3D du microclimat urbain, permettant ainsi de prédire de manière précise l'impact des configurations urbaines simples ou complexes, composées de bâtiments et de surfaces de différentes configurations de matériaux et de végétation, sur le microclimat urbain. Il reproduit les environnements urbains réels et les processus atmosphériques qui influent sur le microclimat urbain (Morakinyo et al., 2018).

ENVI-met constitue un modèle climatique tridimensionnel prédictif qui s'appuie sur les principes fondamentaux de la mécanique des fluides (pour le champ éolien), de la thermodynamique (pour les calculs de température) et de la physique atmosphérique générale (pour la prédiction des turbulences) (www.geoinformatik.uni-mainz.de); (Musco et al., 2016). Ce logiciel trouve des applications variées dans les domaines de la climatologie urbaine, de l'urbanisme, de l'architecture, de la conception de bâtiments et de la planification environnementale (Adolphe, 2001 ; Huttner et al., 2009 ; Knodel, 2012).

Ce logiciel calcule la dynamique du microclimat dans un cycle diurne (24 à 48 heures) avec une résolution spatiale typique entre 0,5 mètre et 10 mètres et par intervalles de temps de 10 secondes (Noro et al., 2015). Il facilite également l'analyse des effets des modifications de l'environnement urbain dans un microclimat sous différentes conditions à méso-échelle (Bruse et al., 1998).

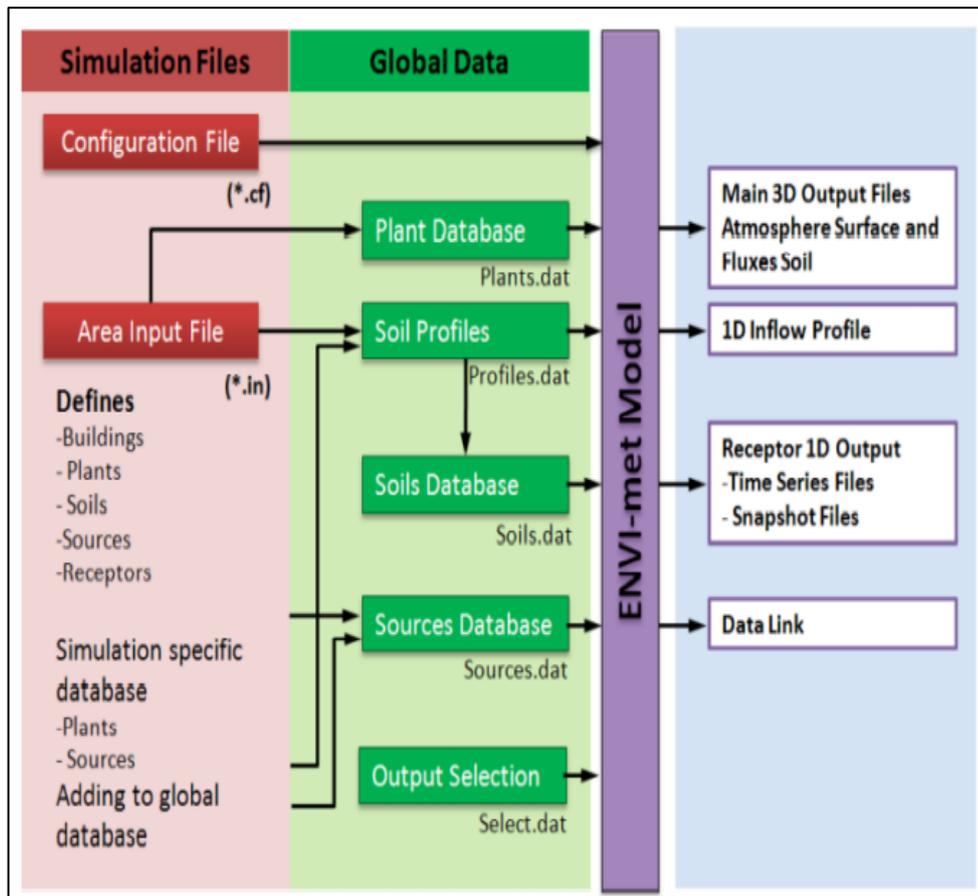


Figure V. 1 : Diagramme de flux des données. (Source : Knodel, 2012)

Le logiciel ENVI-met est capable de simuler le champ tridimensionnel (3D) des variables météorologiques (température de l'air, température de surface, température moyenne radiante, humidité relative, vitesse de l'air, etc.), en prenant en compte les interactions entre l'atmosphère, les surfaces urbaines et la végétation qui caractérisent le tissu urbain. Par conséquent, son objectif est de modéliser les changements microclimatiques en fonction des modifications physiques suggérées dans la zone sélectionnée, en créant différents scénarios urbains et en les comparant.

Par exemple, il permet de créer des scénarios d'intervention et de réhabilitation des tissus urbains pour atténuer l'effet de l'îlot de chaleur urbain et la contrainte thermique dans les villes. Il permet de démontrer la vigueur de ces interventions et leur emplacement optimal. Parmi ces interventions, on peut citer la plantation d'arbres, le verdissement des toits, les étendues d'eau et les albédos de surface (Musco et al., 2016).

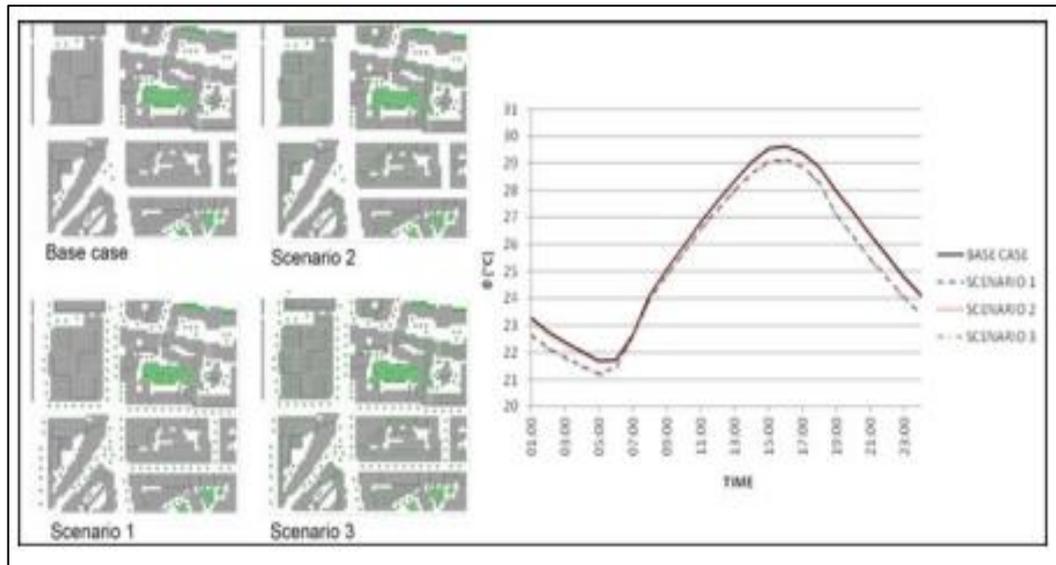


Figure V. 2 : Différents scénarios par ENVI-met pour atténuer l'effet de l'UHI. (Source : Mahdavi et al., 2014)

V.1.2. Le modèle ENVI-met : est-il un modèle fiable

Le modèle ENVI-met ouvre un éventail de champs d'application multiples dans les domaines de la recherche scientifique, de la climatologie urbaine, de la planification urbaine et de l'architecture, comme mentionné précédemment. Il offre la possibilité de calculer l'ensemble des variables climatiques afin d'évaluer le microclimat des espaces extérieurs à travers l'intégration de différentes données météorologiques telles que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la direction du vent.

De nombreux chercheurs ont utilisé le modèle ENVI-met dans leurs travaux de recherche, et la plupart des résultats ont montré la fiabilité du logiciel à travers sa validation et sa précision dans la simulation des conditions proches de la réalité. Dans une étude paramétrique menée par Morakinyo et al. (2018) pour étudier les avantages thermiques et d'économie d'énergie dans un quartier sélectionné avec un ratio de couverture végétale (GCR) actuel de 7,2%, comparé aux 30% recommandés, les données observées ont été reproduites avec une précision suffisante par ENVI-met. Les résultats ont révélé une corrélation assez bonne avec $R^2 = 0,79 - 0,81$ et $0,70 - 0,74$ pour T_a et TMR respectivement entre les valeurs mesurées et les résultats de simulation. Ces résultats prouvent que c'est un outil fiable pour simuler différents scénarios urbains conçus.

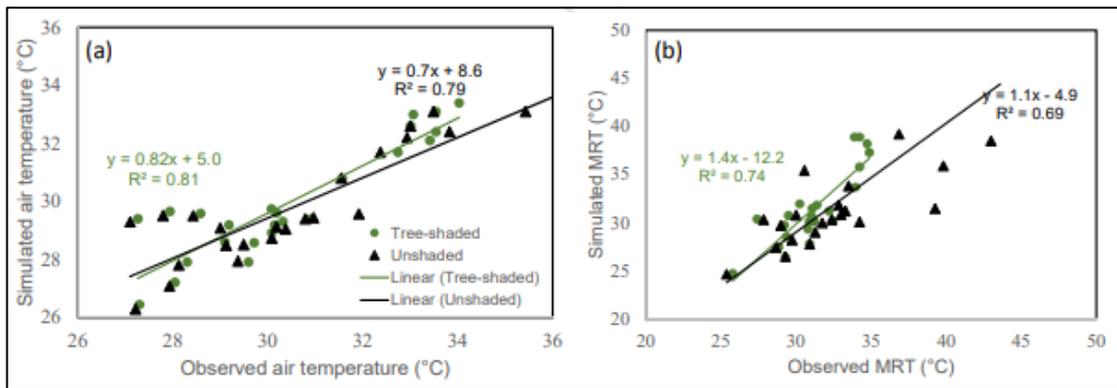


Figure V. 3 : Corrélation positive entre les valeurs mesurées et les résultats de simulation. (Source : Morakinyo et al., 2018)

On peut également mentionner la recherche menée par Sinsel et al. (2021), qui constitue une étude d'évaluation de la température moyenne radiante (TMR) à travers le modèle de modélisation ENVI-met. Cette étude inclut des mesures sur le terrain à partir de huit sites à Sao Paulo et à Hong Kong. Ces mesures ont été réalisées pour les comparer avec les données de la simulation afin d'évaluer l'exactitude du modèle précédent.

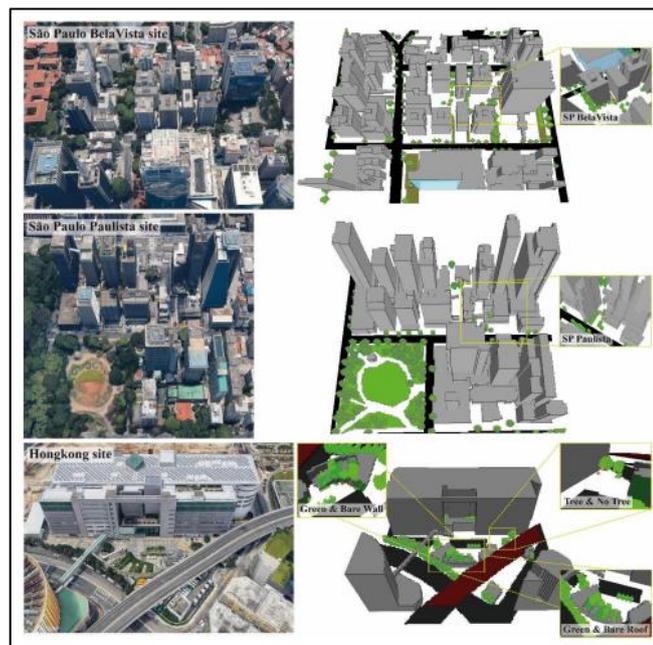


Figure V. 4 : Zones de modèle représentées dans Google Earth et ENVI-met Spaces. (Source : Sinsel et al., 2021)

Les résultats ont démontré que les valeurs de température moyenne radiante (TMR) modélisées étaient globalement plus proches des mesures statiques.

Ces conclusions confirment une fois de plus la précision et la fiabilité du modèle ENVI-met, offrant aux chercheurs la possibilité de mener des enquêtes futures sur le climat urbain avec une plus grande précision, notamment dans le cadre de la recherche sur les stratégies d'atténuation de la chaleur et la planification urbaine résiliente.

Une autre recherche menée par Karimi Afshar et al. (2018) en Iran a étudié l'effet des espaces verts tels que les parcs sur le confort thermique extérieur en utilisant le logiciel ENVI-met pour créer différents scénarios de design végétal.

L'évaluation comparative des valeurs enregistrées et simulées de la température moyenne de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent dans le parc Golbna, réalisée pendant la plage horaire de 08:00 à 16:00, a été effectuée à l'aide de la méthode de corrélation.

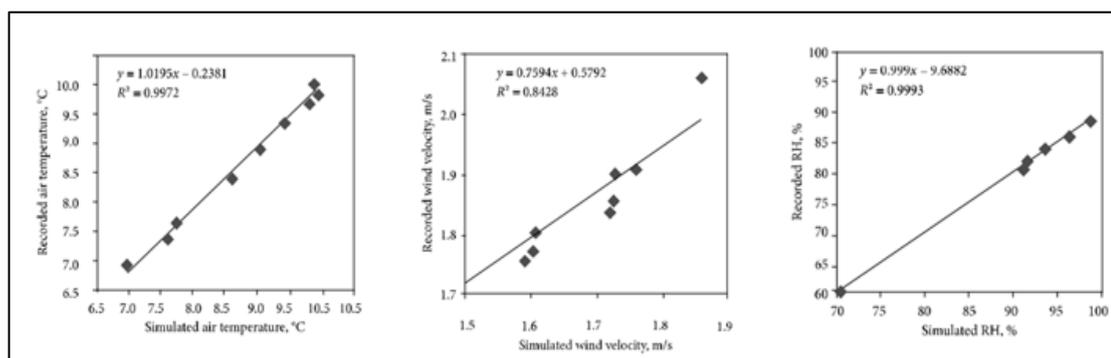


Figure V. 5 : Corrélation entre les valeurs (température de l'air, humidité relative et vitesse du vent) observées et simulées dans le Parc (Golha) in Mashhad City. (Source : KARIMI AFSHAR et al., 2018)

Les paramètres estimés par le modèle sont en forte concordance avec les valeurs enregistrées de la température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent, comme le démontrent clairement les valeurs élevées de R^2 , soit respectivement $R^2 = 0,99$, $R^2 = 0,99$ et $R^2 = 0,84$. En se basant sur les résultats présentés ci-dessus, il est possible de conclure que le modèle numérique ENVI-met était adapté à l'objectif de notre étude de recherche.

V.1.3. Aperçu sur l'interface du logiciel ENVI-met version 4.4.6 pro

ENVI-met version 4.4.6 summer 2021 est une version payante, et son interface est lancée depuis de l'application Envi-met Headquarter 4.4.6 qui est composé de quatre onglets : ENVI-met, Data and settings, System, et Help.

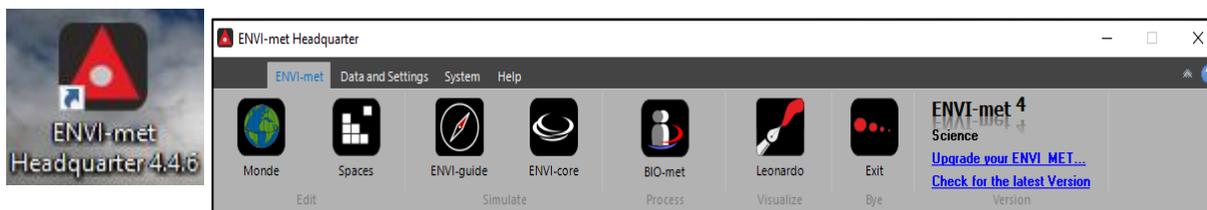


Figure V. 6 : L'icône et l'interface du logiciel ENVI-met 4 avec licence Science. (Source : Guide ENVI-met 4, 2021)

V.1.3.1. Les fonctions de chaque fenêtre dans ENI-met



La fenêtre **Monde** permet la modélisation du domaine étudié :

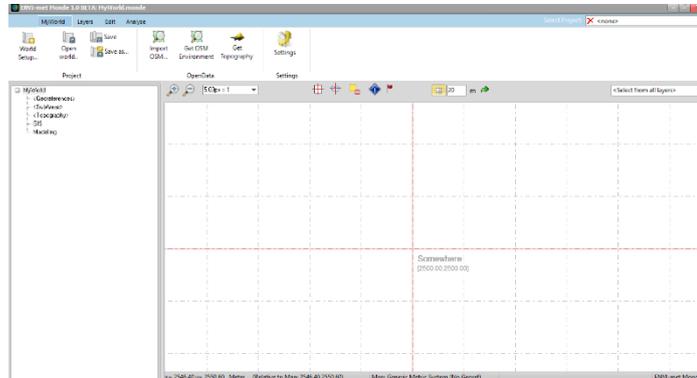


Figure V. 7 : L’interface de la fenêtre Monde ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)



La fenêtre **Spaces** est responsable sur les paramètres de géométrie, de végétation, de sols, de sources, et de récepteurs pour créer des modèles 2D et 3D bien définis.

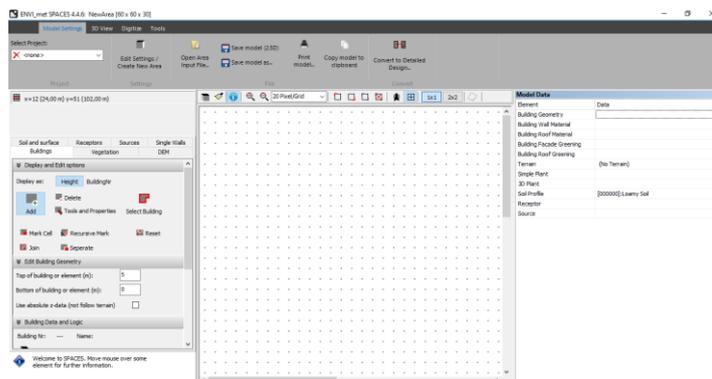


Figure V. 8 : L’interface de la fenêtre Spaces ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)



La fenêtre **ENVI-guide** permet de faire entrer les paramètres dites climatiques ou météorologiques initiales nécessaires pour le lancement de la simulation ainsi que le contrôle des intervalles de simulation.

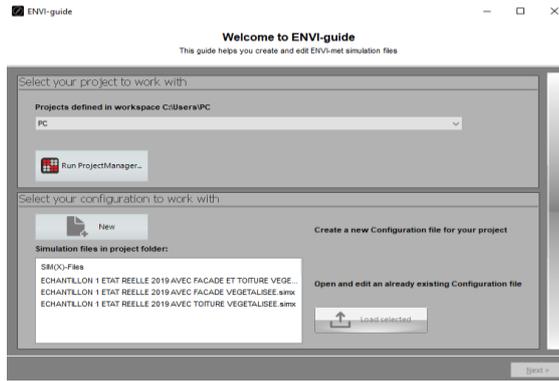


Figure V. 9 : L'interface de la fenêtre ENVI-guide ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)



La fenêtre **ENVI-core** sert à la vérification des données avant simulation et au lancement de la simulation.

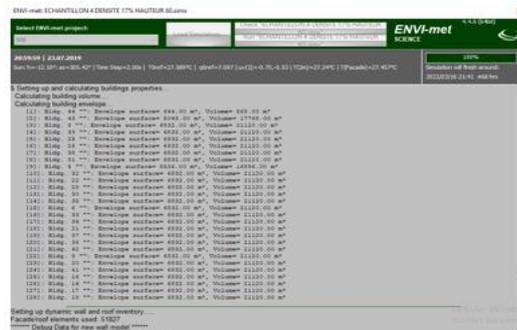


Figure V. 10 : L'interface de la fenêtre ENVI-core. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)



La fenêtre **BIO-met** permet le calcul les multiples indices thermiques (PMV/PPD, PET, UTCI, SET) à partir des résultats de simulation.

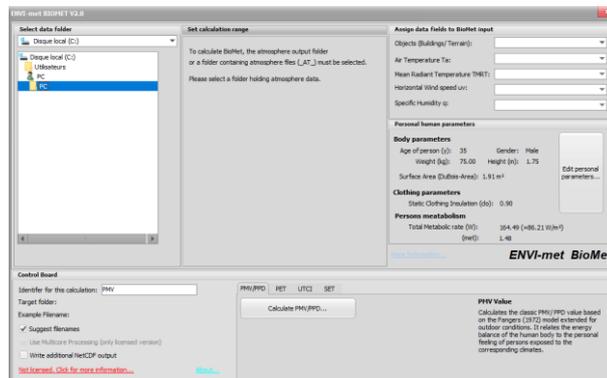


Figure V. 11 : L'interface de la fenêtre de BIO-met. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)



La fenêtre **Leonardo** permet de visualiser et d'extraire des résultats de n'importe quel information ou paramètre microclimatique simulé sous forme graphique (carte en 2D comme en 3D).

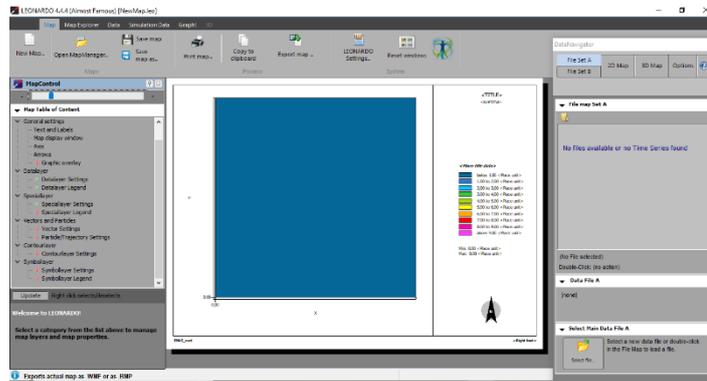


Figure V. 12 : L'interface de la fenêtre de Leonardo, ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, ENVI-met 4.4.6, 2021)

V.1.4. Les données d'entrée et les données de sortie

Comme tous les logiciels de simulation, le modèle ENVI-met est caractérisée par deux principales fonctions : les inputs et les outputs.

V.1.4.1. Les entrées (Inputs)

Représente l'ensemble des Data nécessaires permettant de créer un modèle bien déterminé. Ces données se résument en deux parties :

La première comprend les données physiques tels que : les données géographiques, les matériaux de construction, le type de sol, le type de végétation, les plans d'eau, et les bâtiments etc..., en utilisant (Data and settings) qui signifie la base de données du logiciel ENVI-met et les paramètres de réglage nécessaires avant la création du modèle.

➤ Fichier éditeur «Spaces»

Il présente le plan de travail sur lequel on modélise notre cas d'étude tel qu'il est à partir d'une image (bmp). Il autorise l'introduction de la structure urbaine dans le logiciel, à la fin de la modélisation il permet de créer un fichier avec l'extension « .inx », il contient :

- **Editeur construction/ végétation**

Cet éditeur permet de projeter les hauteurs des bâtiments et tous les éléments saillants tels qu'ils sont en réalité, avec l'intégration de différents types de végétation existante.

- **Editeur sol**

Dans cette section, nous avons accès à un éditeur qui nous permet de sélectionner le profil du sol souhaité parmi une liste proposant différents types de sol.

- **Editeur récepteurs**

L'éditeur de récepteurs permet la projection de points spécifiques à l'intérieur du modèle à simuler, fournissant ainsi les paramètres pour un point donné. ENVI-met offre la possibilité de projeter jusqu'à 100 récepteurs.

La deuxième partie englobe les paramètres climatiques nécessaires à la création du fichier climatique et au lancement de la simulation, notamment la température de l'air, l'humidité relative, ainsi que la vitesse et la direction du vent :

- **Fichier de configuration « ENVI-guide »**

Ce fichier facilite la création d'un fichier climatique pour le modèle à simuler en utilisant les données météorologiques de la station ou les données climatiques mesurées pour une journée spécifique. Ce fichier permet de sélectionner le jour et l'intervalle de la simulation, il crée des fichiers avec l'extension « .cf ». Il englobe:

- Nom de la simulation
- La date et la durée de la simulation ainsi que l'intervalle de temps
- Les conditions météorologiques initiales (vitesse et direction du vent, température de l'air, humidité relative).

V.1.4.2. Les données de sortie « Outputs »

Comme dans chaque logiciel de simulation, les données d'entrée sont traitées sous forme de résultats de simulation d'un ensemble de paramètres regroupés dans plusieurs dossiers.

- **Fichier de sortie en 3D :**

- ✓ **Dossier Atmosphère :** Correspond aux différents paramètres atmosphériques
- ✓ **Dossier Surface et sol :** Correspond principalement à la température de surface et au facteur de vue du ciel.

Ces résultats sont visualisés à l'aide du logiciel de visualisation Leonardo sous forme de cartes (Maps) 2D et 3D.

V.2. Etude de l'état actuel

L'étude de l'état actuel vise à reproduire la réalité des tissus urbains avec le logiciel ENVI-met 4.4.6. Cette modélisation permet la simulation de deux modèles urbains afin d'étudier l'effet de la morphologie urbaine, en particulier la densité surfacique bâtie, sur le niveau de stress thermique dans les espaces extérieurs.

La simulation, effectuée pour la période estivale du 23 juillet 2019, permet la validation du logiciel ENVI-met en corrélant les paramètres atmosphériques mesurés (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et température moyenne radiante) avec ceux simulés, ainsi que le calcul du facteur de vue du ciel (FVC) et la quantification du stress thermique via les indices thermiques (PMV, PET et UTCI).

L'objectif ultime de cette étape est la validation du logiciel ENVI-met et la création des scénarios étudiant l'impact de la densité urbaine sur l'amélioration du confort thermique.

V.3. Déroulement de la simulation

La simulation numérique à l'aide du logiciel ENVI-met 4.4.6 a couvert la période estivale du mois de juillet 2019, la même période que la campagne de mesures in situ. Cette simulation s'est déroulée pendant la journée représentative de l'été (le 23 juillet 2019), pour les deux tissus urbains étudiés : la cité des 500 logements et le lotissement Kemouni. Les deux scénarios ont été simulés sur une période de dix-sept heures, de 06h00 à 20h00, couvrant toute une journée, depuis les premiers gains solaires jusqu'au début du coucher du soleil, qui correspond à la période de fréquentation habituelle des espaces extérieurs par les personnes.

Les paramètres climatiques simulés comprennent la température de l'air (°C), la température moyenne radiante (°C), le rayonnement solaire (W/m²), l'humidité relative (%) et la vitesse du vent (m/s). Ces paramètres ont été utilisés pour étudier l'effet de la morphologie urbaine sur les variations climatiques. De plus, les indices thermiques calculés ont été utilisés dans le but de mesurer les niveaux de confort thermique dans les espaces extérieurs des différents scénarios simulés.

V.4. Modélisation géométrique des zones d'étude : (les mêmes étapes ont été suivies pour les deux tissus urbains simulés)

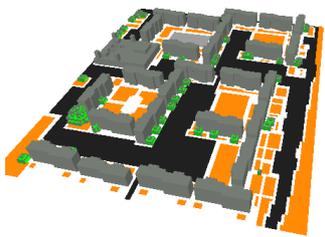
Conformément aux exigences du modèle ENVI-met, un fichier d'entrée de zone définissant la géométrie 3D a été construit à partir d'une image Google Earth qui délimite la zone d'étude au format bitmap (Bmp). Cette image a été intégrée dans le fichier « spaces » pour créer le modèle 2D selon une grille bien déterminée. Pour le premier tissu urbain (la cité 500 logements collectifs), la zone d'étude a été subdivisée en une grille de 120 x 140 avec une résolution horizontale de 2 m, équivalant à 240 x 280 m², tandis que la grille verticale est de 30 m avec une résolution de 2 m. Pour le deuxième tissu urbain (le lotissement Kemouni), la grille est de 150 x 220 avec une résolution horizontale de 2 m, soit l'équivalent de 300 x 440 m². La grille verticale est de 30 m avec une résolution de 2 m.

Le tableau (V.1) illustre les différentes étapes de simulation pour les deux zones d'étude. Il a été supposé que les bâtiments de la cité des 500 logements étaient en béton préfabriqué pour les murs et les dalles, tandis que pour le lotissement Kemouni, les bâtiments étaient tous en brique avec des dalles en béton. Les rues et les parkings des deux zones sont principalement recouverts d'asphalte, et les trottoirs sont revêtus de pavés gris.

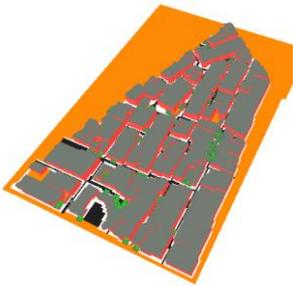
Le tableau ci-dessous illustre les différents matériaux utilisés dans la modélisation des deux tissus urbains :

Tableau V. 1 : Les matériaux utilisés dans la modélisation des deux tissus à l'état initial. (Source : Auteure, 2021)

Cité 500 logements

	Type d'objet	Type de surface	Matériaux utilisés
	Bâtiments	Mur	Cement and Concrete: [0100C5] concrete wall (cast dense)
		Dalle	Cement and Concrete: [0100C5] concrete wall (cast dense)
	Sol	Revêtement	Asphalte + pavé gris+ sol naturel
	Végétation	Modèle de Plante	3D trees

Lotissement Kemouni

	Type d'objet	Type de surface	Matériaux utilisés
	Bâtiment	Mur	Stones: [0100B2] Brick wall (burned)
		Dalle	Cement and Concrete: [0100C5] concrete wall (cast dense)
	Sol	Revêtement	Asphalte + pavé gris + sol naturel
	Végétation	Modèle de Plante	3D trees

V.5. Les données d'entrée de la simulation

Le tableau (V.2) illustre les données d'entrée pour le 23 juillet 2019, considéré comme la journée type, comprenant les données climatiques et urbaines :

Tableau V. 2 : Les paramètres d'entrée introduits dans la simulation ENVI-met 4.4.6. (Source : Auteure, 2021)

Le site	Cité 500 logements	Lotissement Kemouni
Localisation	Nord : 45°	Latitude : 33, 56 N Longitude : 06,17 E Altitude : 1058m Nord : 40°
Type de climat		Climat semi-aride
Période de simulation		Période estivale (été)
Durée de simulation		06h00 à 20h00 (16h)
Paramètres climatiques :		
Température moyenne		30.12 °C
Humidité moyenne		28.50 %
Vitesse moyenne		2.50 m/s
Direction du vent		180.00 Nord
Données urbaines :		
Densité urbaine	17%	67%
Bâtiments :		
Albédo des murs	0.3	0.4
Conductivité thermique du mur	0.93 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0.83 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Albédo des toitures	0.3	0.3
Conductivité thermique du toit	0.93 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0.93 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Hauteurs des bâtiments	[12m-15m]	[4m à 17m]

V.6. Les étapes de simulation : sont illustrées pour le tissu urbain cité 500 logements

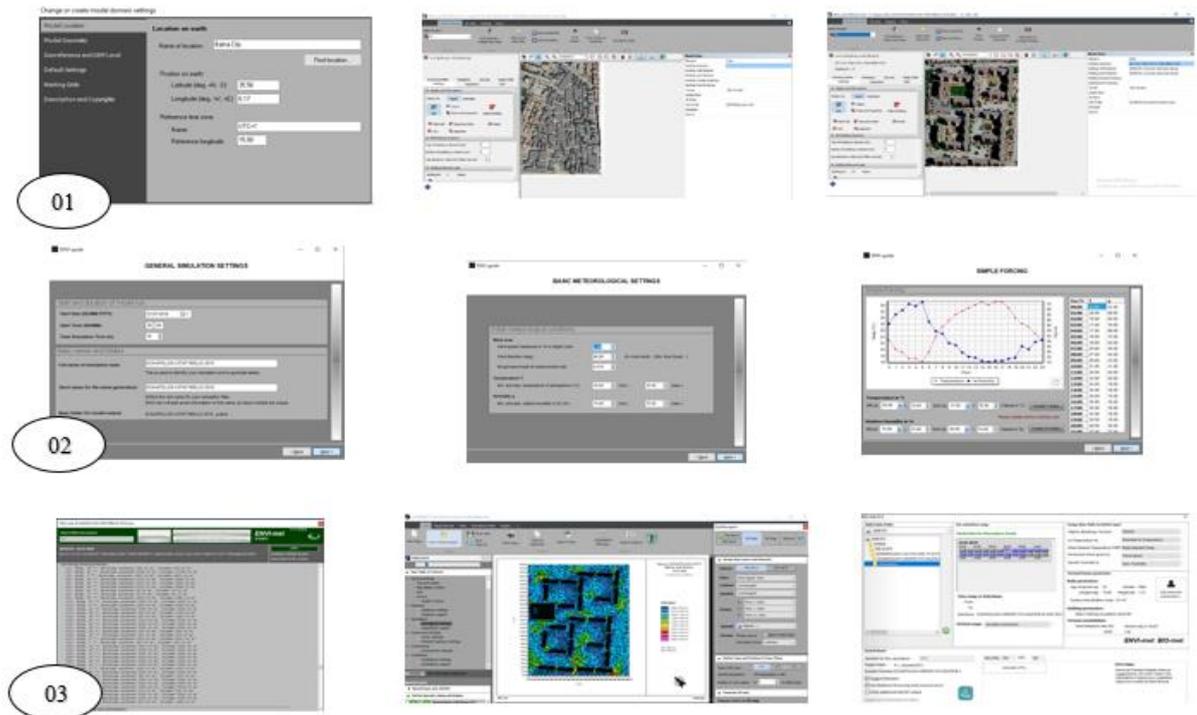


Figure V. 13 : Les étapes de simulation pour les deux tissus urbains (les 500 logements en particulier). (Source : Auteure, 2021)

La simulation a été effectuée sur une durée de dix-sept heures, de 05h00 du matin à 21h00 le soir, couvrant ainsi une heure avant et une heure après la période de simulation choisie de 06h00 à 20h00. Les scénarios présentés dans ce chapitre reproduisent fidèlement l'état réel des deux tissus urbains sélectionnés pour l'étude. Nous avons pris en compte tous les éléments constitutifs du milieu urbain réel (matériaux de construction, type de sol, végétation, hauteurs et espacements des bâtiments) pour respecter les caractéristiques existantes des cas d'étude.

V.7. Validation du modèle de simulation (logiciel ENVI-met 4.4.6)

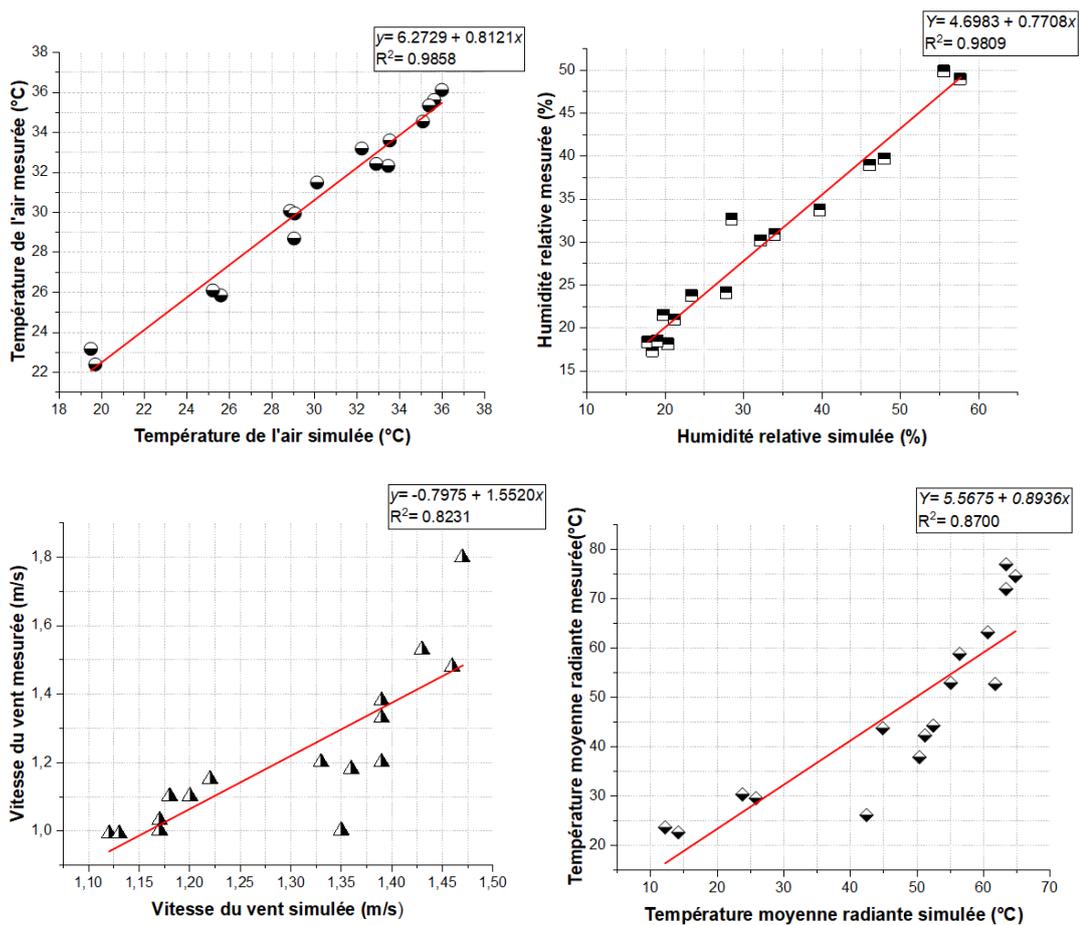
« L'activité de validation des modèles et des simulations est devenue une activité incontournable, pour s'assurer du crédit que l'on peut porter aux résultats fournis par la simulation, en fonction des objectifs d'utilisation, mais aussi de l'environnement d'exécution » (Damien Foures, 2015).

Pour confirmer la validité du modèle de simulation ENVI-met, nous optons pour la méthode de corrélation avec le coefficient de Pearson, qui indique le degré de corrélation R^2 . Cette méthode a prouvé son efficacité selon la littérature scientifique (Emmanuel, Rosenlund et Johansson, 2007 ; Matzarakis, 2010).

Les valeurs simulées des paramètres cités précédemment ont été corrélées aux données enregistrées lors de la campagne de mesures réalisée dans les deux sites d'étude le 23/07/2019. Pour effectuer la corrélation des données simulées et mesurées, nous avons calculé la moyenne des données climatiques simulées et mesurées pour les quatre stations de mesure sur la période de 06h00 à 20h00. Cela inclut la moyenne de la température de l'air, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et de la température moyenne radiante, dans le but de faciliter le processus de corrélation. Les résultats de corrélation de chaque site sont interprétés dans le graphe (V.1).

Les résultats de corrélation indiquent une forte concordance entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, cela étant valable pour les deux cas d'étude. Les valeurs du coefficient de Pearson (R^2) pour les températures de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température moyenne radiante sont respectivement : $R^2= 0.9858$, $R^2= 0.9809$, $R^2= 0.8231$ et $R^2= 0.8700$.

Ces résultats sont présentés dans le graphe (V.1) ci-après :



Graph V. 1 : Corrélation entre les différents paramètres climatiques mesurés et simulés. (Source : Auteure, 2021)

En général, le modèle numérique ENVI-met se révèle être un outil fiable pour reproduire avec grande exactitude la réalité urbaine et climatique du contexte d'étude. Il permet de prévoir de manière précise l'impact d'un projet sur le microclimat urbain, ouvrant ainsi la possibilité de réaliser des scénarios visant à améliorer les conditions thermiques en intervenant sur la densité et la compacité du bâti.

Le modèle de simulation ENVI-met est parfaitement adapté pour répondre aux objectifs de notre recherche.

V.8. Etude comparative entre les deux sites d'étude

V.8.1. Effet de la densité et la compacité urbaine sur les indicateurs géométriques calculés :

D'après les résultats obtenus grâce à la télédétection et à la campagne de mesures précédente, il apparaît clairement que la morphologie urbaine des structures bâties est le facteur déterminant qui influe sur la géométrie des espaces urbains, principalement à travers le ratio H/L et le FVC.

V.8.1.1. Effet de la densité urbaine sur le ratio H/L

Après la collecte des données nécessaires, les valeurs du ratio H/L pour nos deux cas d'étude ont été calculées en effectuant des estimations sur le terrain : relevé des largeurs des rues et de la hauteur des bâtiments. Le quartier des 500 logements présente un tissu urbain avec une emprise au sol réduite et des bâtiments éloignés les uns des autres, avec un grand espacement entre les bâtiments, tandis que dans le quartier Kemouni, les espacements entre les bâtiments sont plus étroits.

Les valeurs du ratio H/L pour chaque station de mesure sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau V. 3: Les valeurs du ratio H/L calculées pour les quatre stations de chaque tissu urbain. (Source : Auteure, 2021)

Stations	La cité 500 logements	Le lotissement Kemouni
	Le ratio H/L	
S1	1.73	1.89
S2	0.27	2.10
S3	0.46	0.80
S4	3.85	1.13

V.8.1.2. Effet de la densité urbaine sur le facteur de vue du ciel (FVC)

La simulation des deux cas d'étude nous a permis de calculer le facteur de vue du ciel (FVC) pour chaque tissu, et les résultats sont visualisés à l'aide du logiciel « **Leonardo** » sous forme de cartes (**Maps**) (voir tableau V.4). Les cartes issues de la simulation révèlent des variations dans les valeurs du facteur de vue du ciel entre les deux quartiers.

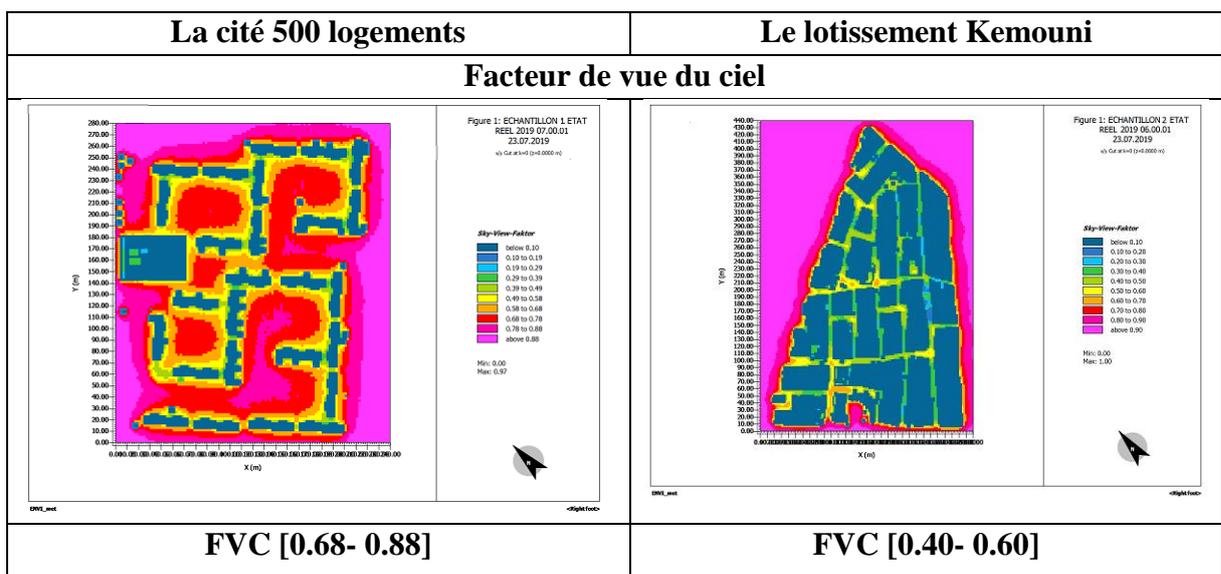
Le quartier des 500 logements se distingue par une ouverture remarquable du ciel, illustrée par des taches rouge et rose prédominantes dans la plupart des espaces extérieurs, symbolisant les valeurs maximales dans la légende des cartes. En effet, l'aménagement du quartier, caractérisé par l'absence de bâtiments mitoyens et un espacement généreux entre les structures, crée une géométrie favorable à une ouverture significative vers le ciel (FVC élevé).

À l'inverse, le quartier Kemouni affiche les valeurs les plus basses d'ouverture au ciel, avec des taches jaune et verte dans la légende, indiquant des valeurs faibles du facteur de vue du ciel (FVC bas). Cette situation découle de la forme compacte et dense du quartier.

La différence de valeurs d'ouverture au ciel entre les deux quartiers est étroitement liée à la densité et à la compacité du cadre bâti de chaque quartier. Un quartier de faible densité de surface bâtie, caractérisé par des bâtiments distants, peut créer des espaces extérieurs avec une grande ouverture vers le ciel. Cependant, le quartier dense et compact présente des espaces extérieurs avec une faible ouverture au ciel en raison d'un système de bâti continu et faiblement espacé, avec une plus grande profondeur au niveau des rues.

Les résultats du facteur de vue du ciel (FVC) sont illustrés à travers les cartes dans le tableau suivant:

Tableau V. 4 : La carte des valeurs du FVC pour le quartier 500 logements et le quartier Kemouni. (Source : Auteure, 2021)



V.8.2. Effet des indicateurs géométriques sur les paramètres climatiques simulés

Le ratio H/L et le facteur de vue du ciel (FVC) sont les deux principaux indicateurs géométriques décrivant la configuration de la surface urbaine. Ils sont couramment utilisés et revêtent une importance particulière dans les études sur le climat urbain, visant à explorer les impacts d'une structure urbaine complexe sur les processus climatologiques dans les zones construites (Hämmerle et al., 2011).

Pour interpréter les résultats de la simulation, seules les moyennes des paramètres climatiques ont été prises en compte. Cela nous permet de couvrir l'ensemble de chaque site simulé, sachant que les résultats varient à l'intérieur de chaque site, d'un espace à l'autre et d'un point à l'autre. Il convient de souligner que les valeurs moyennes ont été déduites des données minimales et maximales présentes dans les cartes climatiques 2D.

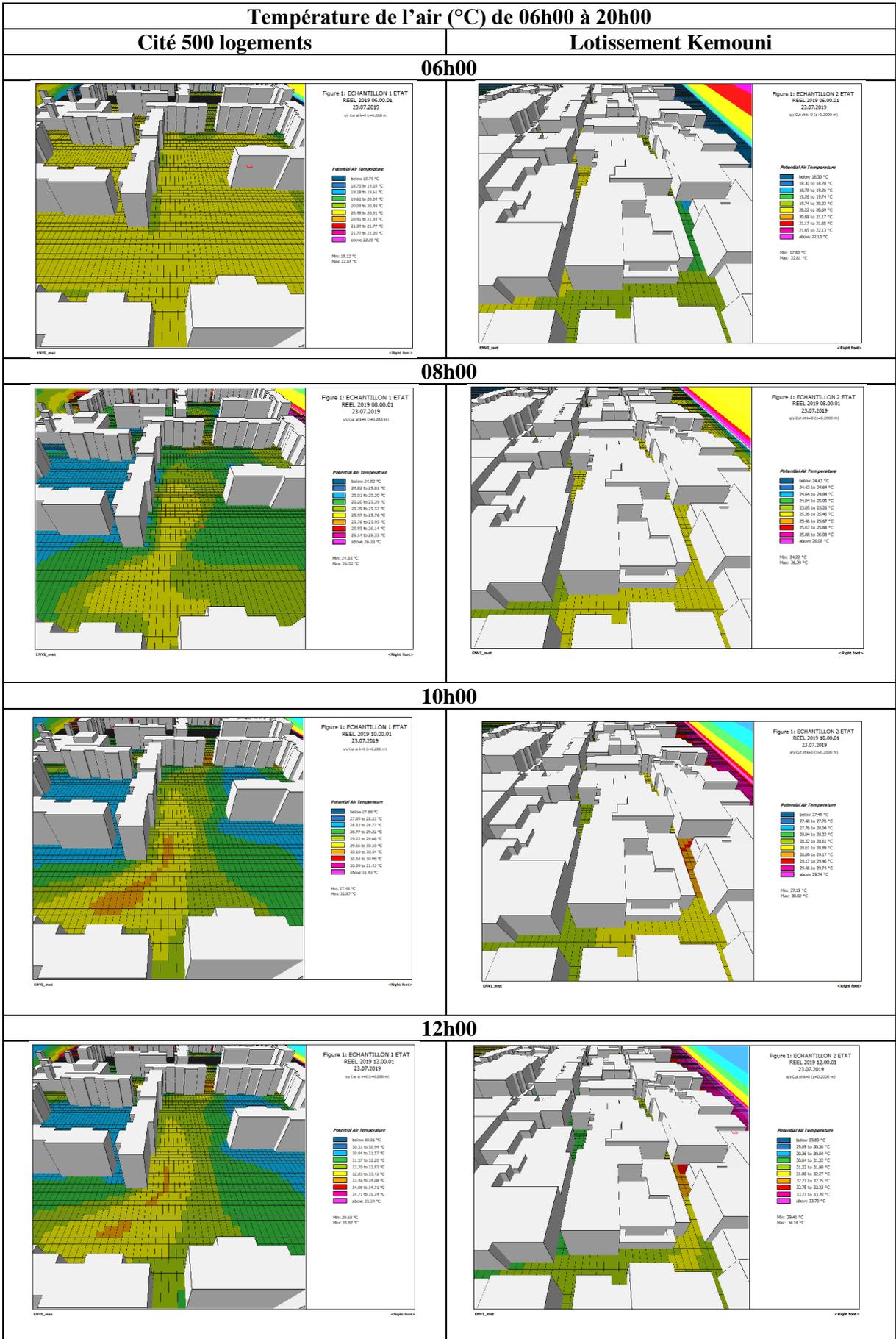
V.8.2.1. Effet du FVC et H/L sur la température de l'air et la température moyenne radiante

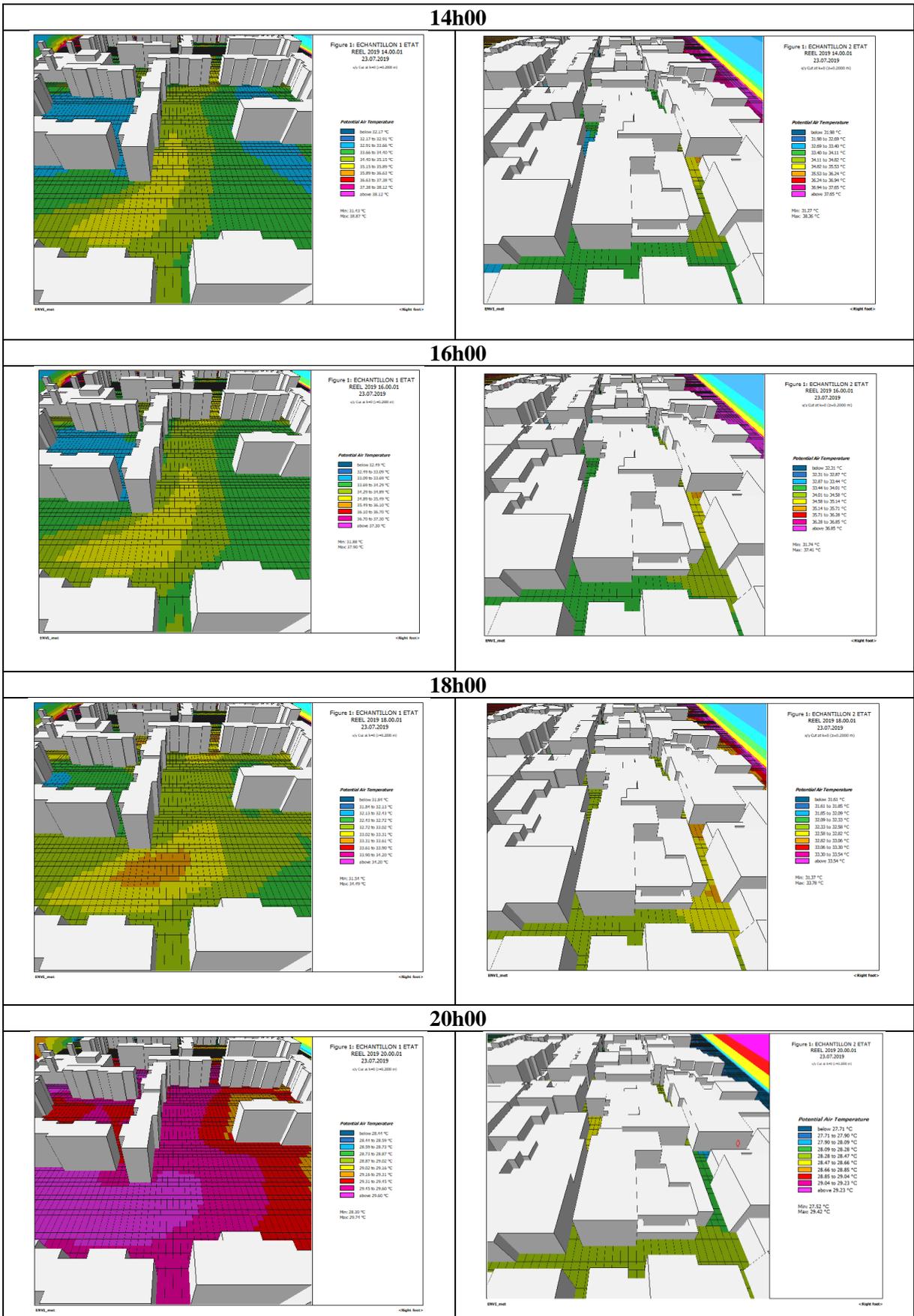
Les résultats de la simulation de la température de l'air montrent que le quartier Kemouni présente des températures de l'air plus fraîches que le quartier des 500 logements, avec un écart moyen de 1.27°C à 10h00, 1.30°C à 12h00, 0.59°C à 14h00, 0.50°C à 16h00, sur l'ensemble de la période de simulation.

Néanmoins, au début et à la fin de la simulation, périodes pendant lesquelles l'effet du rayonnement solaire est minimal, on observe une faible différence entre les températures de l'air dans les deux quartiers. Les températures de l'air étaient plus élevées dans le quartier Kemouni que dans le quartier des 500 logements, avec un écart maximal de 0.30°C à 20h00 le soir. Cette observation peut s'expliquer par la différence morphologique entre les deux sites. Le quartier Kemouni présente une forme urbaine confinée, favorable au piégeage radiatif, entraînant une élévation plus importante de la température de l'air et empêche le refroidissement nocturne que la forme urbaine éclatée du quartier des 500 logements.

Pourtant, au niveau de ces configurations denses, l'élévation de la température diurne est souvent compensée par des effets de fraîcheur résultant de la propagation des zones ombragées, prenant la forme d'éléments masquant le rayonnement solaire incident, qui est absent à l'intérieur de ces espaces (Ratti et al., 2003 ; Maurus Baruti et al., 2019). Ainsi, le facteur de vue du ciel affecte la quantité d'énergie solaire incidente et, par conséquent, la température de l'air. Les résultats de la simulation de la température de l'air et de la température moyenne radiante sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 5 : Comparaison entre les valeurs des températures de l'air des deux sites. (Source : Auteure, 2021)





Concernant la température moyenne radiante (TMR), qui a un impact direct sur le confort thermique extérieur, car elle résulte de la somme totale des températures de surfaces environnant le corps humain. Les résultats de la simulation confirment les observations de la campagne de mesures sur le terrain. Autrement dit, la température moyenne radiante dépend fortement de l'exposition au rayonnement solaire direct. Les espaces ombragés, comme dans le cas du quartier Kemouni, enregistrent des valeurs inférieures par rapport aux espaces exposés au soleil, comme dans le quartier des 500 logements.

L'évolution de la température moyenne radiante varie en fonction de la géométrie urbaine, dont les valeurs les plus élevées de la température moyenne radiante (TMR) ont été obtenues pour les espaces ouverts présentant des facteurs de vue du ciel élevés et des ratios H/L faibles, indiquant un faible effet d'ombre. Alors que les espaces profonds ayant des facteurs de vue du ciel faibles et des ratios H/L élevés, l'effet d'ombre porté par les constructions environnantes était important, et les valeurs de la température moyenne radiante étaient relativement faibles.

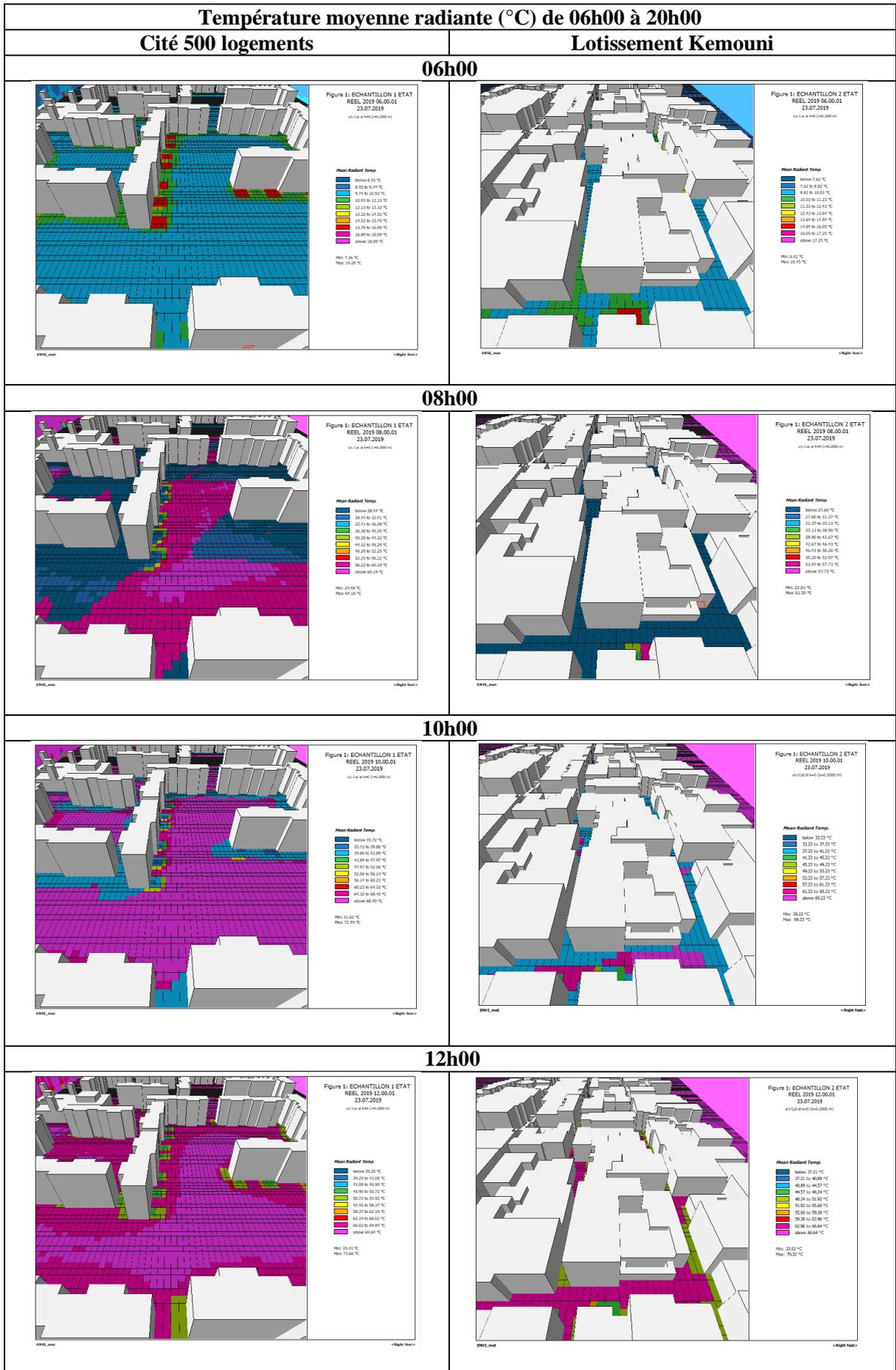
Cette situation est observable au sein du même quartier, où chaque espace se distingue géométriquement de l'autre, entraînant des valeurs de température moyenne radiante variées, mais qui restent relativement inférieures ou supérieures par rapport à d'autres formes urbaines.

Le quartier Kemouni affiche des températures radiantes moyennes élevées à partir de 10h00 du matin jusqu'à 14h00, atteignant leurs maximums dans la plupart des espaces avec une valeur maximale de 73.66°C. Ensuite, à partir de 16h00, tous les espaces bénéficient de l'ombre des constructions continues de part et d'autre et des éléments saillants, avec une valeur de 49.12°C. À 18h00, la totalité des espaces du quartier sont à l'abri du rayonnement solaire, avec une valeur de 37.69°C.

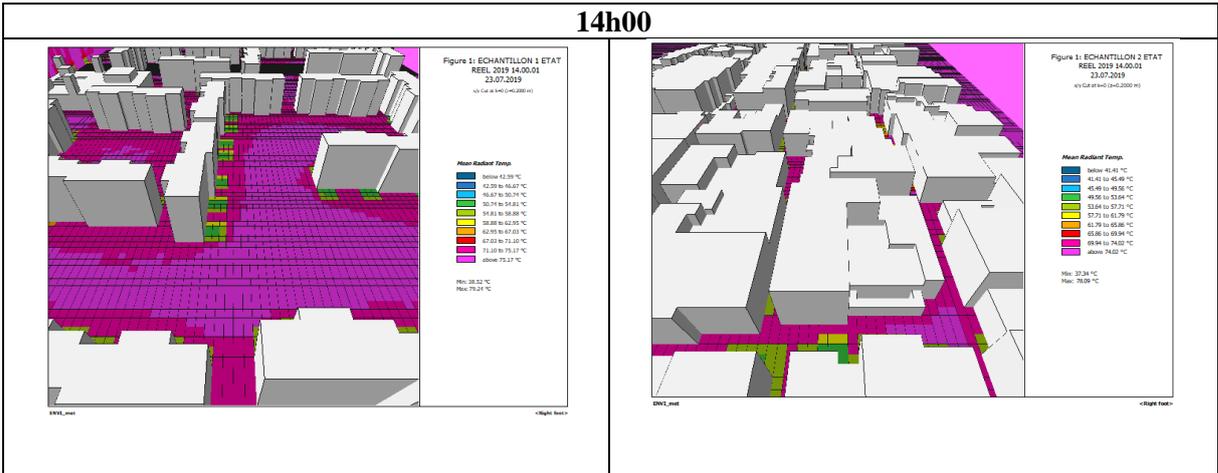
Cependant, les températures moyennes radiantes (TMR) au niveau des espaces extérieurs du quartier des 500 logements commencent à augmenter à partir de 08h00 du matin jusqu'à 16h00, où elles enregistrent un maximum de 77.57°C dans la plupart des espaces. À partir de 18h00, les températures commencent à diminuer, et les surfaces d'ombre augmentent simultanément.

Les résultats sont illustrés dans les cartes présentées dans le tableau suivant :

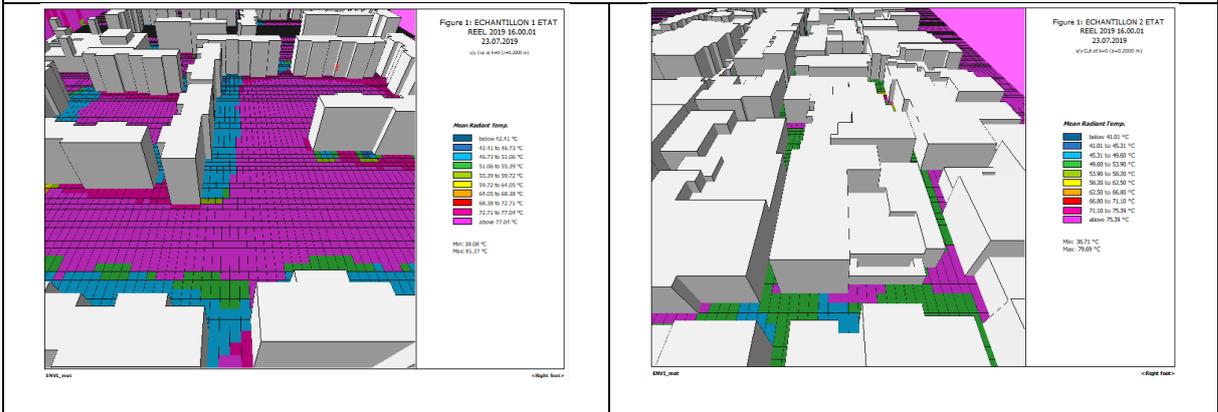
Tableau V. 6 : Comparaison entre les valeurs des températures moyennes radiantes des deux sites. (Source : Auteure, 2021)



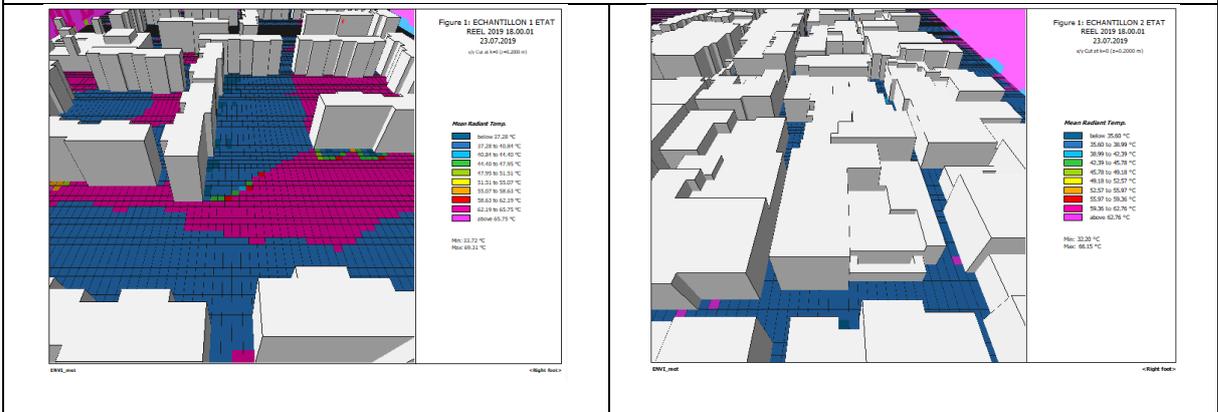
14h00



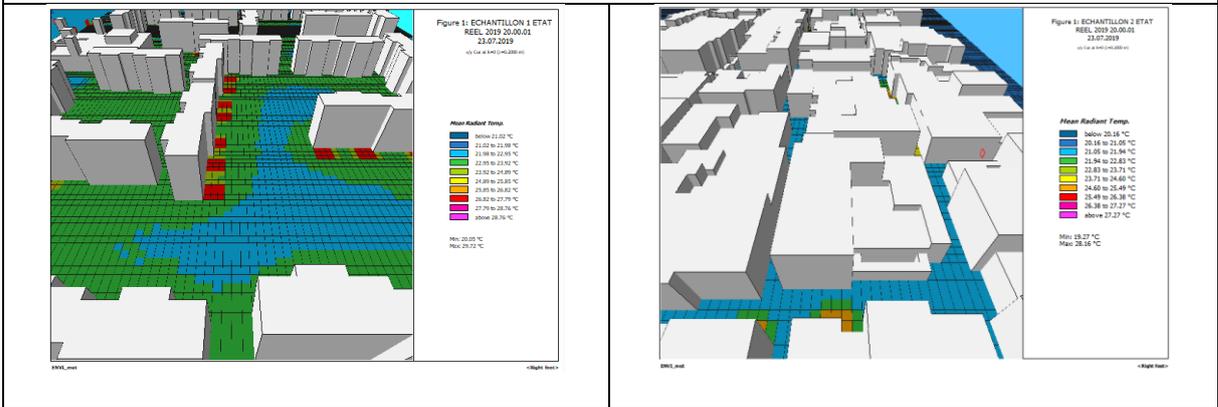
16h00



18h00



20h00



V.8.2.2. Effet du ratio H/L et du FVC sur le flux du rayonnement solaire direct

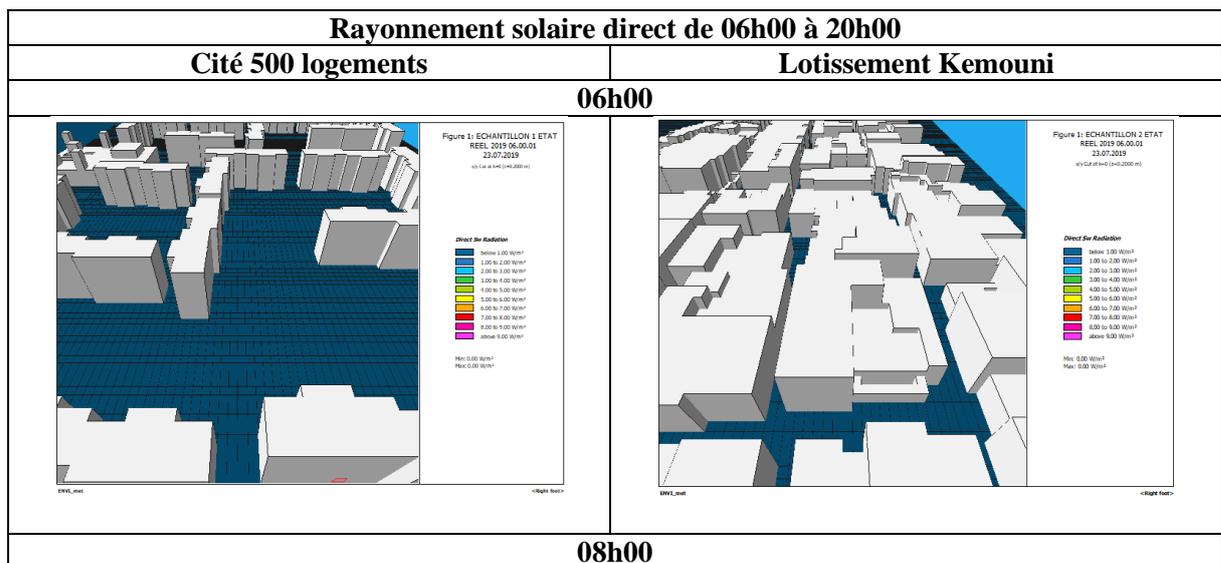
L'unité géométrique de base qui caractérise l'espace extérieur est définie par la hauteur, la largeur et la profondeur du bâti, traduite par les différents profils H/L et le FVC. Ces deux indicateurs quantifient l'énergie solaire en milieu urbain et permettent l'accès du soleil à l'intérieur des tissus. Les résultats obtenus révèlent une forte corrélation entre le ratio H/L, le FVC et l'incidence du flux du rayonnement solaire direct (Deng et Wong, 2019).

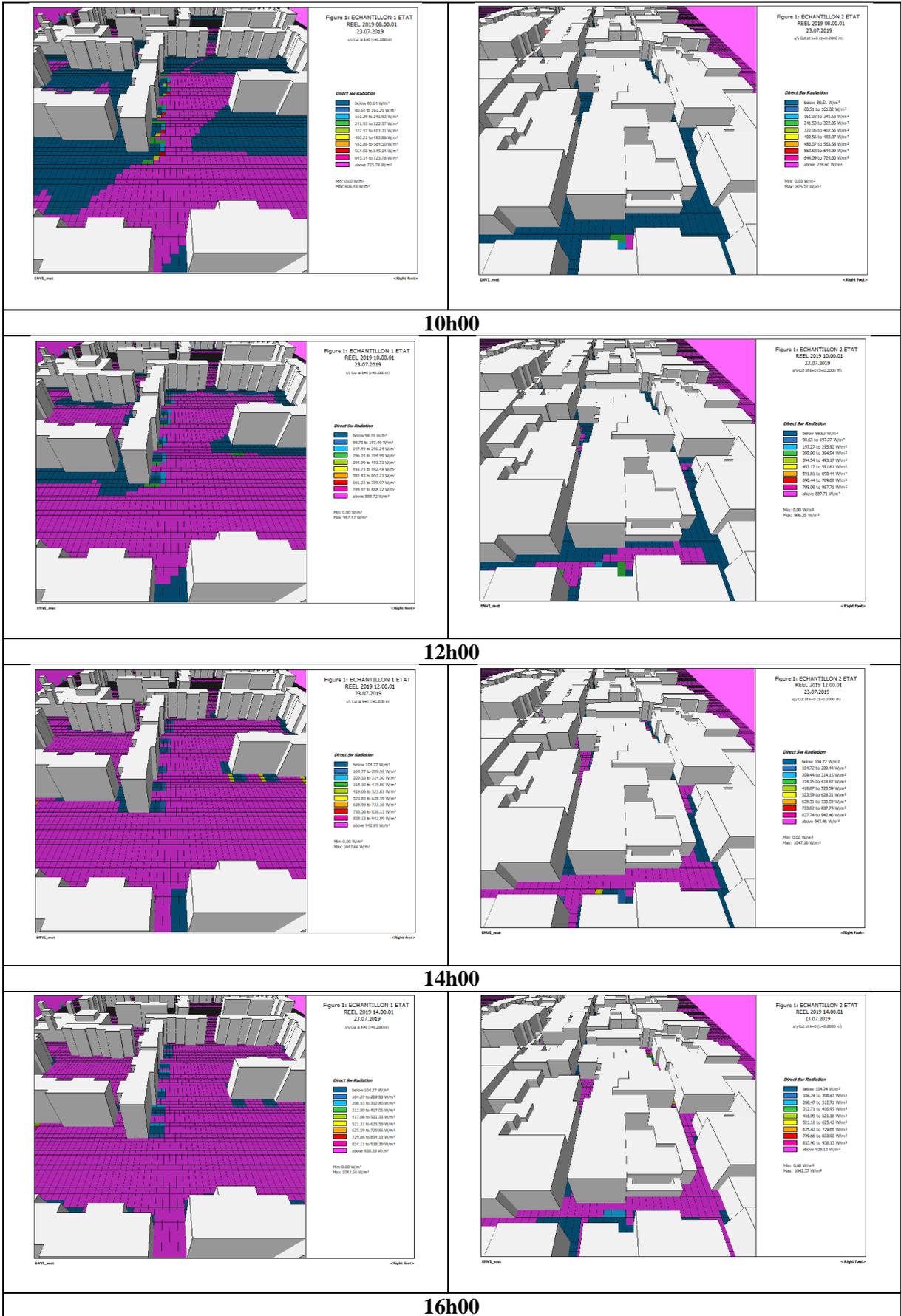
Bien que les deux sites simulés reçoivent presque les mêmes valeurs de rayonnement solaire direct, la répartition de celui-ci dans les espaces est nettement distincte, créant une grande différence entre les deux quartiers, surtout en période de stress thermique extrême (à 10h00, 12h00, 14h00 et 16h00).

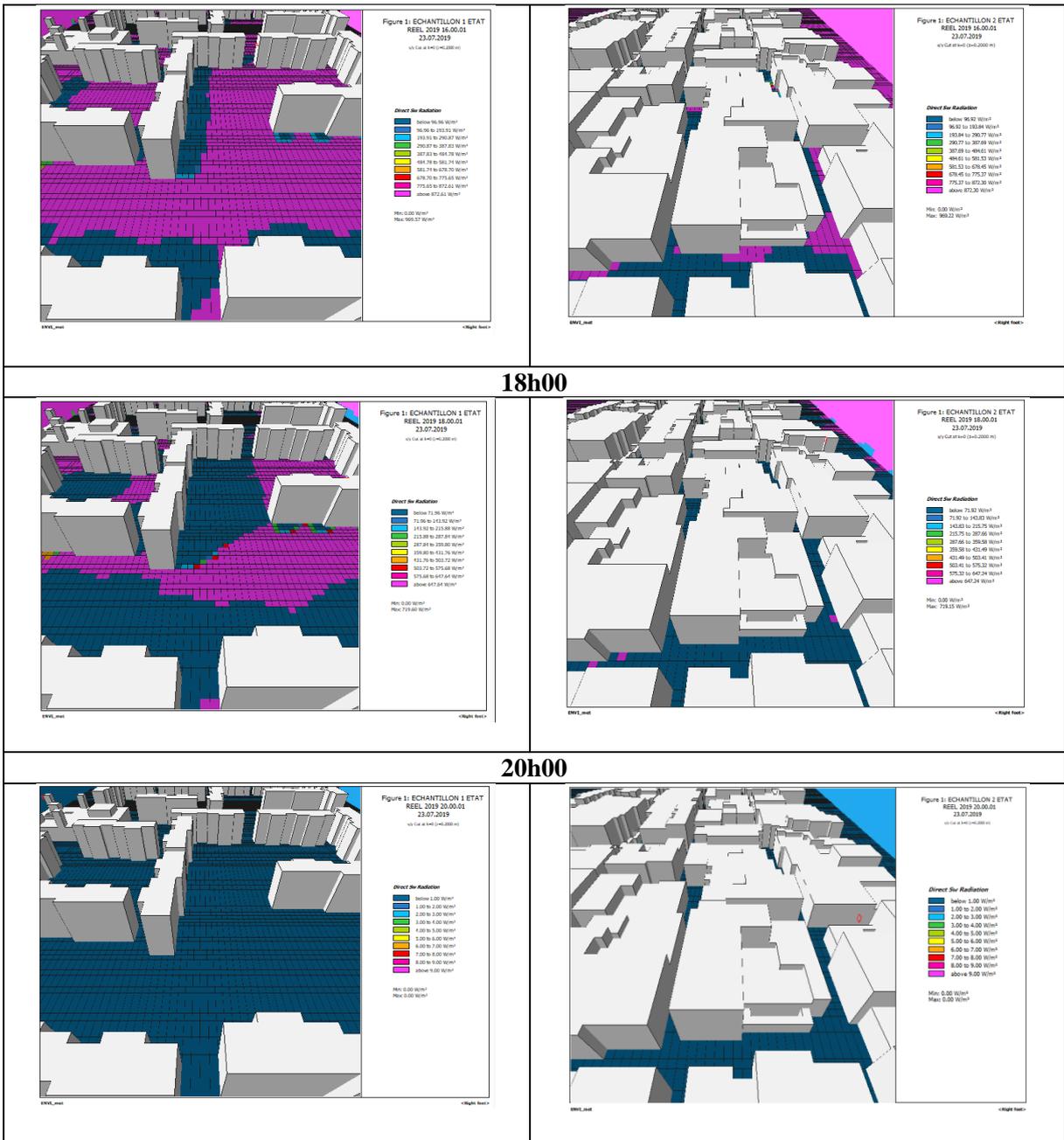
L'accès au rayonnement solaire au niveau des espaces extérieurs du quartier des 500 logements est plus intense par rapport aux espaces du quartier Kemouni. Cette différence est particulièrement apparente pendant les heures de 08h00, 10h00, 16h00 et 18h00, où l'on observe que les espaces extérieurs à l'intérieur du quartier Kemouni bénéficient de l'effet d'ombre sur une durée plus ou moins longue de la journée.

Il est également à noter qu'à 06h00 et à 20h00, lorsque le flux de rayonnement est minimal, tous les espaces extérieurs à l'intérieur des deux tissus sont à l'abri du rayonnement solaire, ce qui explique les valeurs proches des températures de l'air et de la température moyenne radiante. Les résultats du rayonnement solaire direct sont illustrés dans les cartes présentées dans le tableau suivant :

Tableau V. 7 : Comparaison entre les valeurs de rayonnement solaire pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)



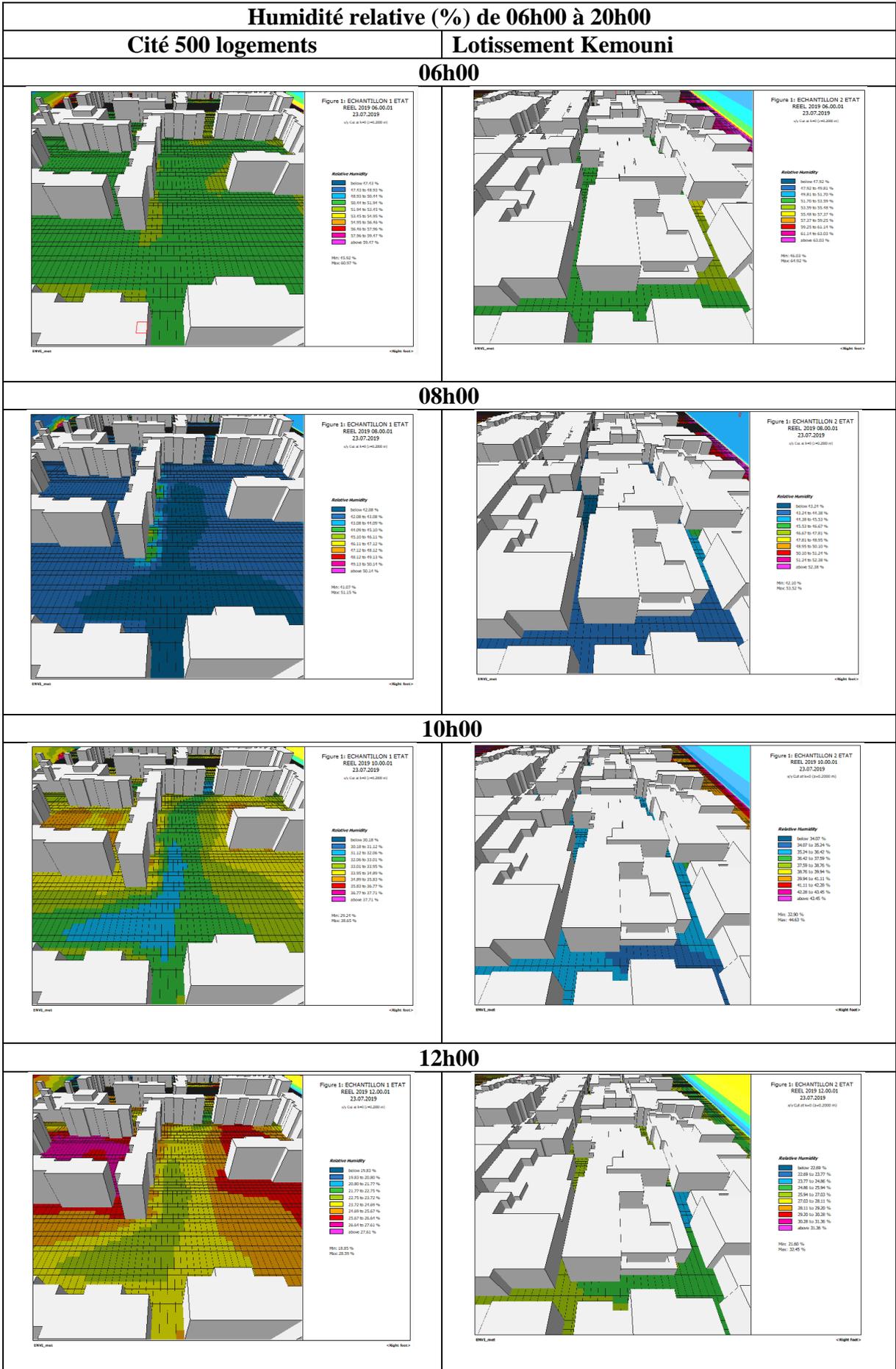




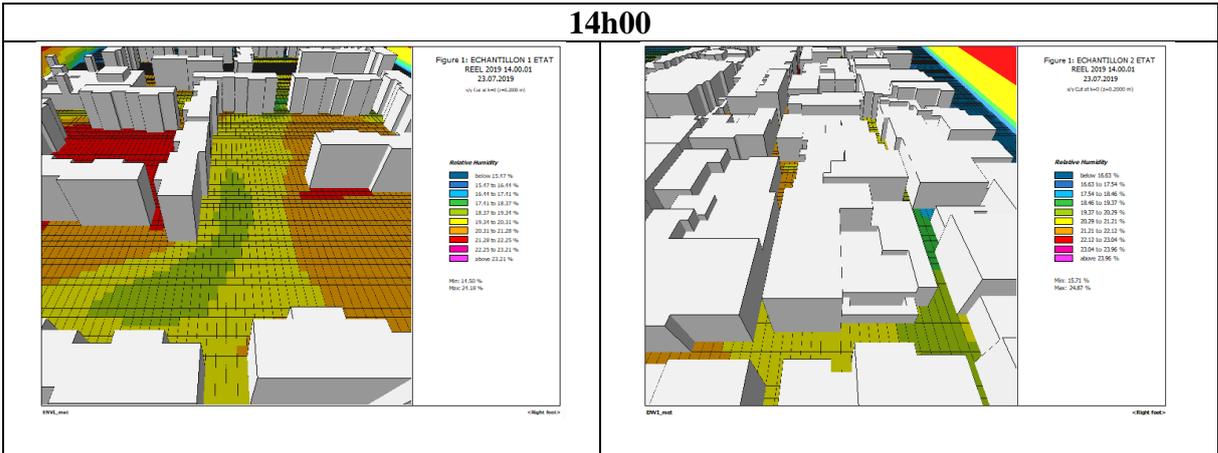
V.8.2.3. Effet du FVC et le ratio H/L sur l'humidité relative

Dans les deux scénarios représentant l'état réel des sites investigués, les résultats de l'humidité relative démontrent une augmentation des taux d'humidité pour le quartier Kemouni, tandis que des humidités plus basses ont été obtenues pour le quartier des 500 logements pendant toute la période de simulation de 06h00 à 20h00. Les valeurs d'humidité sont liées aux valeurs des températures de l'air, de sorte qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de l'humidité. Les résultats de simulation de l'humidité relative pour les deux sites sont illustrés dans le tableau suivant :

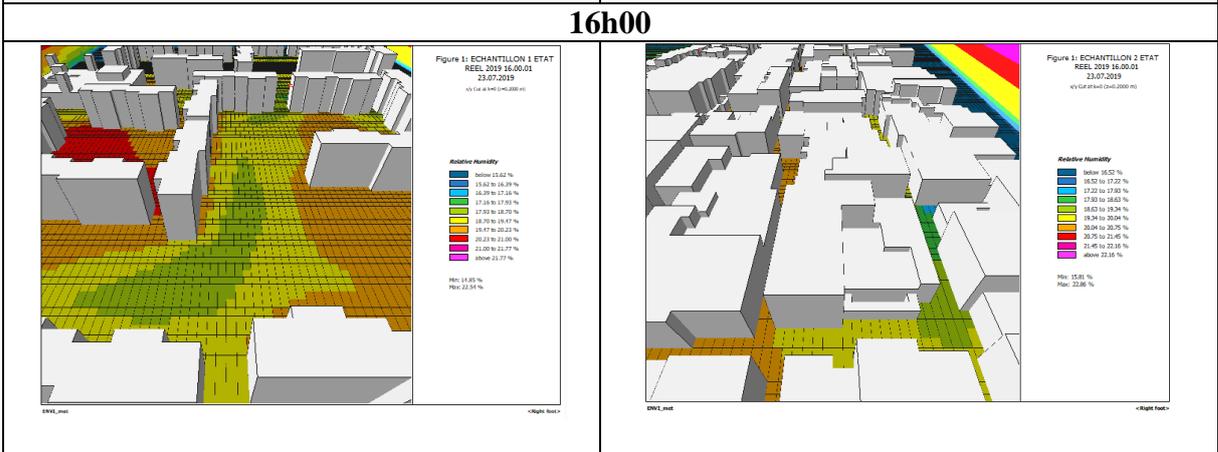
Tableau V. 8: Comparaison entre les valeurs des humidités relatives des deux sites. (Source : Auteure, 2021)



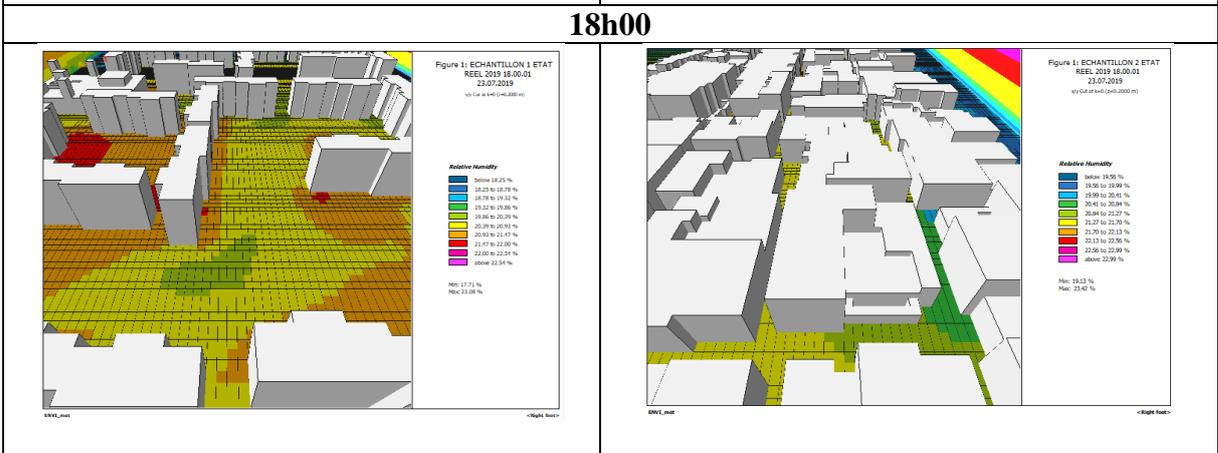
14h00



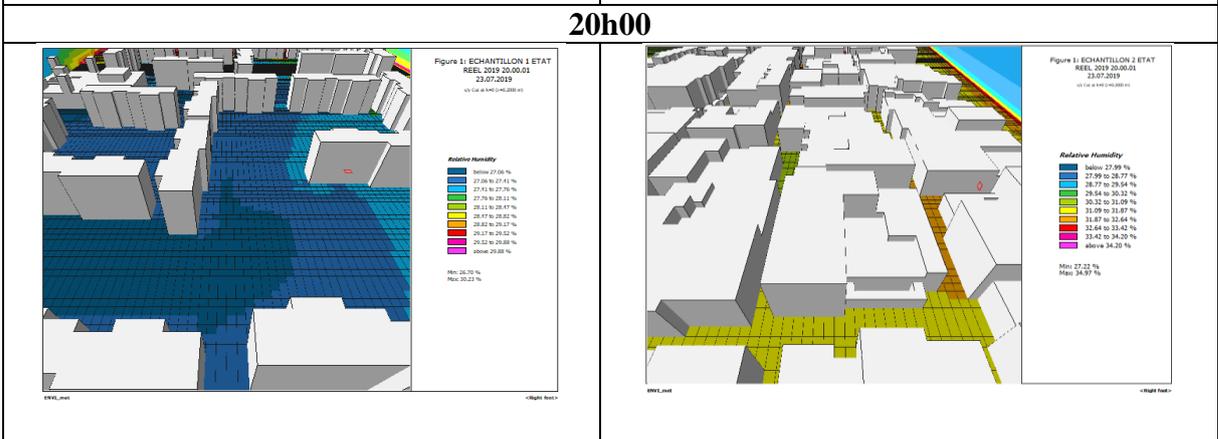
16h00



18h00



20h00



V.8.2.4. Effet du FVC et le ratio H/L sur la vitesse du vent

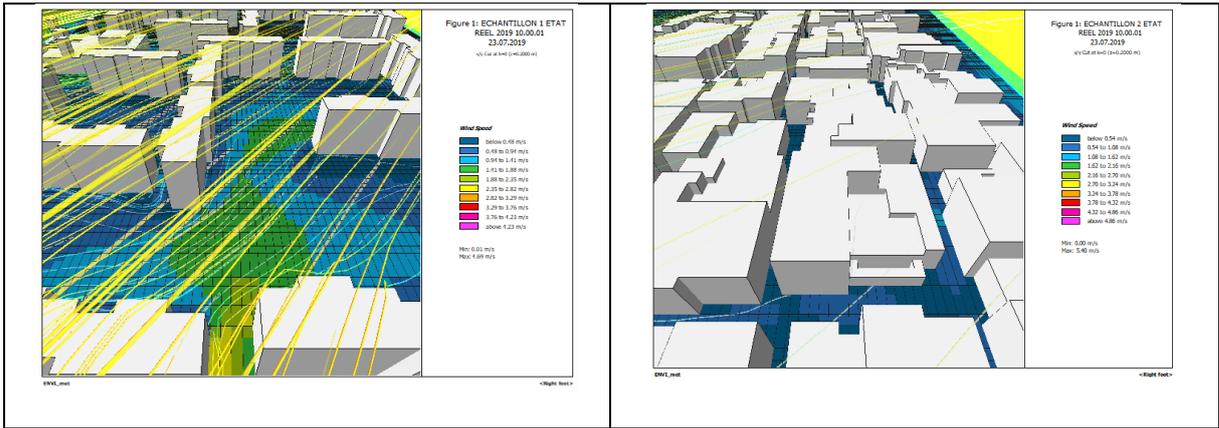
Pour les résultats de simulation des vitesses du vent, on remarque que les vitesses les plus élevées sont obtenues au niveau des espaces extérieurs du quartier des 500 logements, avec des valeurs maximales allant de 2.00m/s à 2.50m/s. Les valeurs les plus faibles sont obtenues au niveau du quartier Kemouni, avec des vitesses maximales allant de 0.98m/s à 1.46m/s à 10h00.

Ces résultats de simulation de l'état actuel valident une fois de plus nos résultats de la campagne de mesures. Les espaces ouverts assurent une meilleure ventilation de l'air par rapport aux espaces confinés. Malgré cela, les constructions isolées, avec l'augmentation des vitesses du vent, peuvent créer des effets aérodynamiques indésirables, entraînant des perturbations telles que des courants d'air et des mouvements tourbillonnaires entre les bâtiments, générant ainsi un état d'inconfort.

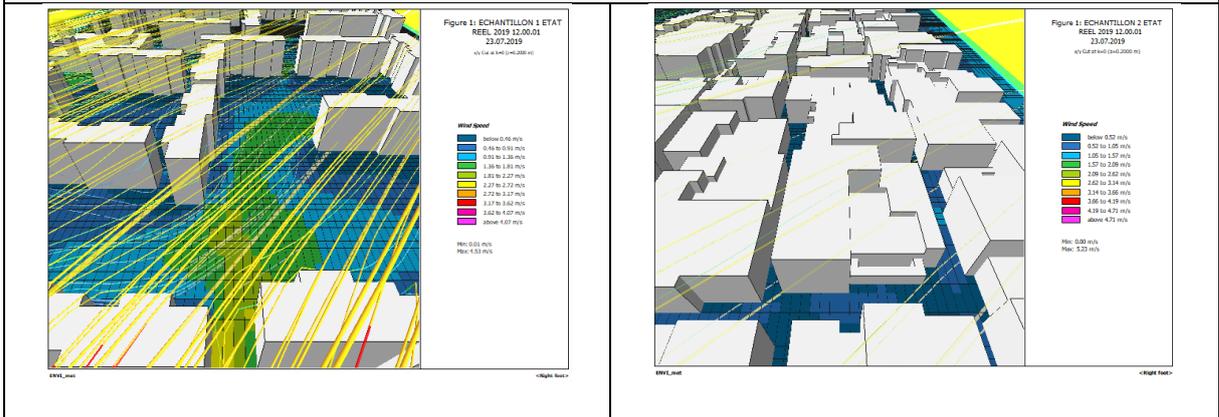
Les résultats de simulation des vitesses du vent des deux scénarios de l'état actuel sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau V. 9 : Comparaison entre les valeurs des vitesses du vent pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)

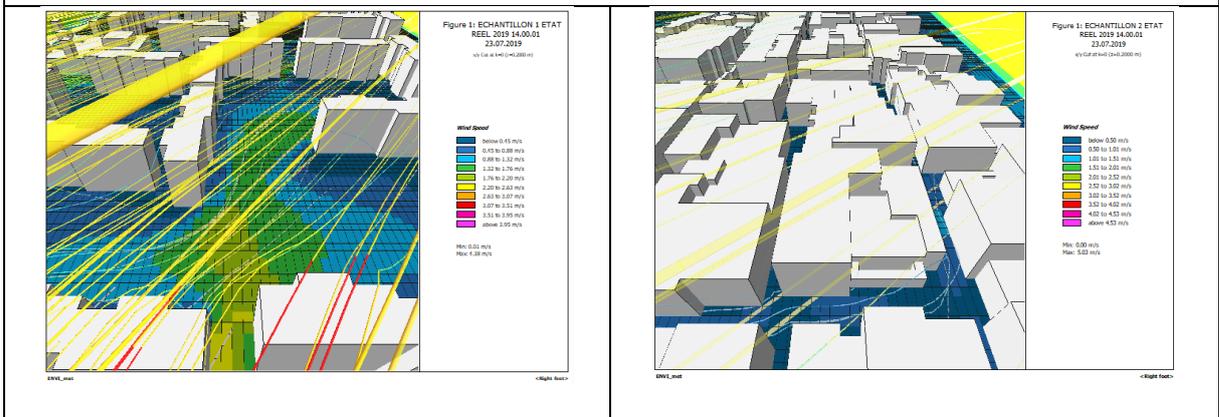
La vitesse de l'air (m/s) de 06h00 à 20h00	
Cité 500 logements	Lotissement Kemouni
06h00	
08h00	
10h00	



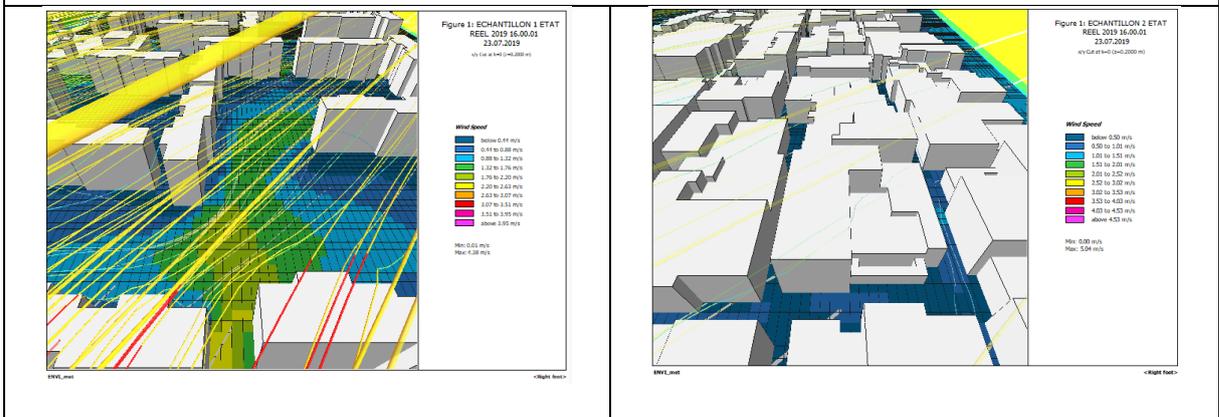
12h00



14h00



16h00



18h00

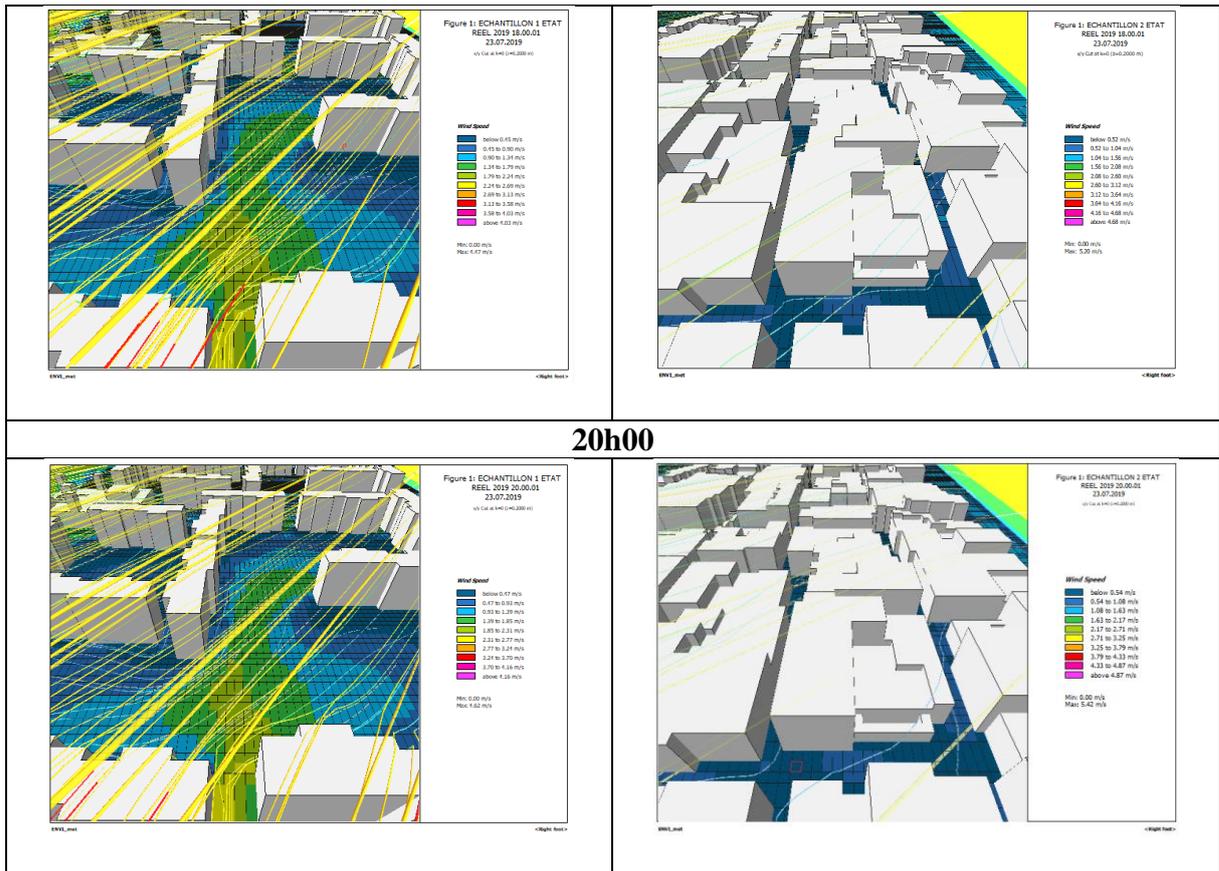
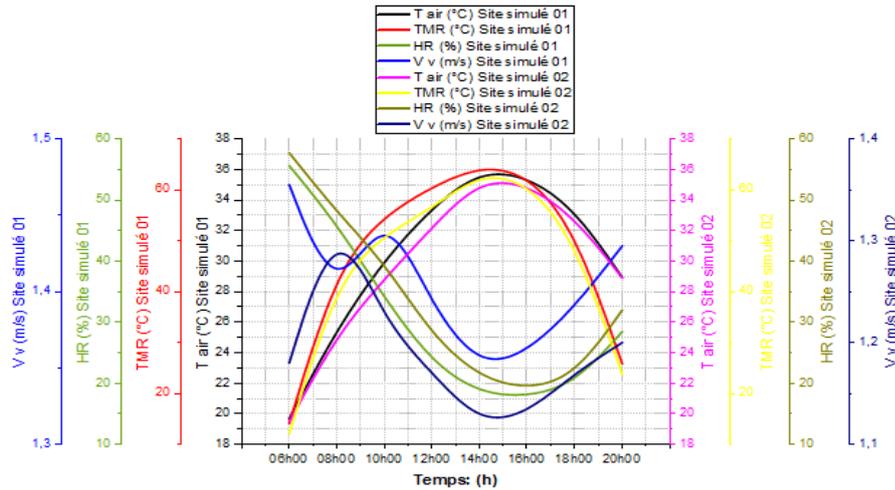


Tableau V. 10 : Les valeurs moyennes des paramètres microclimatiques simulés. (Source : Auteure, 2021)

Temps (h)	Site simulé 01 (Quartier 500 logements)					Site simulé 02 (Quartier Kemouni)				
	T air (°C)	TMR (°C)	HR (%)	V air (m/s)	RS (w/m ²)	T air (°C)	TMR (°C)	HR (%)	V air (m/s)	RS (w/m ²)
06h00	19.68	14.13	55.64	1.47	00.00	19.47	12.16	57.71	1.18	00.00
08h00	25.58	44.82	46.11	1.39	403.21	25.20	42.40	48.01	1.33	402.55
10h00	30.10	55.02	33.95	1.46	493.73	28.83	51.16	39.74	1.22	493.17
12h00	33.51	60.59	23.33	1.39	523.83	32.20	56.36	27.78	1.17	523.59
14h00	35.96	64.76	18.33	1.35	521.33	35.36	63.34	20.30	1.12	521.18
16h00	35.60	63.33	17.75	1.36	484.78	35.07	61.71	18.94	1.13	484.61
18h00	33.44	52.40	19.70	1.39	359.80	32.88	50.34	21.10	1.17	359.58
20h00	29.02	25.80	28.47	1.43	00.00	29.05	23.76	32.18	1.20	00.00



Graph V. 2 : Comparaisons entre les deux sites simulés (source : Auteure, 2021).

V.8.3. Caractérisation du confort thermique à l'échelle des deux quartiers

Le confort thermique dans les environnements urbains extérieurs dépend étroitement des conditions microclimatiques, où la température de l'air et le rayonnement solaire sont les paramètres les plus dominants (Nikolopoulou et Lykoudis, 2006). Le confort thermique dans les espaces extérieurs est principalement lié à la thermo-physiologie, englobant à la fois la physiologie et l'équilibre thermique du corps humain.

Les résultats de nombreuses études sur le confort thermique des usagers dans les espaces extérieurs ont conduit au développement d'une large gamme de modèles et d'indices thermiques. Près de 165 indices thermiques ont été proposés (Bouttelis et Bouchair, 2022), montrant l'intérêt de la communauté scientifique pour l'environnement thermique et le désir de le mesurer.

Ces indices se basent sur le bilan énergétique du corps humain, dévoilant l'interrelation existante entre les activités métaboliques, la vêtue et différents paramètres microclimatiques (température de l'air, température moyenne radiante, rayonnement solaire, humidité relative et vitesse du vent) sur la perception thermique des usagers.

Dans le but d'obtenir une évaluation de la qualité du stress thermique dans les deux sites simulés, nous avons choisi d'utiliser le logiciel BIO-met pour évaluer les trois indices thermiques les plus utilisés pour quantifier le confort thermique extérieur. Ces indices sont également bien adaptés aux conditions des climats chauds et secs : le PMV (Vote Moyen Prévisible), la PET (Température Physiologique Équivalente) et l'UTCI (Indice Thermique Universel).

Ces trois indices choisis (PMV, PET et UTCI) permettent d'interpréter les résultats de simulation en montrant l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique extérieur

dans chaque site simulé. De plus, ils facilitent la comparaison des conditions de confort thermique entre les deux sites simulés.

Afin de faciliter la comparaison entre les deux sites simulés et de couvrir la totalité des deux sites, l'analyse des résultats de simulation, qui varient d'un site à l'autre et d'un espace à l'autre, nous oblige à prendre en compte la moyenne entre les valeurs minimales et maximales des cartes climatiques en deux dimensions (2D).

V.8.3.1. L’impact de la morphologie urbaine sur le PMV (vote moyen prévisible)

Le confort thermique dans les espaces extérieurs des deux sites d'investigation simulés est évalué à l'aide de l'indice thermique PMV, l'un des principaux indices de la thermo-physiologie fréquemment utilisé dans les études de planification urbaine. Les valeurs du PMV sont échelonnées sur une échelle de neuf degrés, variant de -4 à +4. La valeur -4 correspond au seuil de « froid », la valeur 0 à l'état neutre, et la valeur +4 au seuil de « chaud ».

Le tableau ci-dessous résume les valeurs de simulation du PMV dans les deux quartiers simulés. L'évolution du PMV montre des valeurs élevées au niveau des espaces extérieurs du quartier des 500 logements par rapport au quartier Kemouni. À partir de 12h00, un stress thermique important est enregistré dans les espaces extérieurs des deux sites simulés, avec des valeurs variant entre (PMV 3 et 4). À 14h00 et 16h00, un état de stress thermique extrême est relevé au niveau des espaces des deux sites (PMV= 5.15) pour le quartier des 500 logements et (PMV= 4.85) pour le quartier Kemouni.

Les valeurs du PMV dans chaque scénario simulé sont présentées dans le tableau ci-dessous :

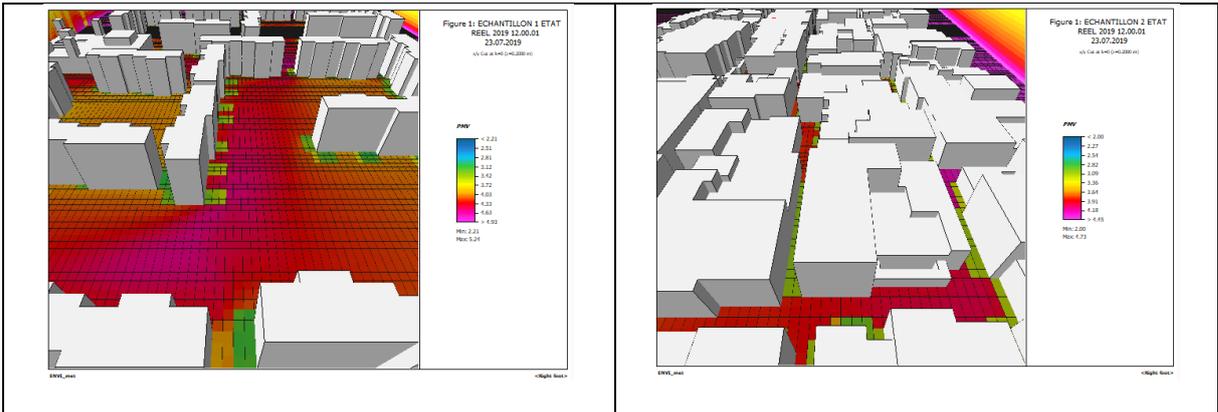
Tableau V.11: Les valeurs moyennes du PMV. (Source : Auteure, 2021)

PMV	Quartier 500 logements	Quartier Kemouni
06h00	-1.03	-1.19
Etat thermique	Légèrement froid	
08h00	1.50 1.47	1.32
Etat thermique	Chaud	
10h00	2.92	2.45
Etat thermique	Très chaud	
12h00	3.93	3.44
Etat thermique	Extrêmement chaud	
14h00	4.72	4.28
Etat thermique	Extrêmement chaud	
16h00	4.43	4.15
Etat thermique	Extrêmement chaud	
18h00	3.36	3.10
Etat thermique	Très chaud	
20h00	1.16	0.89
Etat thermique	Légèrement chaud	

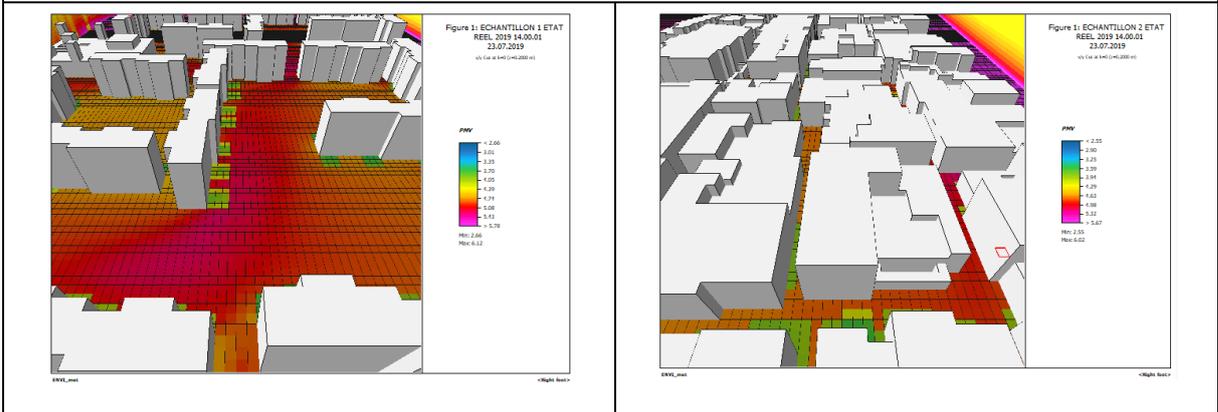
Les résultats de simulation du PMV pour les deux scénarios sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.12: Comparaison entre les valeurs du PMV pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)

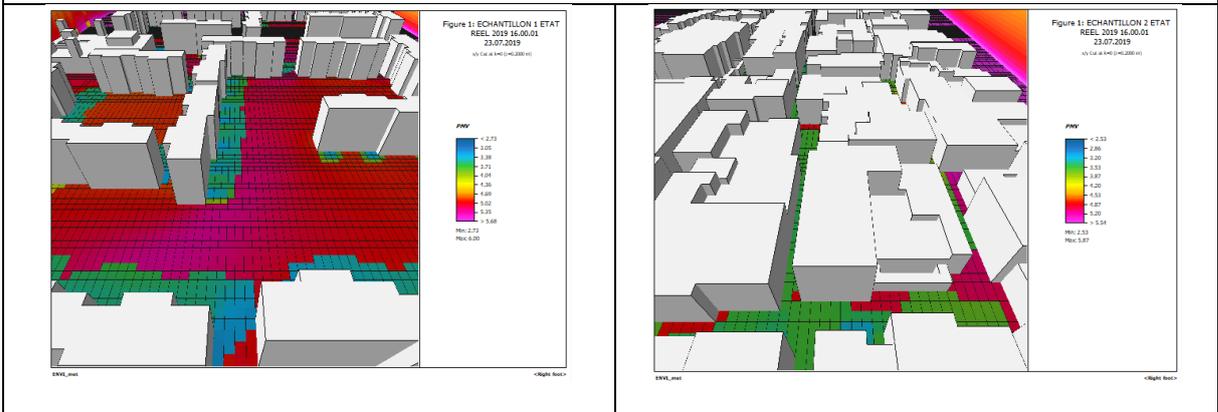
Le PMV de 06h00 à 20h00	
Cité 500 logements	Lotissement Kemouni
06h00	
<p>Figure 1: ECHANTILLON 1 ETAT REEL 2019 06.00.01 23.07.2019 10.146.4145 (144-0.000-00)</p> <p>PMV -1.42 -1.30 -1.20 -1.07 -0.96 -0.83 -0.71 -0.62 -0.51</p> <p>Min: -1.42 Max: -0.51</p>	<p>Figure 1: ECHANTILLON 2 ETAT REEL 2019 06.00.01 23.07.2019 10.146.4145 (144-0.000-00)</p> <p>PMV -1.29 -1.25 -1.13 -1.07 -0.96 -0.82 -0.68 -0.54</p> <p>Min: -1.29 Max: -0.40</p>
08h00	
<p>Figure 1: ECHANTILLON 1 ETAT REEL 2019 08.00.01 23.07.2019 10.146.4145 (144-0.000-00)</p> <p>PMV -0.87 -0.80 -0.69 -0.58 -0.47 -0.35 -0.23 -0.11 0.01 1.13 1.25 1.37 1.50 1.63 1.75 1.87 2.00 2.12 2.25 2.37 2.45</p> <p>Min: -0.87 Max: 2.45</p>	<p>Figure 1: ECHANTILLON 2 ETAT REEL 2019 08.00.01 23.07.2019 10.146.4145 (144-0.000-00)</p> <p>PMV -1.28 -1.20 -0.93 -0.83 -0.72 -0.61 -0.50 -0.39 -0.28 -0.17 -0.06 0.05 1.17 1.29 1.41 1.53 1.65 1.77 1.89 2.01 2.13 2.25 2.37 2.49 2.60</p> <p>Min: -1.28 Max: 2.60</p>
10h00	
<p>Figure 1: ECHANTILLON 1 ETAT REEL 2019 10.00.01 23.07.2019 10.146.4145 (144-0.000-00)</p> <p>PMV -1.28 -1.15 -1.02 -0.89 -0.76 -0.63 -0.50 -0.37 -0.24 -0.11 0.02 1.14 1.26 1.38 1.50 1.62 1.74 1.86 1.98 2.10 2.22 2.34 2.46 2.58 2.70 2.82 2.94 3.06 3.18 3.30 3.42 3.54 3.66 3.78 3.90 4.02 4.14 4.22</p> <p>Min: -1.28 Max: 4.22</p>	<p>Figure 1: ECHANTILLON 2 ETAT REEL 2019 10.00.01 23.07.2019 10.146.4145 (144-0.000-00)</p> <p>PMV -1.28 -1.20 -1.00 -0.80 -0.60 -0.40 -0.20 -0.05 0.15 0.35 0.55 0.75 0.95 1.15 1.35 1.55 1.75 1.95 2.15 2.35 2.55 2.75 2.95 3.15 3.35 3.55 3.75 3.95 4.15 4.35</p> <p>Min: -1.28 Max: 3.79</p>
12h00	



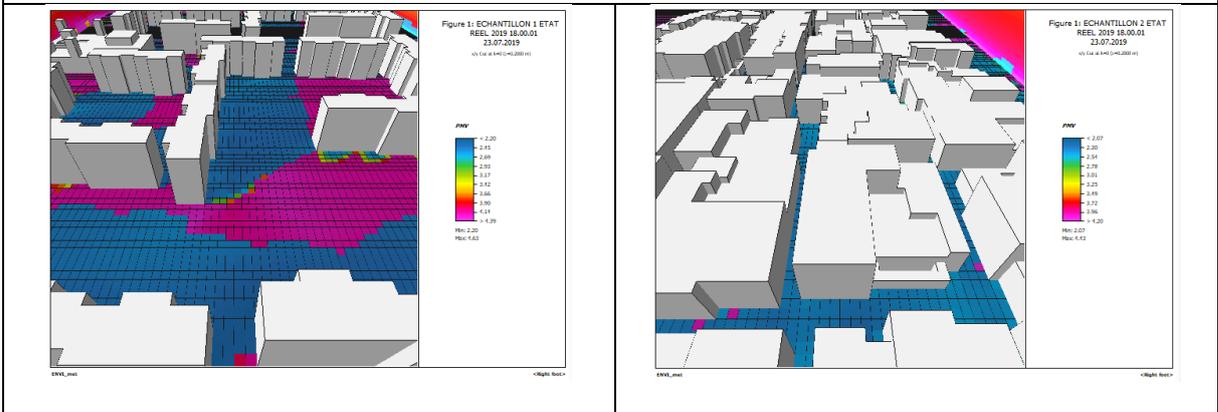
14h00



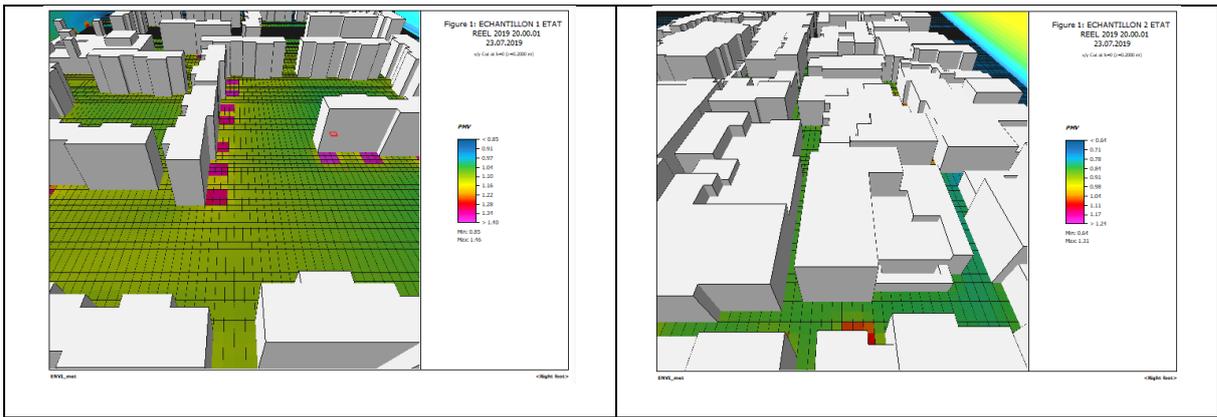
16h00



18h00



20h00



V.8.3.2. L'impact de la morphologie urbaine sur la PET (Température Physiologique équivalente)

L'indice de température physiologique équivalente (PET) présente un indice thermique souvent utilisé pour l'estimation du confort thermique dans les environnements urbains extérieurs exposés à des climats chauds. Il est dérivé de l'équation du bilan énergétique humain (Höppe, 1999). La mesure du PET utilise comme données d'entrée l'humidité relative, la température de l'air, la vitesse du vent et la température radiante moyenne. Il est effectué via le logiciel BIO-met intégrant un modèle thermo-physiologique du corps humain.

Les résultats de simulation pour les deux sites montrent que le quartier des 500 logements présente les valeurs les plus élevées de PET, indiquant un niveau de stress thermique plus important qui commence à se manifester à partir de 08h00 du matin jusqu'à 18h00 le soir, avec des valeurs maximales couvrant la majorité des espaces ouverts respectivement de : 39.59°C à 08h00, 48.84°C à 10h00, 49.50°C à 12h00, 50.00°C à 14h00, 51.84°C à 16h00, et 47.04°C à 18h00. Le quartier Kemouni, en revanche, présente des valeurs maximales de PET à partir de 10h00 jusqu'à 16h00. Les valeurs du stress thermique sont respectivement : 46.46°C à 10h00, 48.85°C à 12h00, 51.36°C à 14h00, et 43.19°C à 16h00.

Le quartier des 500 logements subit donc un stress thermique pendant une durée plus longue (de 08h00 à 18h00) par rapport à une durée plus courte (de 10h00 à 16h00) au quartier Kemouni. Les heures de 06h00 et 20h00 correspondent à des périodes de léger stress thermique dans les deux sites simulés.

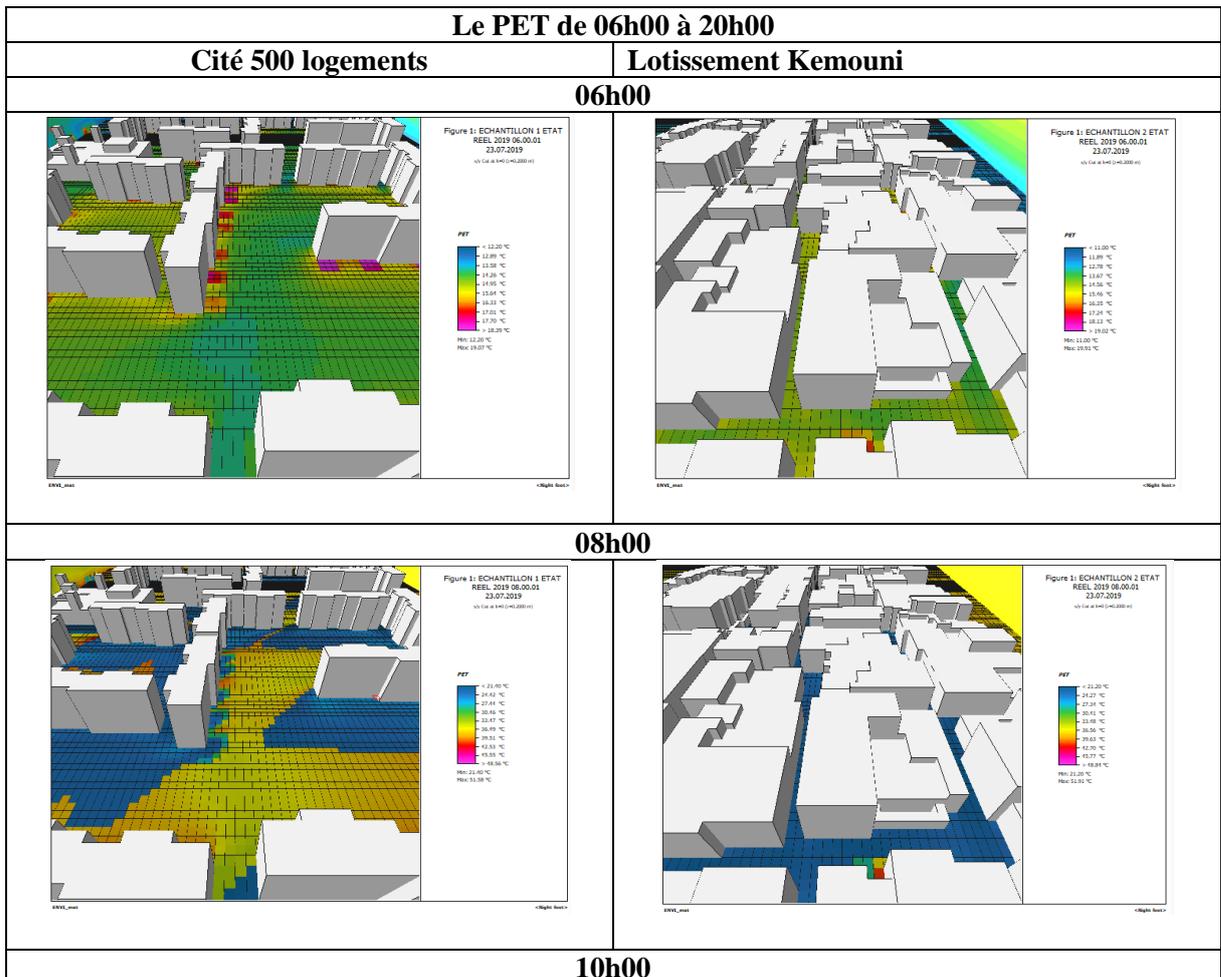
Les résultats moyens du PET pour les deux sites simulés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

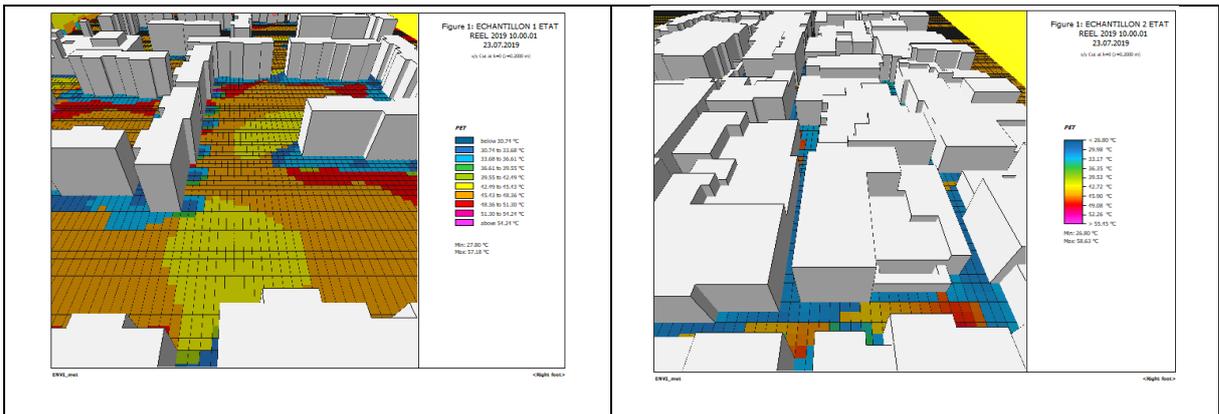
Tableau V. 13 : Les valeurs moyennes du PET. (Source : Auteure, 2021)

PET (°C)	Quartier 500 logements	Quartier Kemouni
06h00	15.22	14.63
Etat thermique	Légèrement froid	
08h00	32.09	31.92
Etat thermique	Chaud	
10h00	39.17	38.85
Etat thermique	Très chaud	
12h00	44.23	43.08
Etat thermique	Extrêmement chaud	
14h00	46.78	45.59
Etat thermique	Extrêmement chaud	
16h00	45.12	44.59
Etat thermique	Extrêmement chaud	
18h00	41.03	40.41
Etat thermique	Extrêmement chaud	Très chaud
20h00	25.53	25.02
Etat thermique	Légèrement chaud	

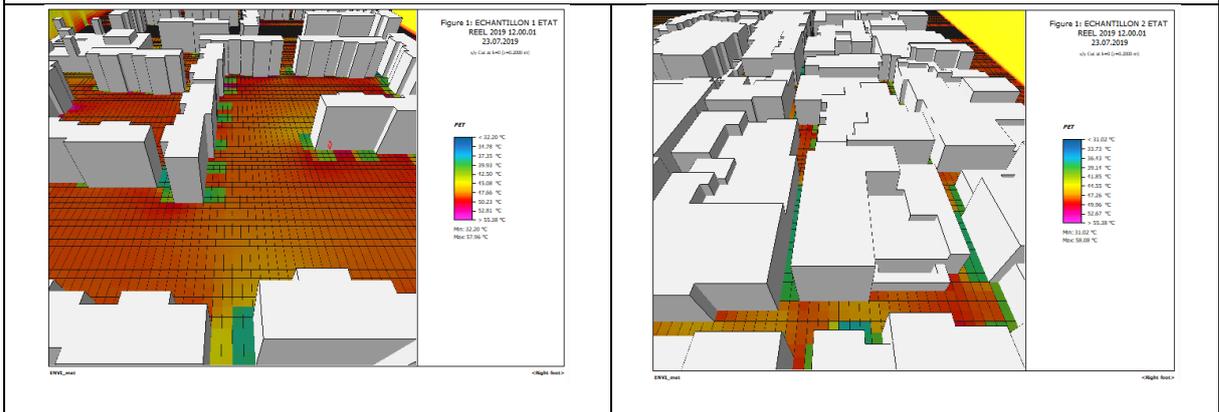
Les résultats de simulation de la PET pour les deux sites simulés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V. 14 : Comparaison entre les valeurs de PET pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)

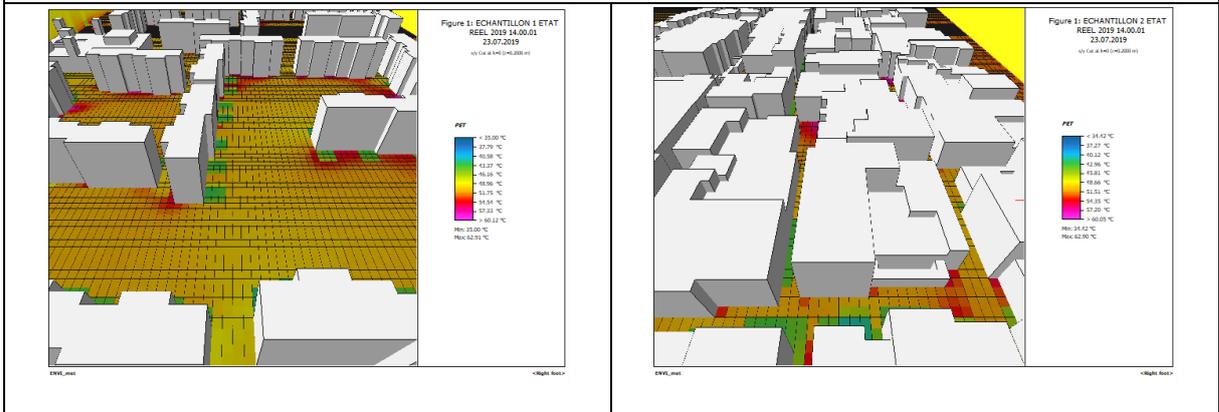




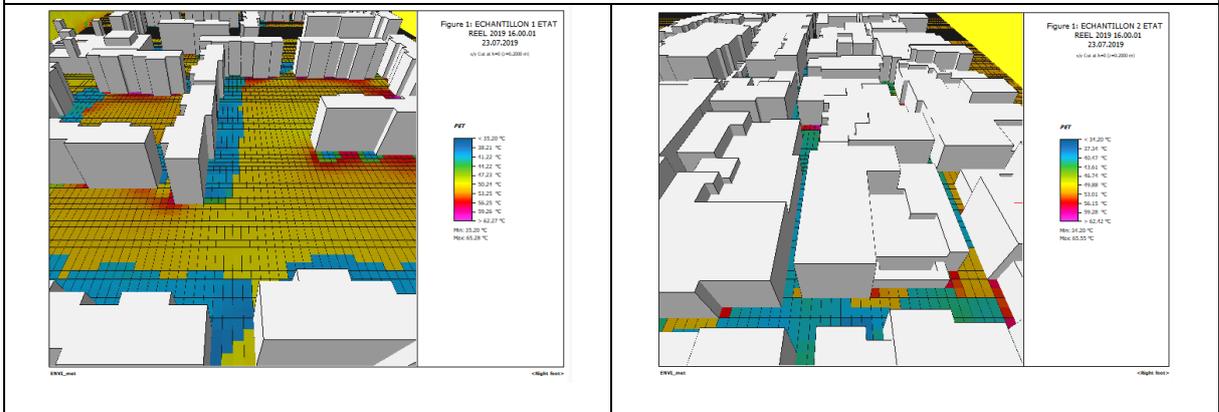
12h00



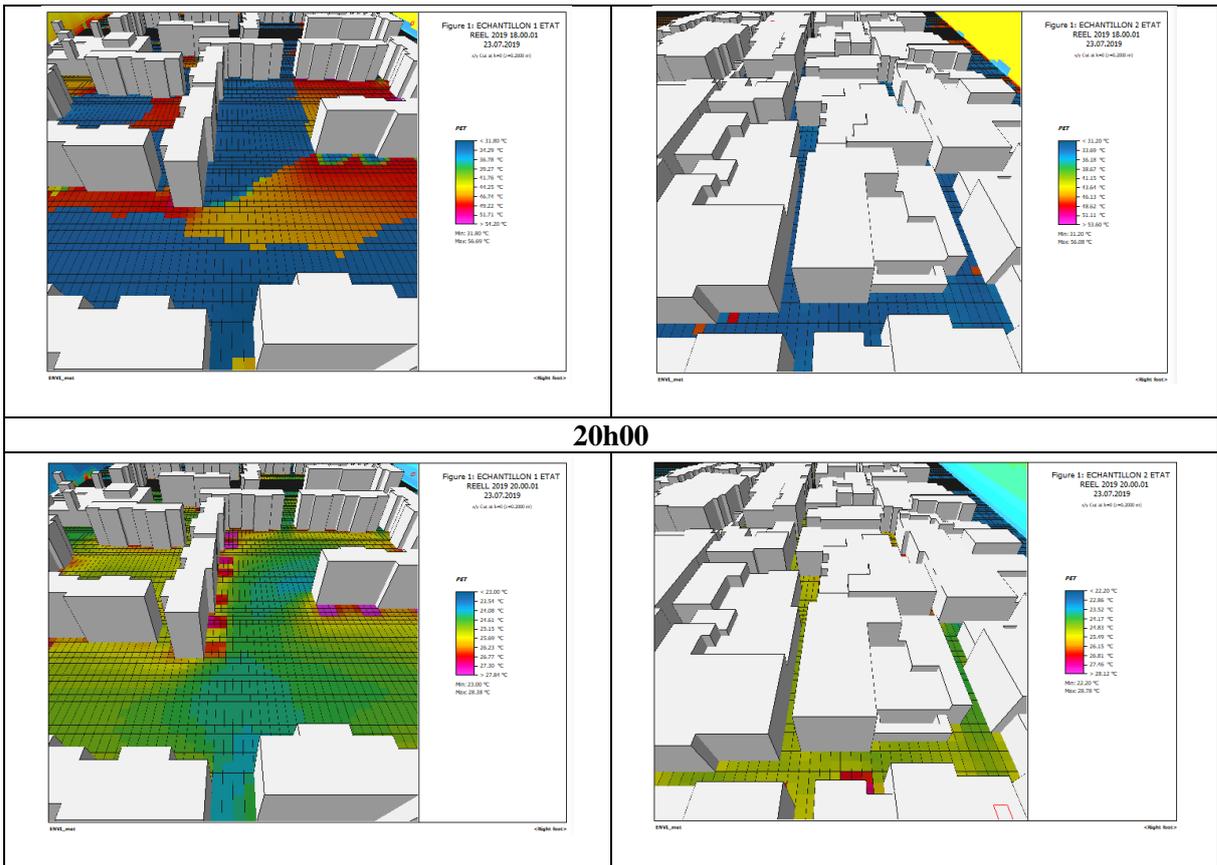
14h00



16h00



18h00



V.8.3.3. L'impact de la morphologie urbaine sur l'UTCI (Indice Universel du Climat Thermique)

L'indice d'UTCI, introduit en 1994, prend en compte la température sèche, l'humidité relative, le rayonnement solaire et la vitesse du vent, et est considéré comme la température environnementale de référence causant des contraintes. L'UTCI est reconnu comme l'un des indices les plus exhaustifs pour quantifier la contrainte thermique dans les espaces extérieurs (Zare et al., 2018). L'indice UTCI est particulièrement recommandé pour estimer la perception du stress thermique dans différents climats (climats chauds, froids ou modérés), plusieurs études le préconisent comme un indice universel.

Les résultats de simulation indiquent que le quartier des 500 logements enregistre des valeurs d'UTCI supérieures de 08h00 à 18h00. Cependant, le quartier Kemouni présente des valeurs moins élevées, enregistrées de 10h00 à 16h00.

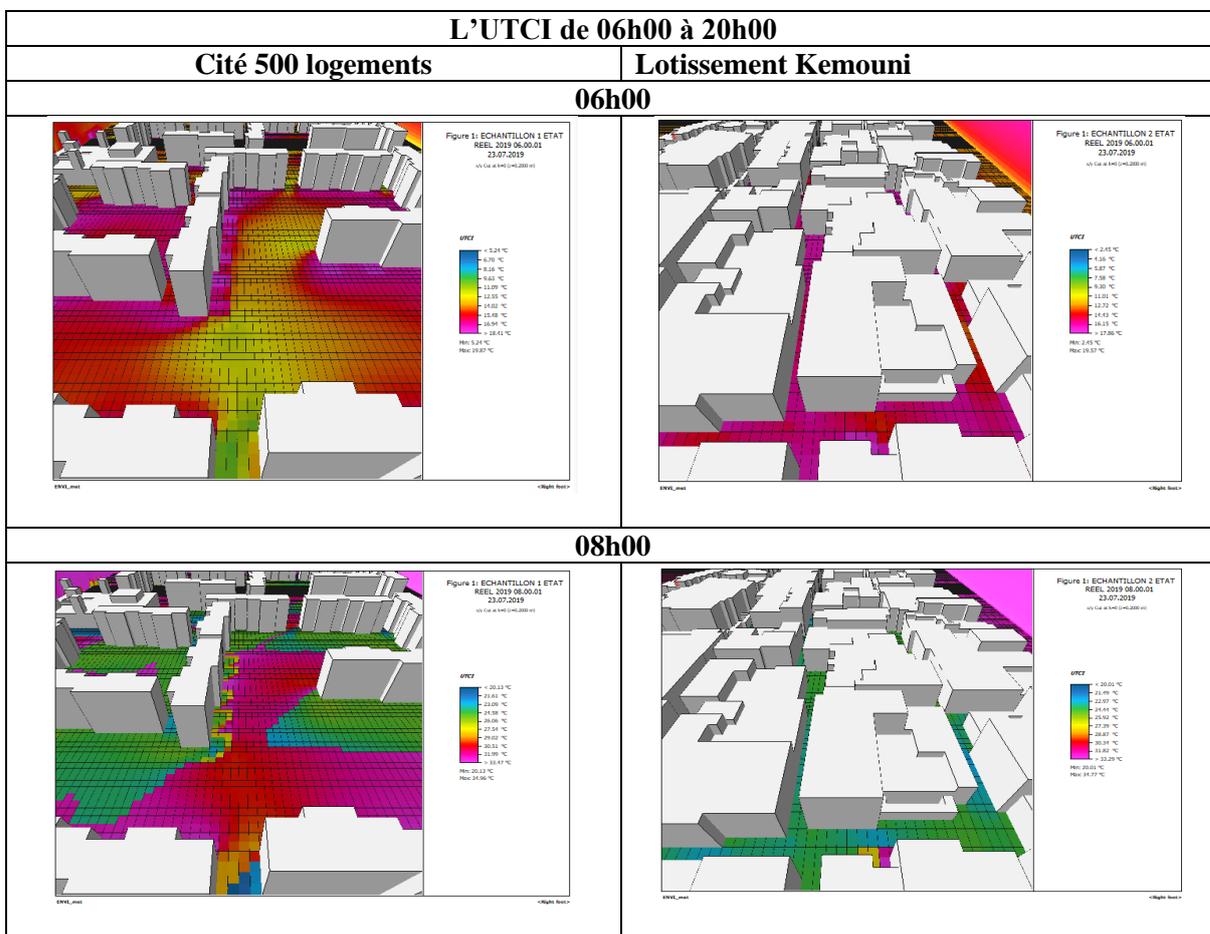
La valeur maximale est obtenue pour le quartier des 500 logements à 16h00, avec une valeur de 43.37°C. Pour le quartier Kemouni, la valeur maximale est de 42.34°C, enregistrée à 14h00. Entre 06h00 et 20h00, les deux quartiers enregistrent des valeurs situées dans des zones confortables, à cause de l'effet limité du rayonnement solaire. Les résultats moyens d'UTCI pour les deux sites simulés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

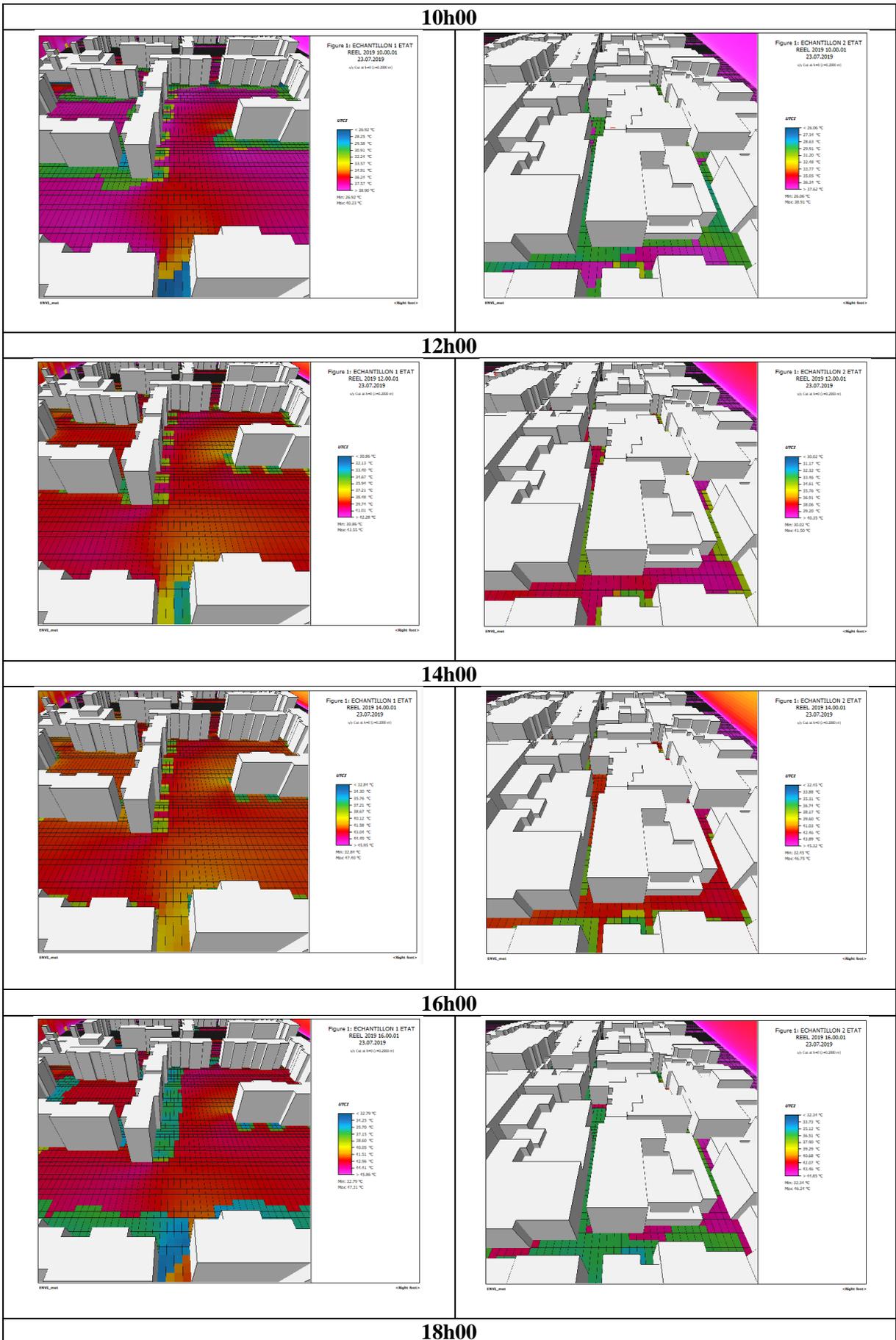
Tableau V. 15 : Les valeurs moyennes d'UTCI. (Source : Auteure, 2021)

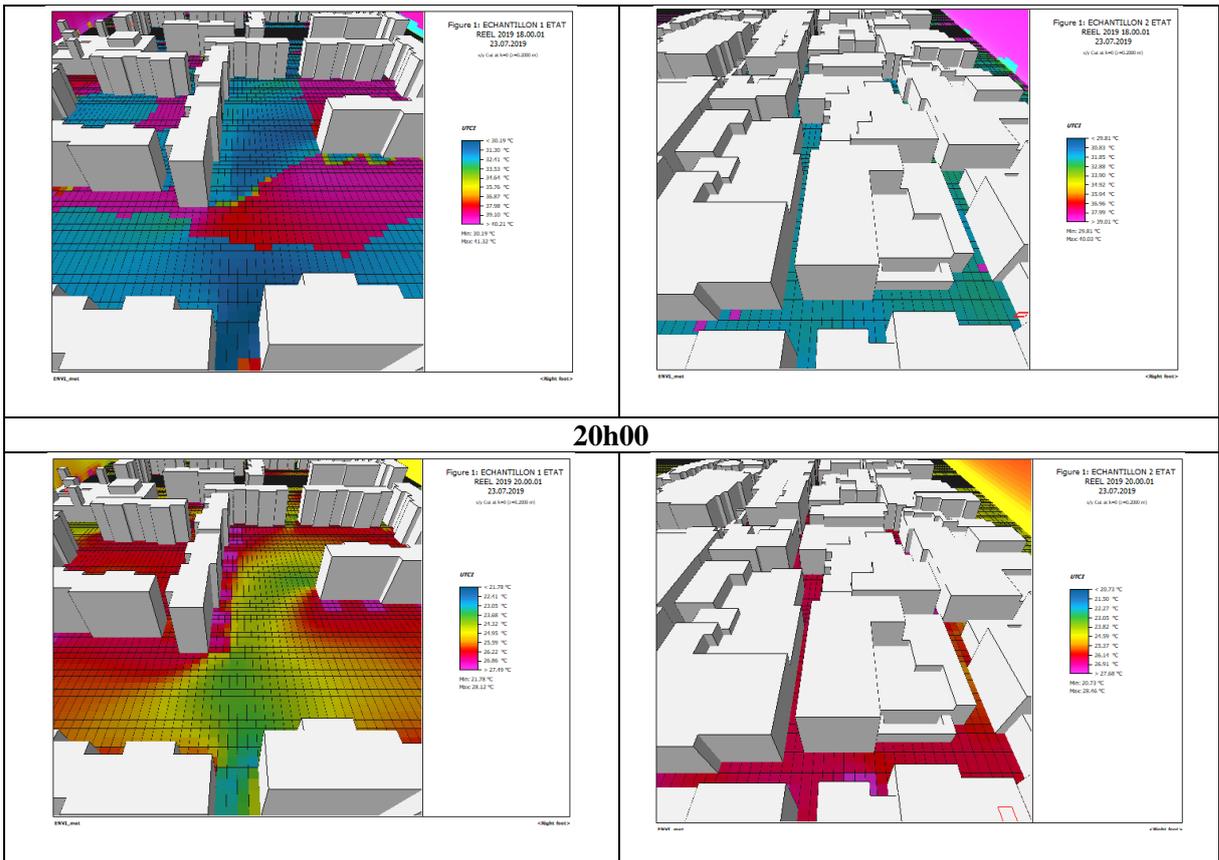
UTCI (°C)	Quartier 500 logements	Quartier Kemouni
06h00	11.57	9.96
Etat thermique	Confortable	
08h00	26.79	26.43
Etat thermique	Modéré	
10h00	32.91	31.84
Etat thermique	Fort	Modéré
12h00	37.38	35.60
Etat thermique	Fort	
14h00	41.21	39.36
Etat thermique	Très fort	
16h00	40.09	39.04
Etat thermique	Très fort	
18h00	35.20	34.27
Etat thermique	Fort	
20h00	24.36	23.99
Etat thermique	Modéré	

Les résultats de simulation de l'UTCI pour les deux sites simulés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V. 16 : Comparaison entre les valeurs d'UTCI pour les deux sites. (Source : Auteure, 2021)



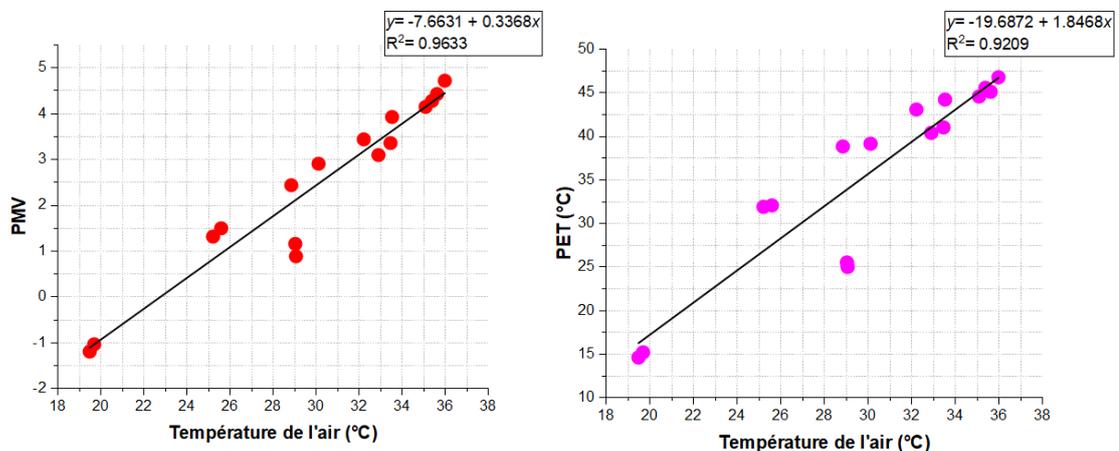


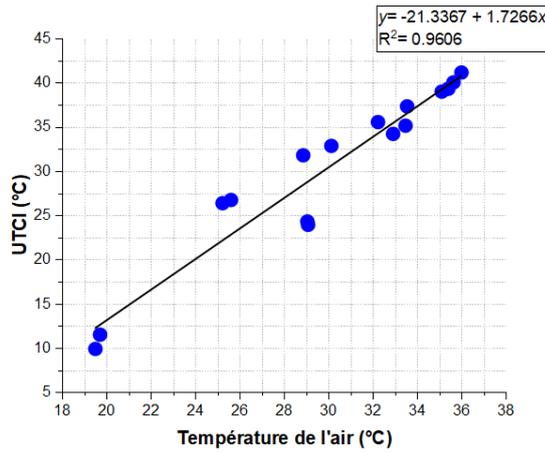


V.8.4. Corrélation entre les indices thermiques (PMV, PET, et UTCI) et les paramètres microclimatiques

V.8.4.1. Corrélation entre PMV, PET, UTCI et la température de l'air :

Les résultats de corrélation pour les trois indices thermiques sont présentés ci-dessous, révélant une relation très forte et positive entre les indices thermiques et la température de l'air. En effet, l'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation des indices de confort thermique extérieur. Les valeurs du coefficient de Pearson pour le PMV, la PET et l'UTCI sont respectivement les suivantes : $R^2= 0.965$, $R^2= 0.923$ et $R^2= 0.962$.

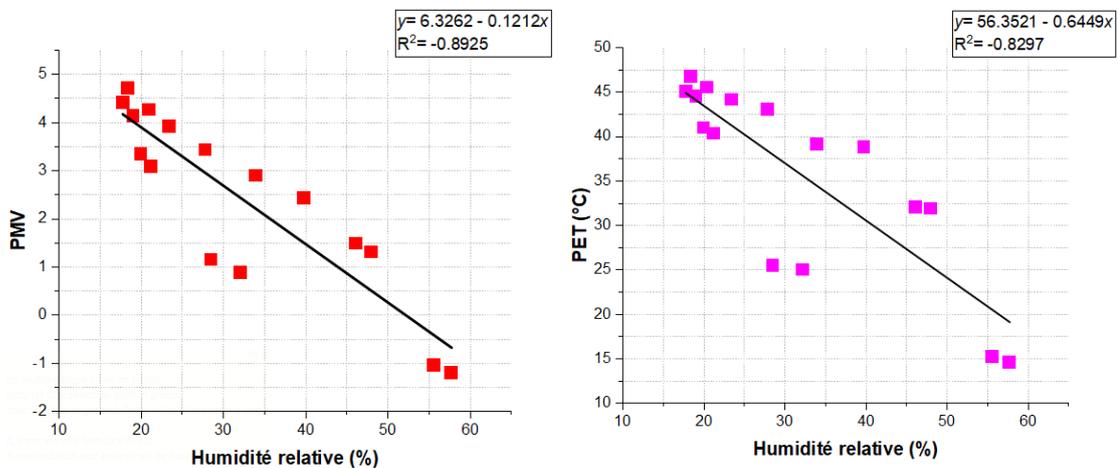


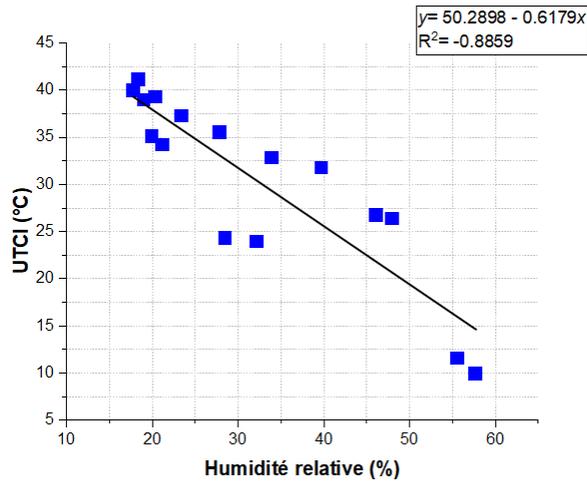


Graph V. 3 : Corrélation entre le PMV, la PET, l'UTCI, et la température de l'air. (Source : Auteure, 2021)

V.8.4.2. Corrélation entre PMV, PET, UTCI et l'humidité relative

Les résultats de corrélation des indices thermiques avec l'humidité relative révèlent une relation très forte et négative pour les trois indices de confort thermique extérieur, avec des valeurs proches du coefficient de Pearson : $R^2 = -0.892$ pour le PMV, $R^2 = -0.829$ pour la PET et $R^2 = -0.885$ pour l'UTCI. Ces données suggèrent qu'une augmentation des indices thermiques est associée à une réduction de l'humidité relative, ce qui s'explique par la relation inverse entre la température de l'air et l'humidité relative.

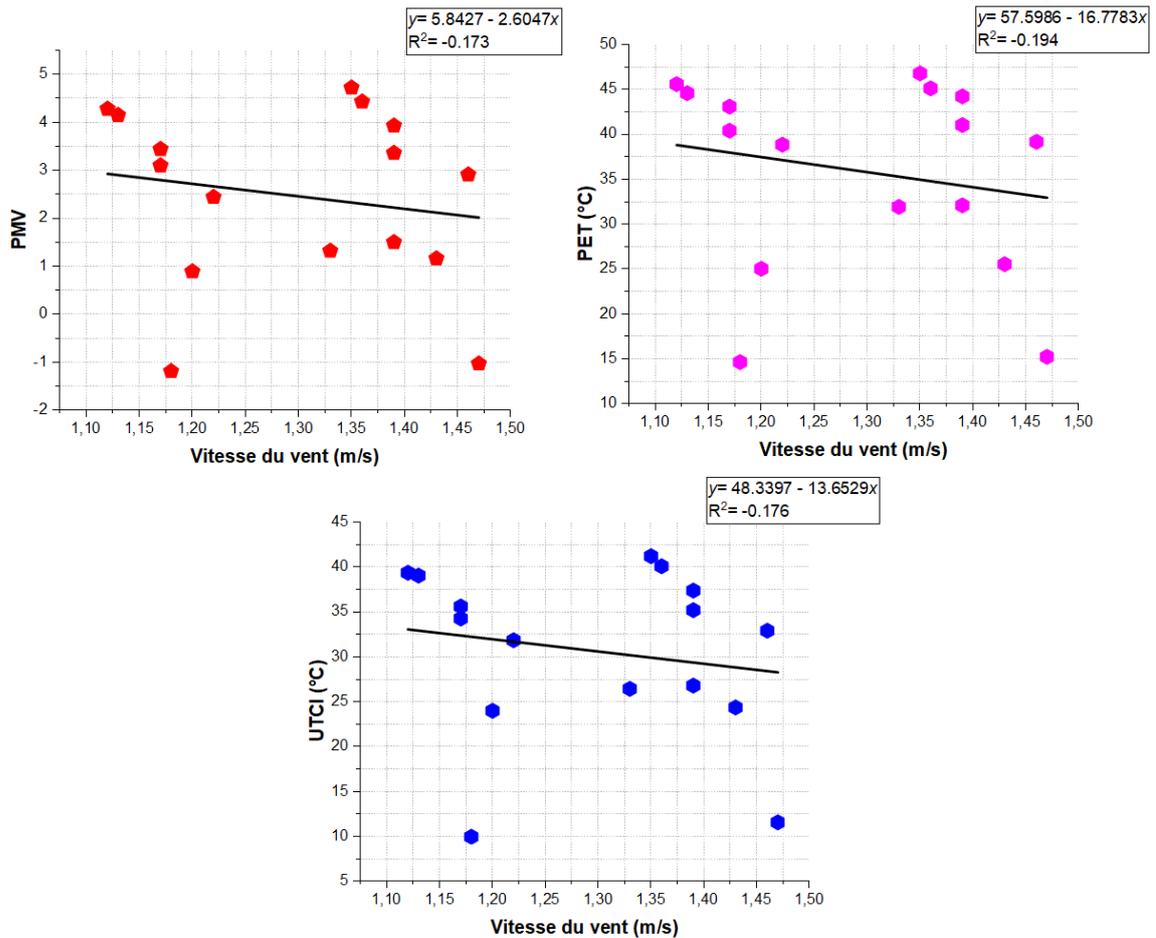




Graph VI. 4 : Corrélation entre le PMV, la PET, l'UTCI et l'humidité relative. (Source : Auteure, 2021)

V.8.4.3. Corrélation entre PMV, PET, UTCI et la vitesse du vent

Les corrélations pour les trois indices thermiques révèlent des relations linéaires très faibles, avec des coefficients de Pearson de $R^2 = -0.173$ pour le PMV, $R^2 = -0.194$ pour la PET et $R^2 = -0.176$ pour l'UTCI. Ces résultats indiquent une influence très limitée de la vitesse du vent sur les indices thermiques.

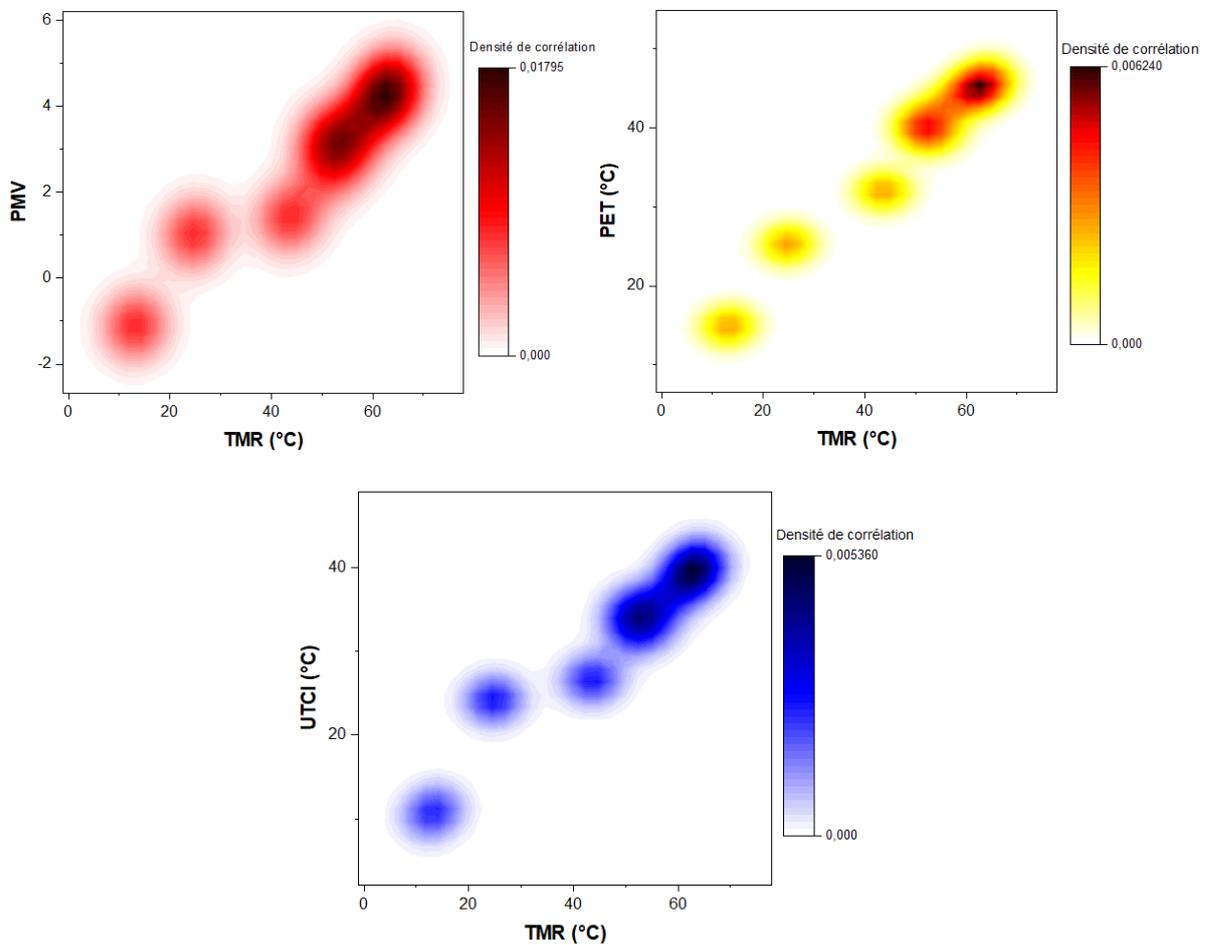


Graph VI. 5 : Corrélation entre PMV, PET, UTCI, et Vitesse du vent. (Source : Auteure, 2021)

V.8.4.4. Corrélation du PMV, PET et UTCI avec la température moyenne radiante (TMR)

Les résultats mettent en évidence une corrélation positive significative entre les trois indices thermiques (PMV, PET et UTCI) et la température moyenne radiante (TMR). En d'autres termes, les indices de confort thermique extérieur augmentent proportionnellement à l'augmentation de la température moyenne radiante, et inversement.

Lorsque la température moyenne radiante s'élève, les indices thermiques en extérieur tendent également à augmenter, tandis que leur diminution est observée lorsque la température moyenne radiante diminue. Il existe donc une liaison directe entre ces indices de confort climatique et la température radiante moyenne dans l'environnement urbain.



Graph V. 6 : Corrélation entre température moyenne radiante et PMV, PET et UTCI. (Source : Auteure, 2021)

Conclusion

Ce chapitre présente d'abord les résultats collectés de la simulation des deux sites étudiés, en soulignant l'importance de l'outil numérique dans la climatologie urbaine. Pour modéliser le phénomène urbain, nous avons utilisé le logiciel ENVI-met, qui permet de comprendre l'impact du milieu urbain sur le microclimat et le confort thermique en extérieur.

Ces résultats ont validé la fiabilité et la précision du logiciel ENVI-met dans la modélisation et la simulation de l'interaction entre le milieu urbain et le microclimat. Ensuite, nous avons analysé l'interrelation entre la morphologie urbaine, la géométrie urbaine et les paramètres microclimatiques au niveau des deux sites simulés.

Les résultats ont identifié la morphologie urbaine comme un élément déterminant dans la création de géométries spécifiques en fonction de la forme bâtie. Nous avons constaté que les formes isolées des grands ensembles ont été associées à des espaces offrant une grande ouverture au ciel, ce qui permettait un accès direct aux radiations solaires sur différentes surfaces telles que les sols et les façades. À l'inverse, les formes denses et compactes étaient associées à une minimisation des surfaces exposées au soleil.

Cette analyse approfondie et détaillée montre l'impact de la morphologie urbaine dans la configuration du microclimat, en dévoilant comment différentes formes bâties modifient les conditions environnementales locales. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en considération la morphologie urbaine dans les stratégies d'aménagement visant à optimiser le confort thermique en milieu urbain.

Chapitre VI : Optimisation du confort thermique extérieur par simulations paramétriques

Introduction

En mettant l'accent sur les ambiances thermiques, de nombreuses recherches ont été menées pour étudier l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat urbain, et ont largement utilisé la simulation numérique comme outil fiable pour concevoir des aménagements adéquats afin d'améliorer les conditions thermiques dans les espaces urbains. Dans ce sens, la simulation numérique du logiciel ENVI-met 4.4.6, qui a été démontré pour son efficacité et ses performances dans ce domaine, sera utilisée pour améliorer le confort thermique dans la présente recherche.

En utilisant un processus de modification des paramètres supposés avoir un impact considérable sur le confort thermique extérieur, l'objectif principal de ce chapitre est d'optimiser la forme urbaine au niveau du quartier 500 logements qui est considéré comme un cas défavorable en termes de conditions thermiques extérieures. La densité est utilisée comme premier paramètre, la hauteur des constructions est utilisée comme deuxième paramètre et enfin la combinaison des deux est utilisée comme troisième paramètre.

Vue que le quartier avait une densité très faible avec un coefficient d'emprise au sol (CES) brut de 0,17 et une hauteur fixe de 15m, ce choix a été basé sur le critère de densité urbaine. Cette sélection nous permet d'étudier l'effet des multiples niveaux de densité et de hauteurs sur les paramètres microclimatiques, influençant ainsi le confort thermique extérieur.

Notre objectif représente la détermination de la forme urbaine la plus adaptée en matière de confort climatique extérieur pour un climat semi-aride. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons choisi d'augmenter la densité et la hauteur du cadre bâti dans le quartier 500 logements tout en maintenant l'aménagement et la disposition globale des constructions existantes.

VI.1. Présentation du protocole du modèle d'optimisation simulé

Notre recherche vise à élaborer des modèles d'optimisation pour concevoir des formes urbaines offrant plus de zones ombragées au niveau des espaces publics à l'intérieur de notre quartier résidentiel (500 logements), permettant ainsi de protéger ces espaces publics contre l'intensité de l'irradiation solaire pendant la période estivale. L'approche adoptée est illustrée schématiquement dans la figure suivante :

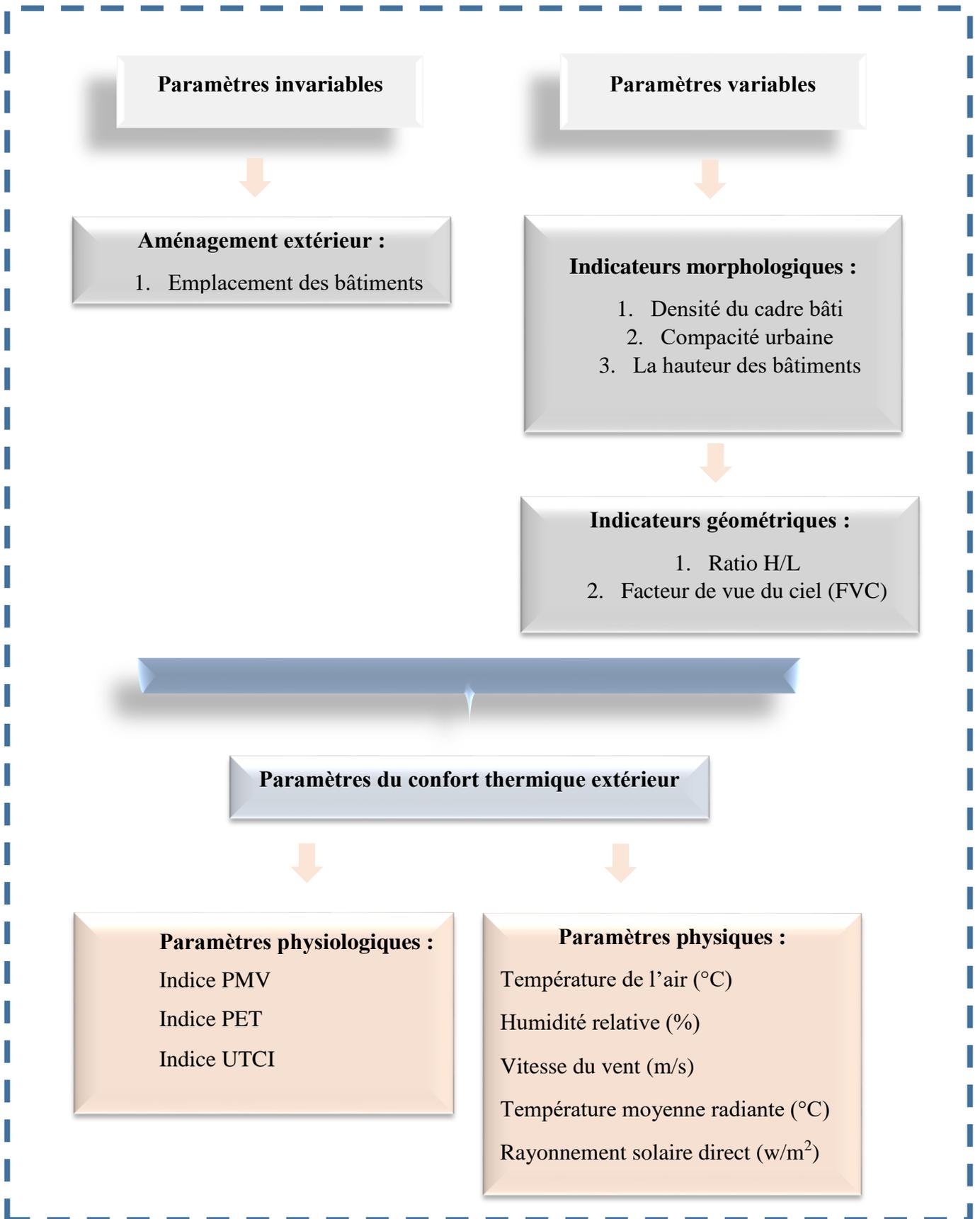


Figure VI. 1 : Le protocole d'amélioration adopté. (Source : Auteure, 2021)

VI.2. Les étapes de création du modèle d'optimisation du confort thermique extérieur

Des scénarios de simulation ont été proposés en deux étapes en se basant sur trois variables principales afin d'améliorer le confort thermique des espaces publics dans notre quartier de 500 logements. La figure ci-dessous montre ces étapes :

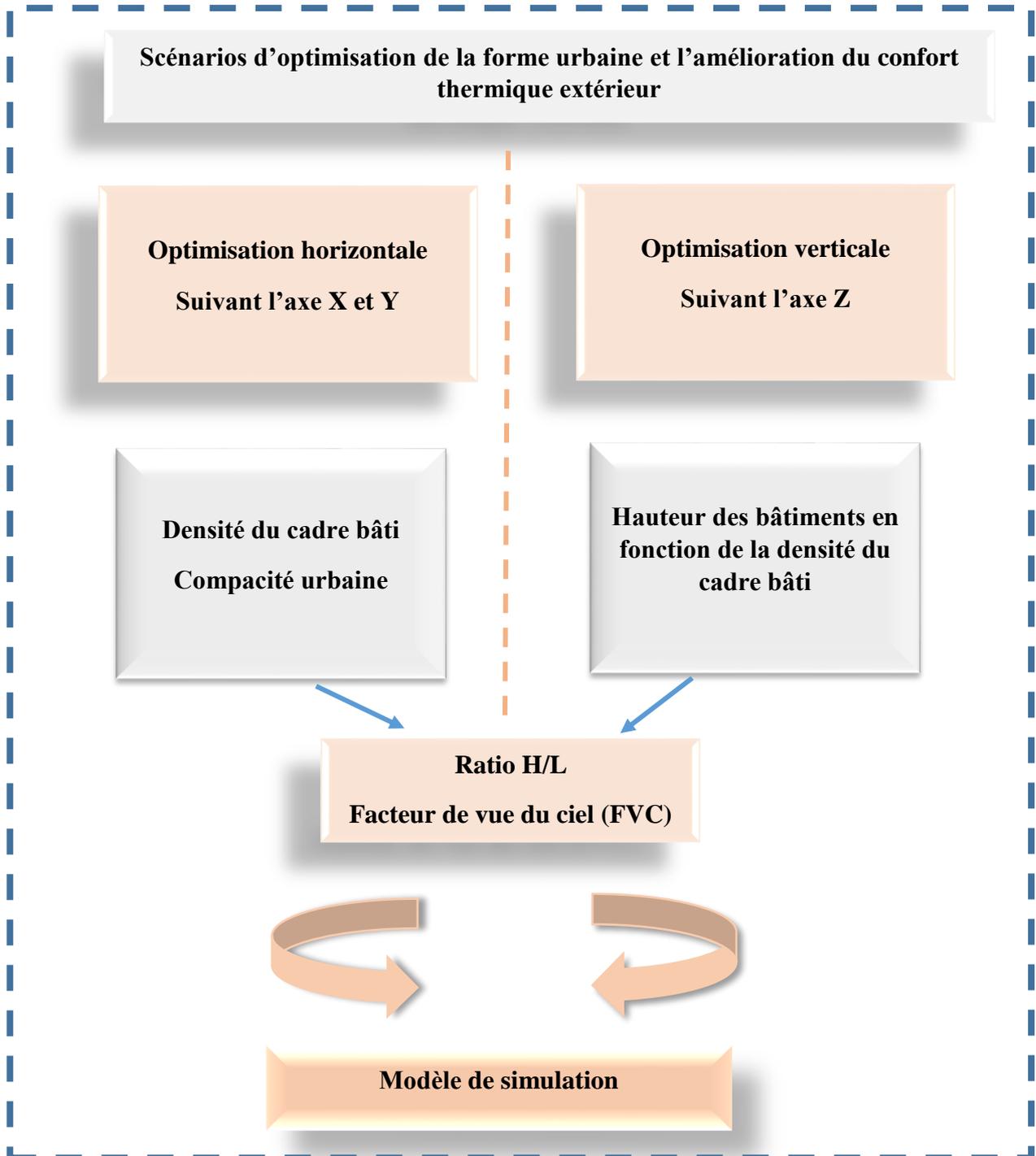


Figure VI. 2 : Les étapes de création du modèle de simulation. (Source : Auteure, 2021)

VI.3. Etudier l'impact de la densité et de la hauteur du cadre bâti sur les indicateurs géométriques, les paramètres climatiques et les indices du confort thermique extérieur

Afin de tester l'impact de la densification urbaine, de la compacité de l'environnement bâti et de la hauteur des édifices sur les paramètres microclimatiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, température moyenne radiante, et rayonnement solaire direct) ainsi que sur les indices thermiques (le PMV, le PET et l'UTCI), l'optimisation des espaces publics de notre quartier s'oriente principalement sur deux axes d'intervention. Le premier axe consiste à augmenter la densité urbaine et la compacité du cadre bâti. Le deuxième axe d'action vise à modifier la hauteur des constructions, tout en préservant les caractéristiques d'aménagement de l'environnement actuel. La présente étude analyse l'effet de ces mesures sur les conditions thermiques et microclimatiques du quartier en utilisant une approche scientifique rigoureuse.

Les différents traitements d'aménagement du quartier 500 logements sont opérés en deux phases comme suit:

- **La première phase d'amélioration** : Cette étape concerne les aménagements prévus qui ont pour but d'apporter des modifications à la densité et à la compacité de la structure bâtie dans les dimensions horizontales X et Y. Ces aménagements sont réalisés en agissant sur deux facteurs principaux : le taux d'occupation du sol (CES brut) et le coefficient de forme (Cf). Des scénarios de simulation sont créés à partir du CES brut, qui est déterminé par un taux d'augmentation de 17%. Par conséquent, les 04 scénarios suivants sont établis : cas 17%, cas 34%, cas 51%, et cas 68%.
- **La deuxième phase d'amélioration** : Les aménagements envisagés sont axés sur une intervention verticale selon l'axe Z, impliquant une augmentation de la hauteur des constructions existantes en fonction du niveau de densité du cadre bâti. Cette stratégie de densification cherche à optimiser l'utilisation de l'espace urbain tout en réduisant l'emprise au sol des constructions.

On aura donc pratiquement 12 scénarios dans cette phase d'amélioration développés sur la base de la hauteur initiale des constructions, fixée à 15m. En multipliant cette valeur à chaque étape jusqu'à atteindre 60m comme hauteur maximale, on obtient donc les cas suivants :

- Cas de densité 17% : hauteur de base 15 m, hauteur 30 m, hauteur 45 m, et hauteur 60 m.
- Cas de densité 34% : hauteur de base 15 m, hauteur 30 m, hauteur 45 m, et hauteur 60 m.
- Cas de densité 51% : hauteur de base 15 m, hauteur 30 m, hauteur 45 m, et hauteur 60 m.
- Cas de densité 68% : hauteur de base 15 m, hauteur 30 m, hauteur 45 m, et hauteur 60 m.

Cela nous donne un total de seize scénarios, qui correspondent à seize plans d'aménagement qui ont été retenus pour souligner l'impact de cette densification.

VI.3.1. Présentation des différents scénarios réalisés

L'optimisation sera réalisée à deux échelles : l'échelle horizontale selon les axes X et Y, et l'échelle verticale selon l'axe Z :

VI.3.1.1. Les scénarios de l'optimisation selon l'échelle horizontale (X et Y)

- Scénario cas de densité de 17% hauteur 15m : (cas réel)
- Scénario cas de densité de 34% hauteur 15m
- Scénario cas de densité de 51% hauteur 15m
- Scénario cas de densité de 68% hauteur 15m

VI.3.1.2. Les scénarios de l'optimisation selon l'échelle verticale (Z)

Cas de densité de 17%

- Scénario cas de densité de 17% hauteur 30m
- Scénario cas de densité de 17% hauteur 45m
- Scénario cas de densité de 17% hauteur 60m

Cas de densité de 34%

- Scénario cas de densité de 34% hauteur 30m
- Scénario cas de densité de 34% hauteur 45m
- Scénario cas de densité de 34% hauteur 60m

Cas de densité de 51%

- Scénario cas de densité de 51% hauteur 30m
- Scénario cas de densité de 51% hauteur 45m
- Scénario cas de densité de 51% hauteur 60m

Cas de densité de 68%

- Scénario cas de densité de 68% hauteur 30m
- Scénario cas de densité de 68% hauteur 45m
- Scénario cas de densité de 68% hauteur 60m

Les scénarios de modélisation sont présentés en format 2D et 3D comme suit :

VI.3.2. L'optimisation de la forme urbaine suivant l'échelle horizontale (X et Y)

L'objectif de cette étude paramétrique est d'examiner l'impact de la hausse du degré de la densité construite dans le quartier 500 logements sur les indicateurs géométriques de base (H/L et FVC), sur la régulation des conditions microclimatiques ainsi que sur le confort thermique des espaces extérieurs. Cette étude examine différentes densités, allant d'une faible densité avec un CES brut de 0.17 à une densité très dense avec un CES brut égale à 0.68, tout en passant par des densités moyennes et denses de 0.34 et 0.51 respectivement.

➤ **Cas de densité 17% hauteur 15m : cas de base (réel)**

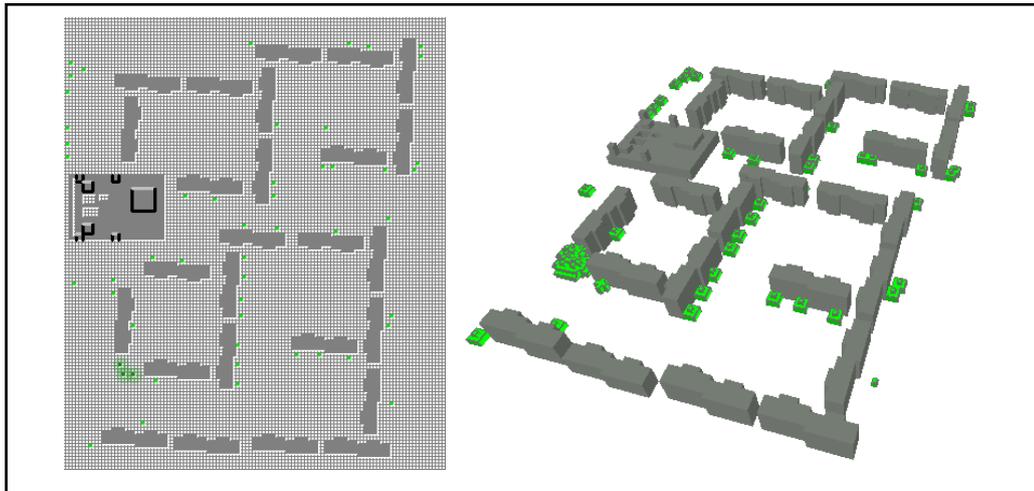


Figure VI. 3: Scénario Cas de base 17% (Source : Auteure)

➤ **Cas de densité 34% hauteur 15m**

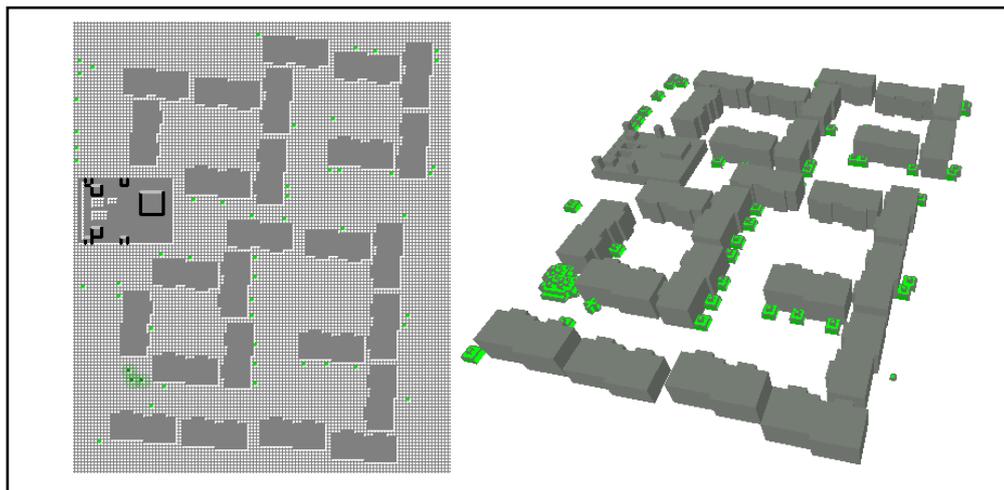


Figure VI. 4 : Scénario (a) cas de 34% (source : Auteure)

➤ **Cas de densité de 51% hauteur 15m**

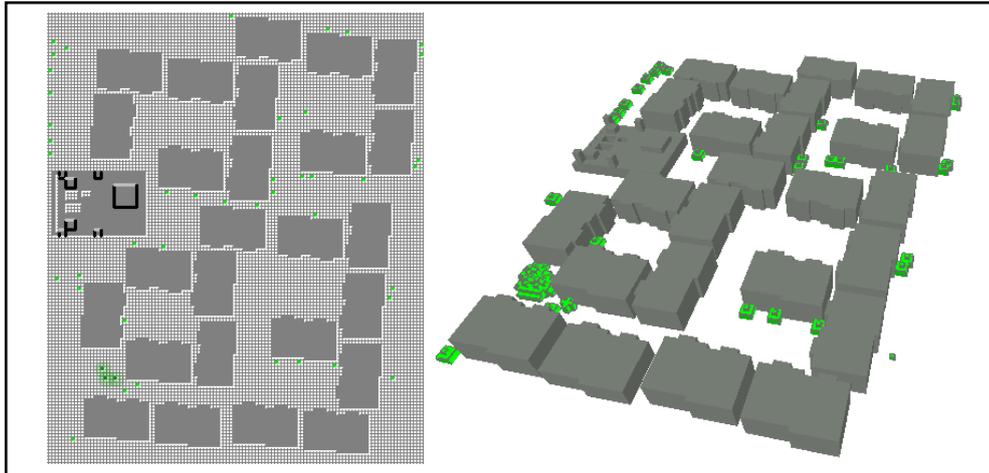


Figure VI. 5 : Scénario (b) cas de 51% (Source : Auteure)

➤ **Cas de densité 68% hauteur 15m**

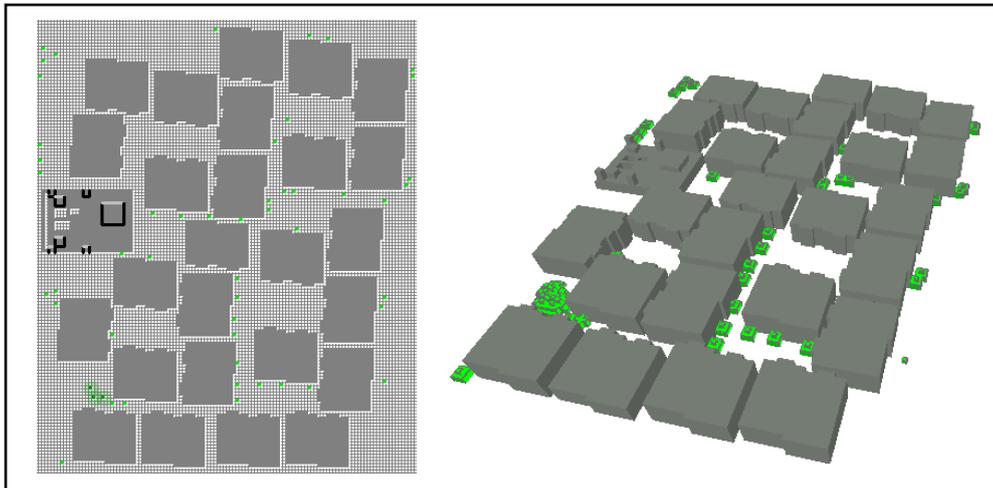


Figure VI. 6 : Scénario (c) cas de 68% (Source : Auteure)

VI.3.3. Optimisation selon l'échelle verticale (Z)

L'optimisation suivant l'échelle verticale (Z) consiste à prendre en considération l'effet combiné de la densité surfacique et de la hauteur des constructions. L'augmentation de la hauteur des constructions peut être considérée comme une densification verticale du cadre bâti, visant à exploiter plus efficacement l'espace disponible en hauteur.

➤ Cas de densité 17%

Scénario N°01 cas de densité 17 hauteur 30m

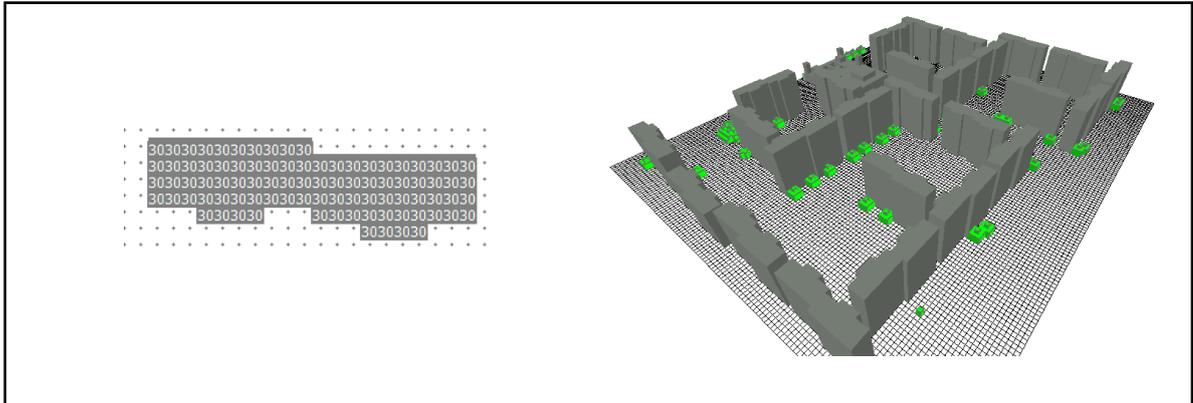


Figure VI. 7 : Scénario N°01 cas de densité 17% hauteur 30m (Source : Auteure)

Scénario N° 02 cas de densité 17% hauteur 45m

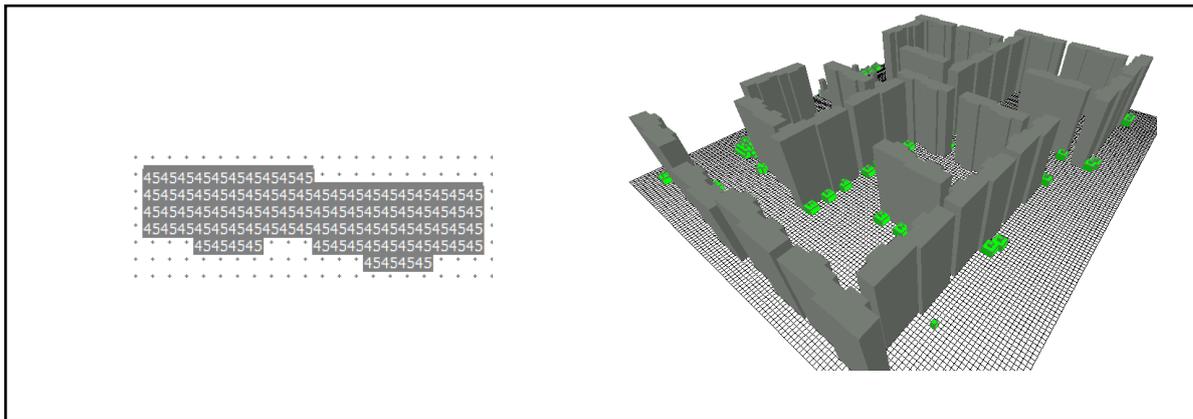


Figure VI. 8 : Scénario N°02 cas de densité 17% hauteur 45m (Source : Auteure)

Scénario N° 03 cas de densité 17% hauteur 60m

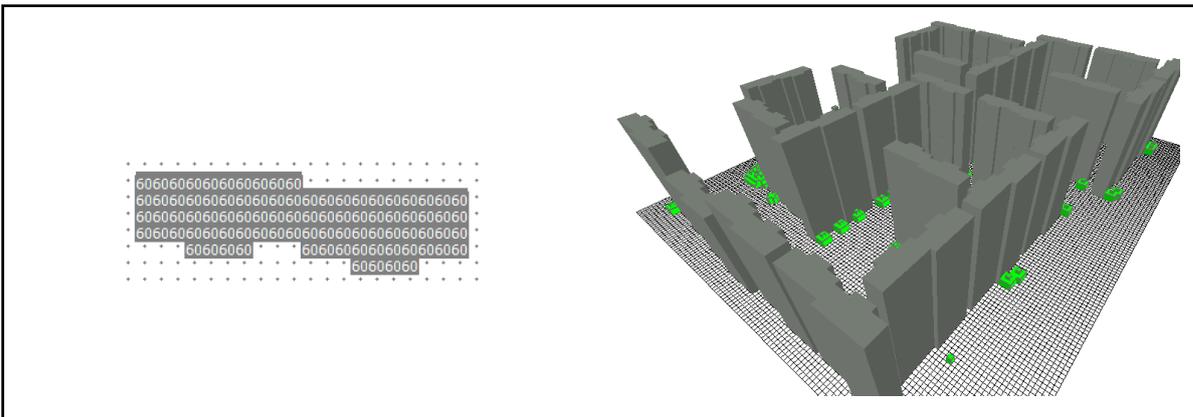


Figure VI. 9 : Scénario N°03 cas de densité 17% hauteur 60m (Source : Auteure)

➤ **Cas de densité de 34%**

Scénario N° 04 cas de densité de 34% hauteur 30m

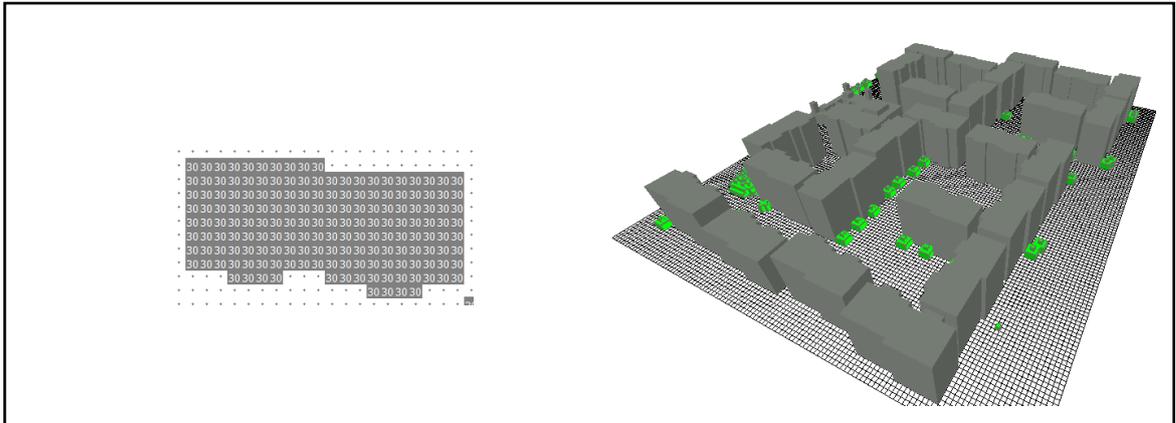


Figure VI. 10 : Scénario N°04 cas de densité 34% hauteur 30m (Source : Auteure)

Scénario N° 05 cas de densité de 34% hauteur 45m

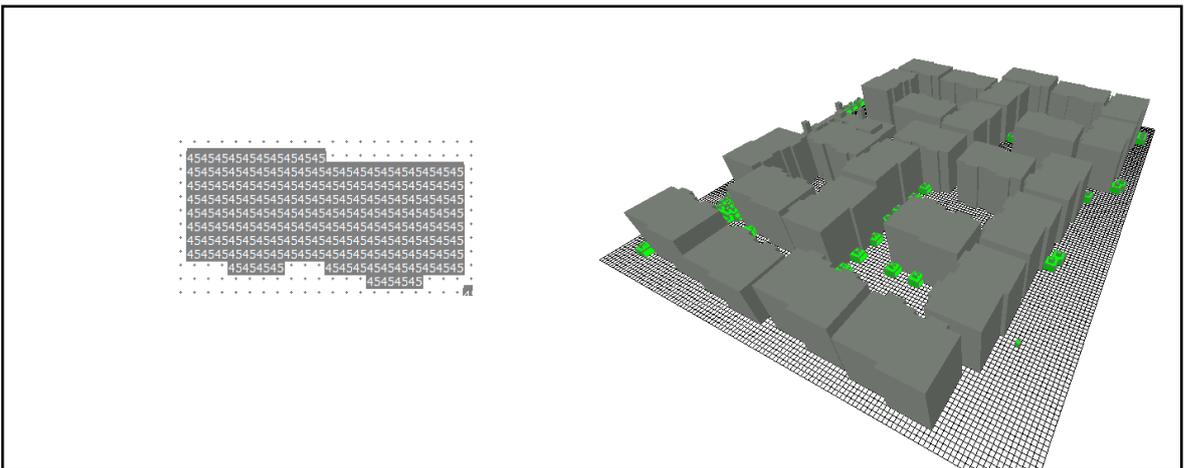


Figure VI. 11 : Scénario N°05 cas de densité 34% hauteur 45m (Source : Auteure)

Scénario N° 06 cas de densité 34% hauteur 60m

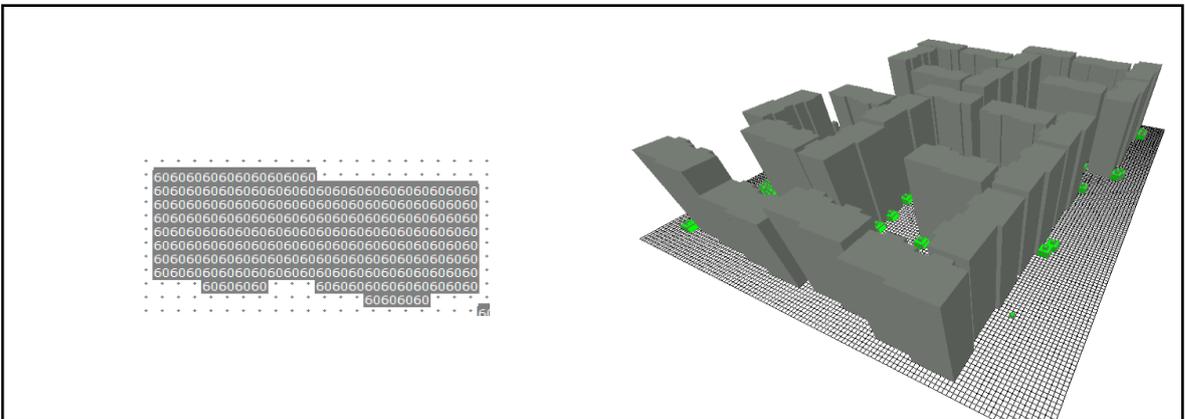


Figure VI. 12 : Scénario N°06 cas de densité 34% hauteur 60m (Source : Auteure)

➤ Cas de densité 51%

Scénario N° 07 cas de densité 51% hauteur 30m

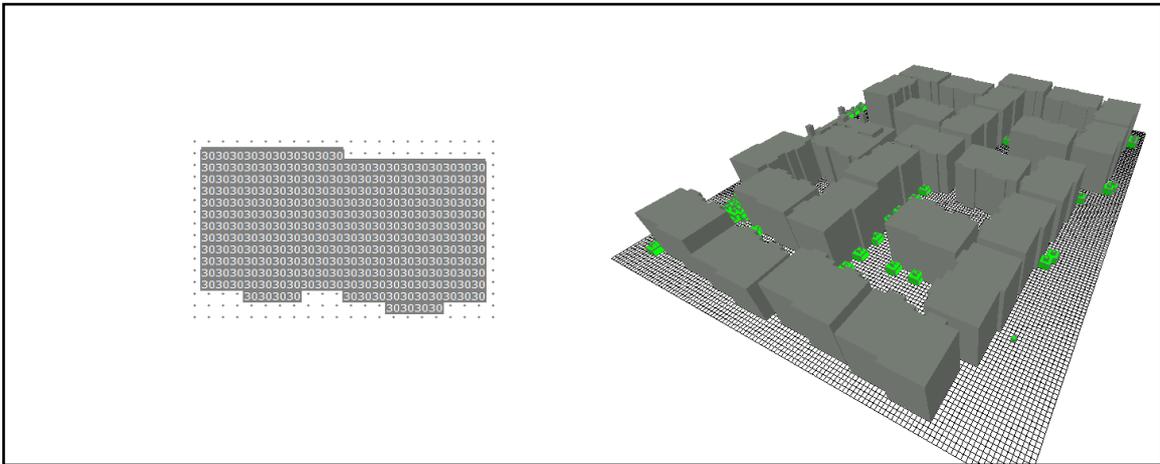


Figure VI. 13 : Scénario N°07 cas de densité 51% hauteur 30m (Source : Auteure)

Scénario N° 08 cas de densité 51% hauteur 45m

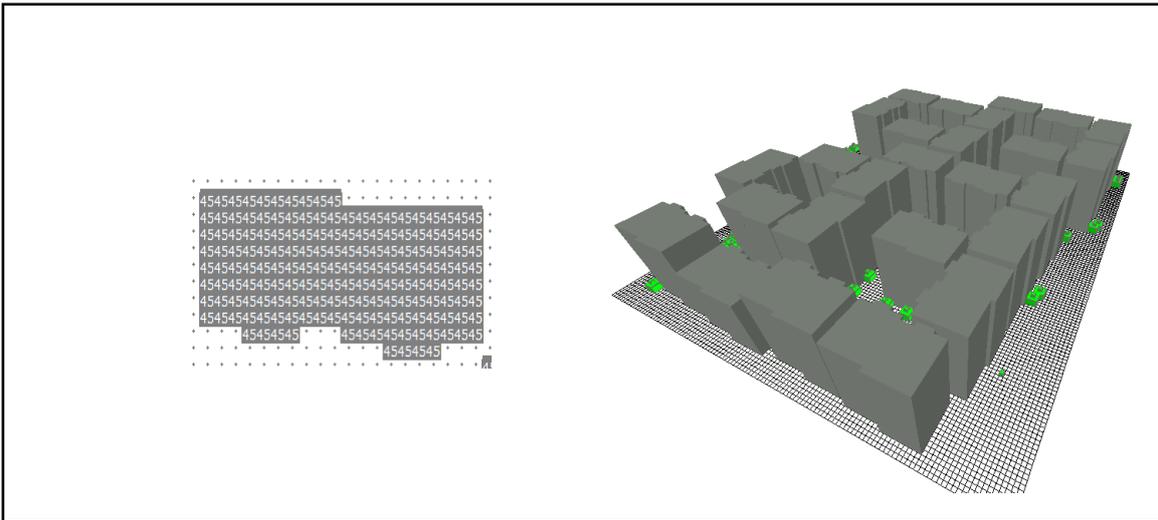


Figure VI. 10: Scénario N°08 cas de densité 51% hauteur 450m (Source : Auteure)

Scénario N° 09 cas de densité 51% hauteur 60m

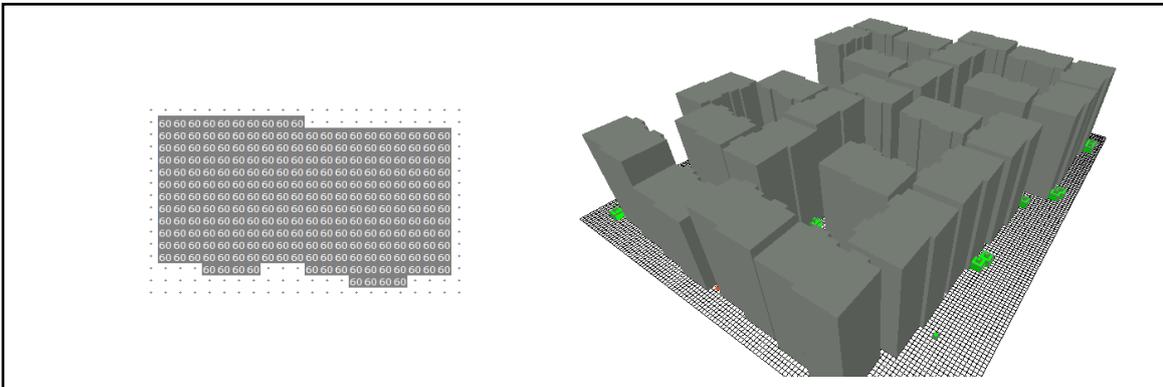


Figure VI. 15 : Scénario N°09 cas de densité 51% hauteur 60m (Source : Auteure)

➤ Cas de densité 68% :

Scénario N° 10 cas de densité 68% hauteur 30m

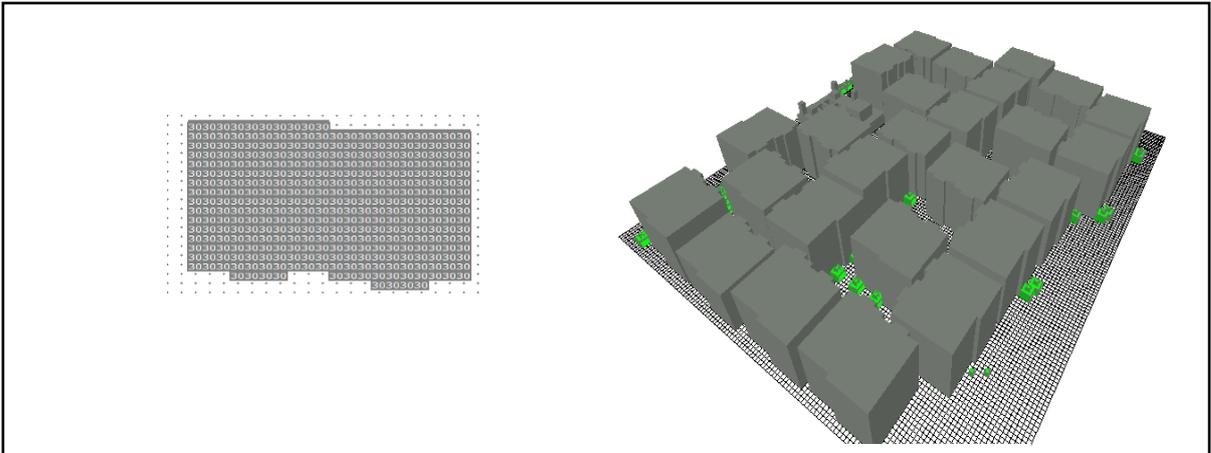


Figure VI. 16 : Scénario N°10 cas de densité 68% hauteur 30m (Source : Auteure)

Scénario N° 11 cas de densité 68% hauteur 45m

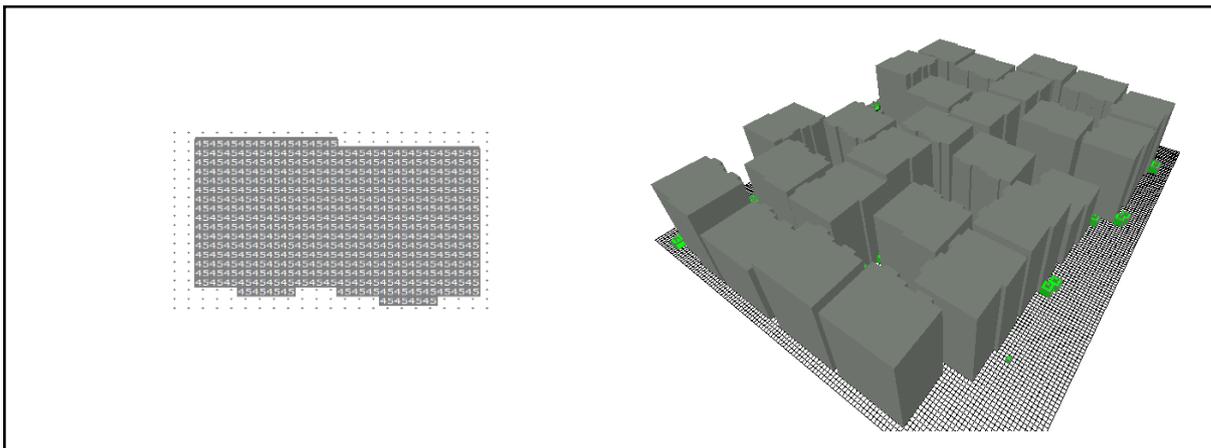


Figure VI. 17 : Scénario N°11 cas de densité 68% hauteur 45m (Source : Auteure)

Scénario N° 12 cas de densité 68% hauteur 60m :

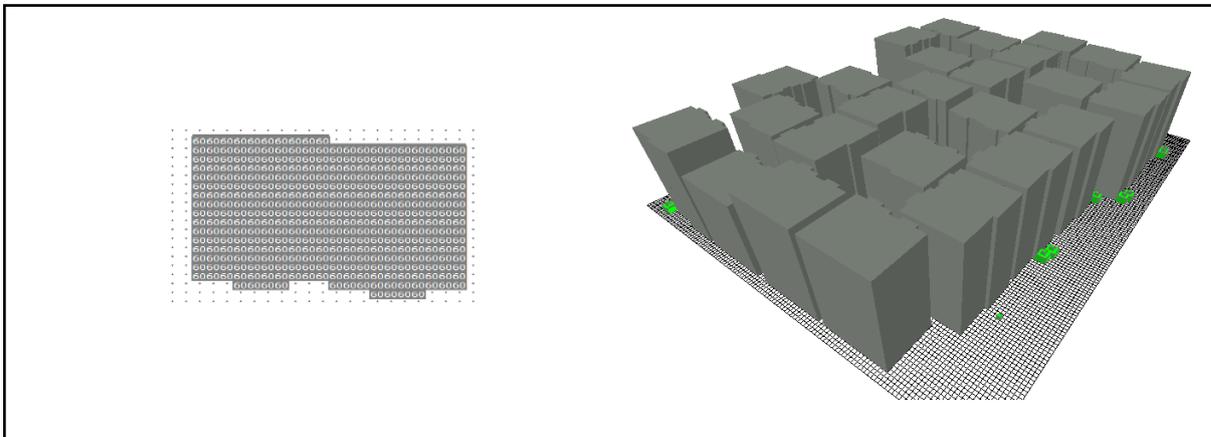


Figure VI. 18 : Scénario N°12 cas de densité 68% hauteur 60m (Source : Auteure)

VI.4. Interprétation des résultats de simulation obtenus

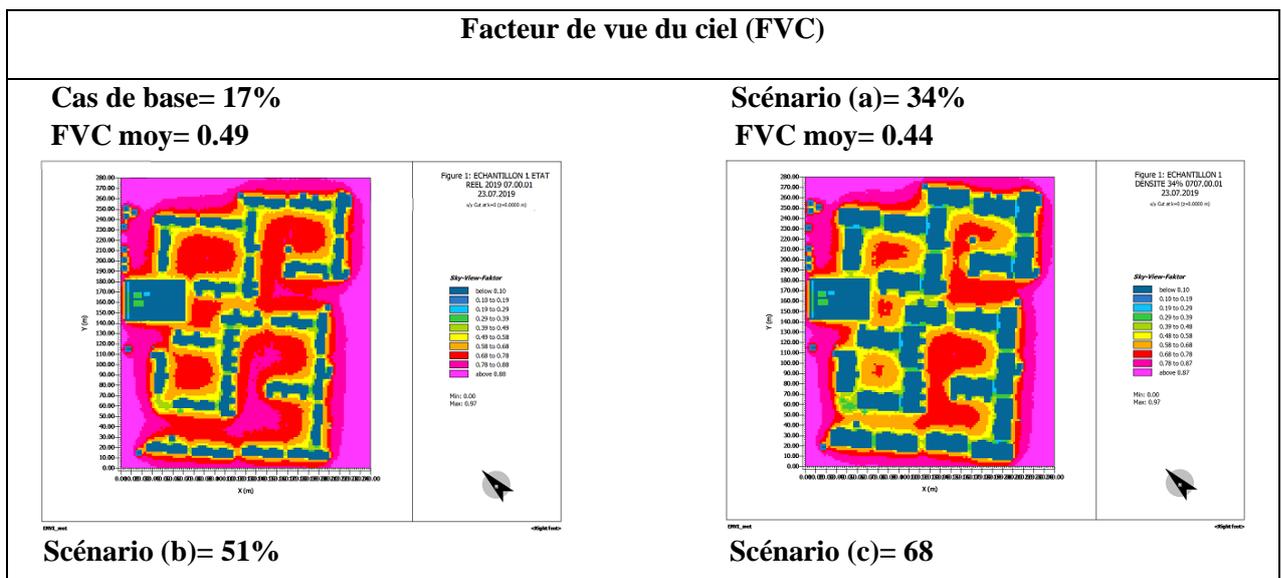
Dans la phase d'interprétation des résultats obtenus à travers la simulation avec le logiciel ENVI-met Pro 4.4.6, il est nécessaire de rappeler que, dans la première phase, nous étudierons l'impact de la densité surfacique du bâti sur les paramètres microclimatiques ainsi que sur le confort thermique des espaces extérieurs. Dans la deuxième phase, nous analyserons l'effet combiné de la densité surfacique et de la hauteur des constructions.

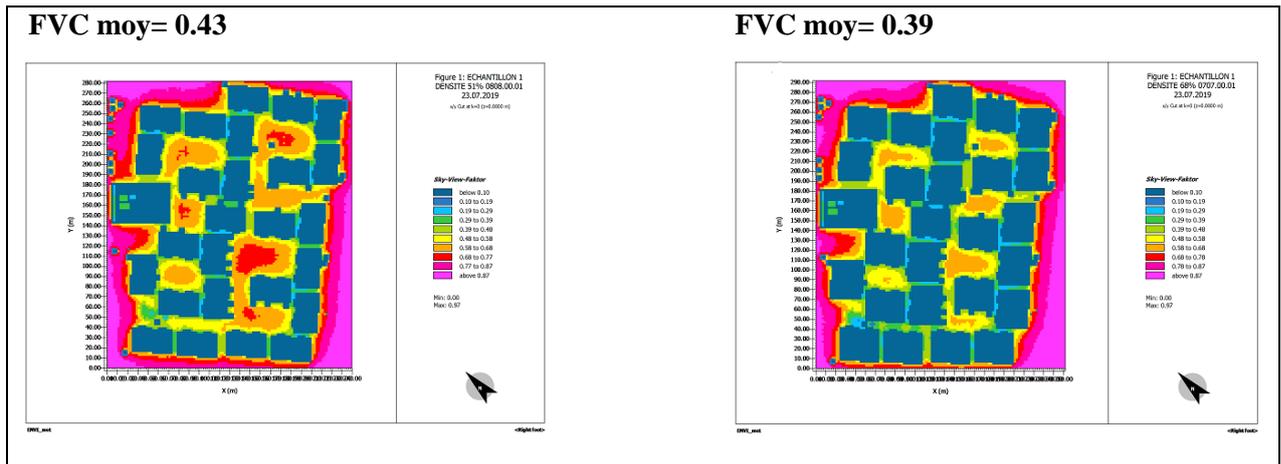
Par ailleurs, des comparaisons seront réalisées entre les différents paramètres microclimatiques de chaque scénario pour les deux parties d'optimisation, notamment la température de l'air (°C), l'humidité relative (%), la vitesse du vent (m/s), la température moyenne radiante (°C), le rayonnement solaire (W/m²), ainsi que les indices de confort thermique (PMV, PET et UTCI). Cette étape permettra de déterminer la meilleure solution d'optimisation, que ce soit dans le plan horizontal ou vertical.

VI.4.1. L'impact de l'effet de la densité surfacique simulée sur les indicateurs géométriques (FVC et le ratio H/L)

Les cartes du FVC pour les quatre scénarios simulés sont présentées dans le tableau (VI.1), présentant différents degrés de densité surfacique. Il en ressort que, pour le cas de base (réel) avec une densité de 17%, le facteur de vue du ciel moyen (FVC) dans l'ensemble du quartier est estimé à 0.49. Alors que, pour le scénario d'une densité de 68%, le facteur de vue du ciel moyen est le plus faible parmi les scénarios simulés, estimé à 0.39.

Tableau VI. 1 : Les valeurs du facteur de vue du ciel en fonction de la densité surfacique pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)





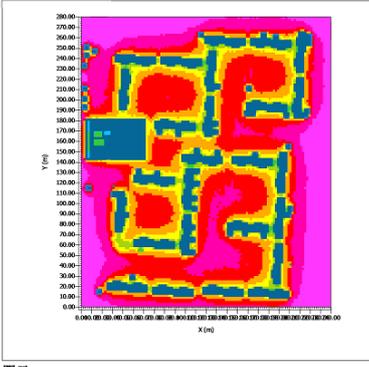
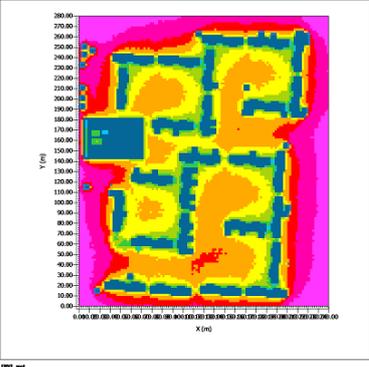
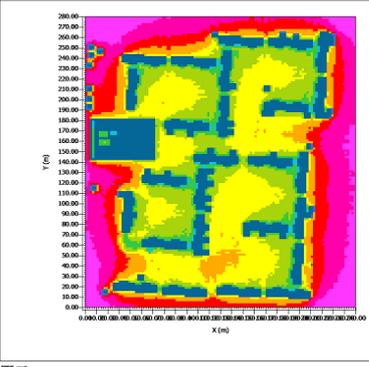
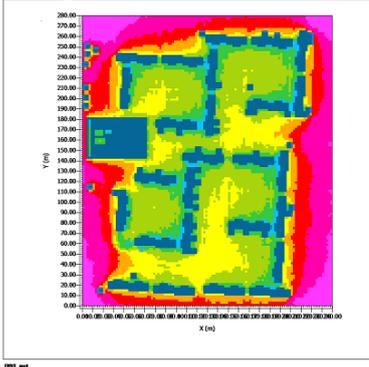
Les résultats de la simulation soulignent la variation des valeurs du facteur de vue du ciel en fonction de la combinaison densité/hauteur. À chaque emplacement analysé, les valeurs du facteur de vue du ciel diminuent à mesure que la hauteur des constructions augmente, avec des moyennes variant selon les différents cas de densité bâtie étudiés :

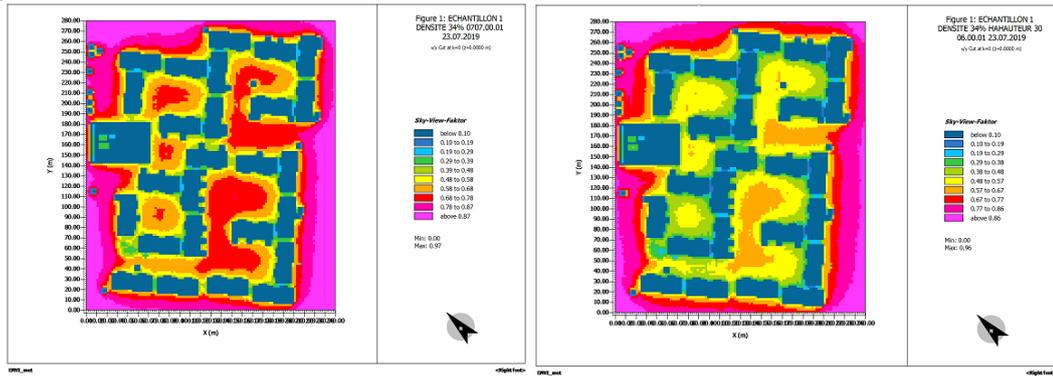
- **Le cas de densité 17% :** pour H= 15m, le FVC moy est de 0.49, pour H= 30m le FVC moy est de 0.44, pour H= 45m, un FVC moy de 0.37, et pour H = 60m un FVC moy est de 0.39.
- **Le cas de densité 34% :** pour H=15m, le FVC moy est de 0.44, pour H=30m le FVC moy est de 0.39, pour H= 45m le FVC moy est de 0.33, et pour H=60m le FVC moy est de 0.28.
- **Le cas de densité 51% :** pour H= 15m le FVC moy est de 0.43, pour H= 30m le FVC moy est de 0.33, pour H= 45m le FVC moy est de 0.32, pour H= 60m le FVC moy est de 0.27.
- **Le cas de densité 68% :** pour H= 15m le FVC moy est de 0.39, pour H=30m le FVC moy est de 0.33, pour H= 45m le FVC moy est de 0.28, et pour H= 60m le FVC moy est de 0.23.

VI.4.2. L'impact de l'effet combiné de la densité surfacique et de la hauteur des constructions simulées sur les indicateurs géométriques (FVC et ratio H/L)

Le tableau (VI.2) présenté ci-dessous résume les différents scénarios issus de la combinaison de l'augmentation de la hauteur (H) et de la densité surfacique bâtie. Ce couplage offre un nombre important de possibilités en matière d'aménagement urbain (12 scénarios au total).

Tableau VI. 2 : Les valeurs de FVC dans chaque scénario de simulation. (Source : Auteure, 2021)

Scénario cas de base 17%, scénarios N°01, N°02, et N°03			
Les cartes du FVC pour les quatre scénarios simulés			
Scénario cas de base : H = 15 m	Scénario N°01 : H = 30 m		
FVC moy = 0.49	FVC moy = 0.44		
			
Scénario N°02 : H = 45 m	Scénario N°03 : H = 60 m		
FVC moy = 0.37	FVC moy = 0.32		
Scénario (a) 34%, scénarios : N°04, N°05, et N°06			
Les cartes du FVC pour les quatre scénarios simulés			
Scénario (a) 34% : H = 15 m	Scénario N°04 : H = 30 m		
FVC moy = 0.44	FVC moy = 0.39		

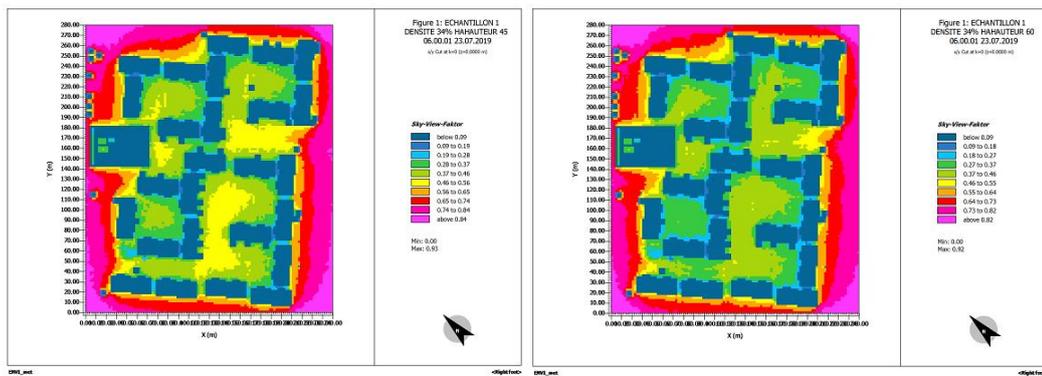


Scénario N°05 : H = 45 m

FVC moy = 0.33

Scénario N°06 : H = 60 m

FVC moy = 0.28



Scénario (b) 51%, scénarios N°07, N°08, et N°09

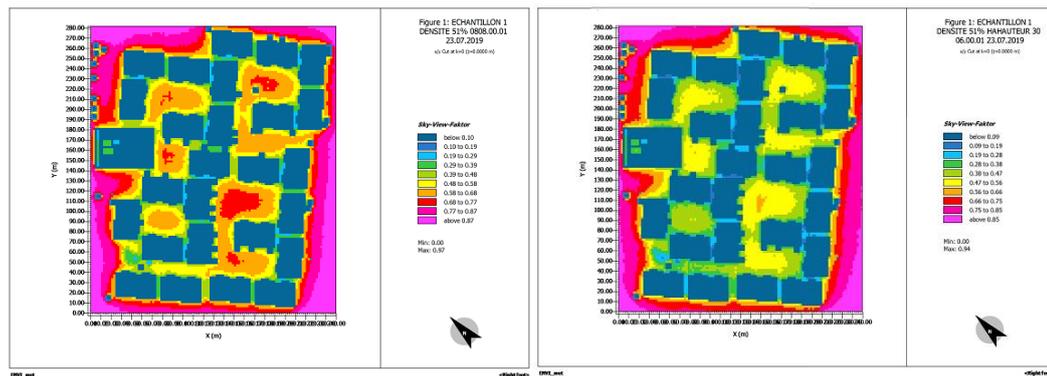
Les cartes du FVC pour les quatre scénarios simulés

Scénario (b) 51%: H = 15 m

FVC moy = 0.43

Scénario N°07 : H = 30 m

FVC moy = 0.33

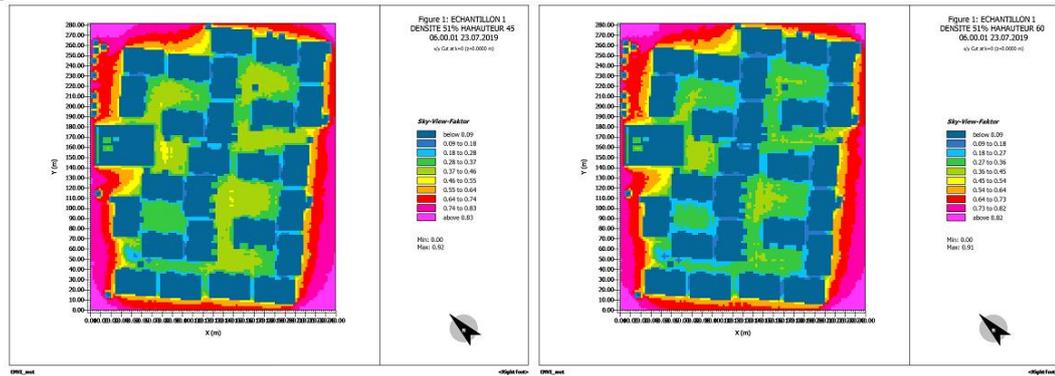


Scénario N°08 : H = 45 m

FVC moy = 0.32

Scénario N°09 : H = 60 m

FVC moy = 0.27

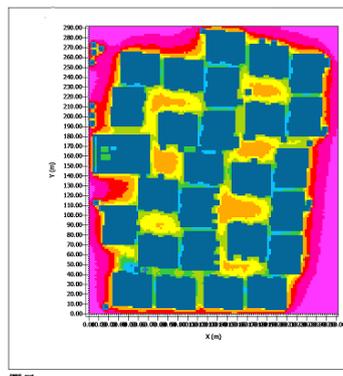


Scénario (c) 68%, scénarios N°10, N°11, et N°12

Les cartes du FVC pour les quatre scénarios simulés

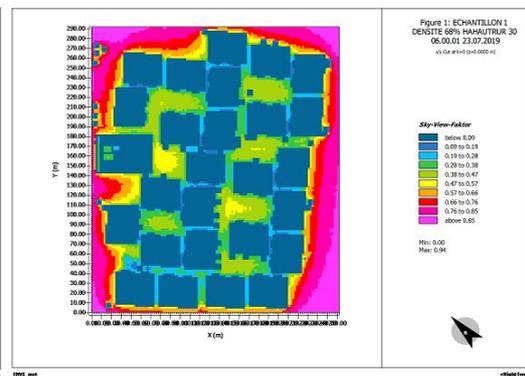
Scénario (c) 68% : H = 15 m

FVC moy = 0.39



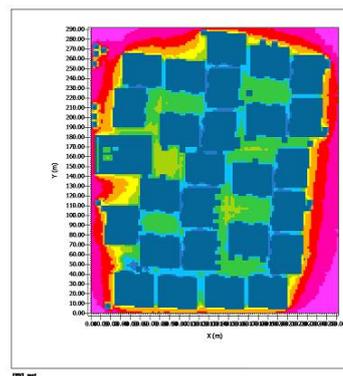
Scénario N° 10 : H = 30 m

FVC moy = 0.33



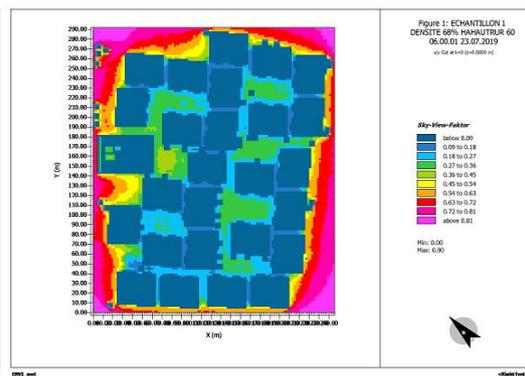
Scénario N°11 : H = 45 m

FVC moy = 0.28



Scénario N°12 : H = 60 m

FVC moy = 0.23



VI.4.3. Le cas de l'effet de la densité surfacique

Le tableau (VI.3) ci-dessous montre une cohérence logique entre les indicateurs morphologiques et géométriques. En effet, l'élévation de la densité surfacique bâtie se traduit par une élévation de la surface construite des édifices, ce qui influence la compacité du bâti en

fonction de la variable de surface et de volume. En d'autres termes, plus la surface bâtie (S) est importante, plus le coefficient de forme (Cf) se rapproche de 0, induisant ainsi une compacité élevée du cadre bâti.

Avec :

Densité surfacique (**Ds**) = Surface construite (**S**) / Surface urbaine totale (**St**)

$$Ds = \frac{S}{St} \quad (VI.1)$$

Compacité = Coefficient de forme (**Cf**) = Surface totale d'enveloppe (**Sd**) / Volume d'enveloppe (**V**)

$$Cf = \frac{Sd}{V} \quad (VI.2)$$

Où :

Volume (**V**) = Surface construite (**S**) x Hauteur (**H**)

$$V = \frac{S}{H} \quad (VI.3)$$

Surface construite (**S**) = Volume construit (**V**) / Hauteur (**H**)

$$S = \frac{V}{H} \quad (VI.4)$$

On peut donc écrire la densité en fonction du volume et la hauteur :

Densité surfacique (**Ds**) = [(Volume construit (**V**) / Hauteur (**H**)] / Surface urbaine totale (**St**)

$$Ds = \frac{V}{H \times St} \quad (VI.5)$$

Comme on peut l'écrire en fonction de la compacité urbaine :

Densité surfacique (**Ds**) = (Surface totale d'enveloppe (**Sd**)) / [(Coefficient de forme (**Cf**) x Hauteur (**H**) x Surface totale (**St**)]

$$Ds = \frac{Sd}{[Cf \times (H \times St)]} \quad (VI.5)$$

Comme on peut également exprimer la compacité en fonction de la densité surfacique bâtie :

Coefficient de forme (**Cf**) = Surface totale d'enveloppe (**Sd**) / [(densité surfacique (**Ds**) x surface urbaine totale (**St**)) x Hauteur (**H**)]

$$Cf = \frac{Sd}{[(Ds \times St) \times H]} \quad (VI.6)$$

Donc les variables surface (S), volume (V), et Hauteur (H) sont les paramètres communs entre la densité surfacique et la compacité du bâti.

Les valeurs des divers profils H/L sont directement liées à ces variables, car plus la surface bâtie est élevée, plus la largeur (L), limitée par le bâti de part et d'autre, devient réduite. Donc, les valeurs du FVC et du rapport H/L sont inversement proportionnelles, dont la surélévation du ratio H/L implique une diminution du facteur de vue du ciel (FVC), et vice versa.

VI.4.4. Le cas de l'effet combiné de la hauteur en fonction de la densité surfacique

D'après le tableau (VI.3) et le graphe (VI.1), il existe une corrélation étroite entre la densité surfacique bâtie et la compacité urbaine qui est un coefficient mesurant le ratio entre la surface et le volume total des enveloppes pour chaque scénario simulé. En effet, plus la densité surfacique bâtie est élevée, plus le coefficient de forme (Cf) diminue. Autrement dit, une densité surfacique élevée entraîne une augmentation de la taille et le volume des bâtiments, et donc une forme plus compacte caractérisée d'un faible coefficient de forme (Cf). Cette compacité a également des impacts positifs sur le confort intérieur des bâtiments.

La hauteur des constructions a également un rôle dans la détermination du ratio H/L et du facteur de vue du ciel (FVC). En effet, en modifiant uniquement la hauteur, on exerce une influence sur la dimension verticale du bâtiment sans affecter la surface bâtie horizontale. Ainsi, pour une densité urbaine très faible, il est possible d'obtenir des valeurs élevées du ratio H/L et des valeurs basses du facteur de vue du ciel (FVC).

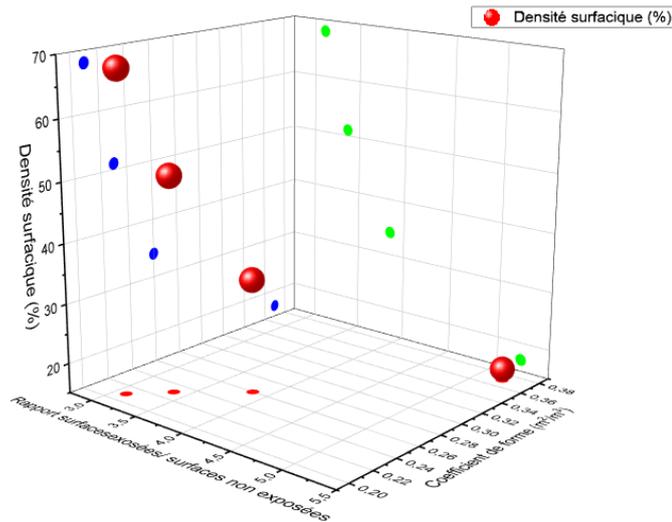
Toutefois, lorsque la densité surfacique et la hauteur augmentent simultanément, on observe des variations des valeurs du ratio H/L et du facteur de vue du ciel (FVC). Il convient de noter qu'à partir d'une densité de 50%, les valeurs du facteur de vue du ciel (FVC) varient très légèrement marquant des valeurs rapprochées.

Le tableau ci-dessous présente les différentes valeurs pour les différents scénarios simulés (Annexe 03) :

Tableau VI. 3 : Les indicateurs morphologiques et géométriques pour différents scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

Densité	Coefficient de forme	Surfaces exposées/ surfaces non exposées	Hauteur
17%	0.37	5.23	15 m
17%	0.35	9.33	30 m
17%	0.34	13.51	45 m
17%	0.34	17.69	60 m
34%	0.26	3.85	15 m
34%	0.24	6.66	30 m
34%	0.23	9.50	45 m
34%	0.22	12.34	60 m
51%	0.23	3.37	15 m
51%	0.20	5.67	30 m
51%	0.19	8.02	45 m
51%	0.18	10.30	60 m
68%	0.21	3.11	15 m
68%	0.18	5.16	30 m
68%	0.17	7.25	45 m
68%	0.16	9.30	60 m

Ces résultats confirment que les tissus denses et compacts influent directement sur les indicateurs géométriques au niveau du tissu urbain. La diminution du rapport H/L explique l'éclatement du site ainsi que son exposition au soleil. En revanche, son augmentation réduit considérablement les surfaces urbaines (façades et sols) exposées aux irradiations solaires, en les rendant de plus en plus isolées en termes d'échange de chaleur avec l'atmosphère (Boukhelkhal et Bourbia, 2016, Maurus Baruti et al., 2019).

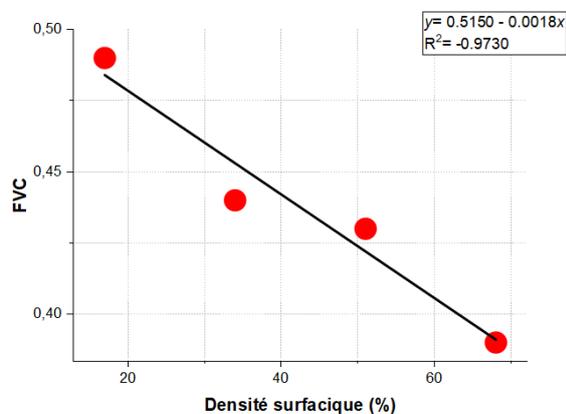


Graph VI. 1 : Corrélation entre la densité surfacique et la compacité urbaine (coefficient de forme, et rapport surfaces exposées/ surfaces non exposées). (Source : Auteure, 2021)

VI.5. Corrélation de la densité surfacique et les indicateurs géométriques (FVC, et H/L)

Le graphe (VI.2) montre une corrélation négative extrêmement forte entre la densité de la surface bâtie et le facteur de vue du ciel (FVC), pour les quatre scénarios élaborés (scénario cas de référence (réel), scénario (a), scénario (b) et scénario (c)), avec un coefficient de Pearson $R^2 = -0.973$. Cette corrélation robuste permet de démontrer une relation inverse entre le facteur de vue du ciel (FVC) et le rapport H/L.

La densité surfacique bâtie représente une extension horizontale le long des axes X et Y, ce qui permet essentiellement d’agir sur la variable de largeur (L), limitée par les constructions de part et d’autre. Quand la densité surfacique bâtie est élevée, la largeur entre les constructions devient réduite, provoquant une hausse de la valeur moyenne du rapport H/L au niveau du quartier.



Graph VI. 2 : Corrélation entre la densité surfacique et le facteur de vue du ciel (FVC). (Source : Auteure, 2021)

VI.6. Corrélation de l'effet combiné de la densité surfacique et de la hauteur des constructions

Les graphes (VI.3) ci-dessous montrent les valeurs de corrélation de l'effet de la densité surfacique bâtie associé à celui de la hauteur des constructions sur le facteur de vue du ciel (FVC).

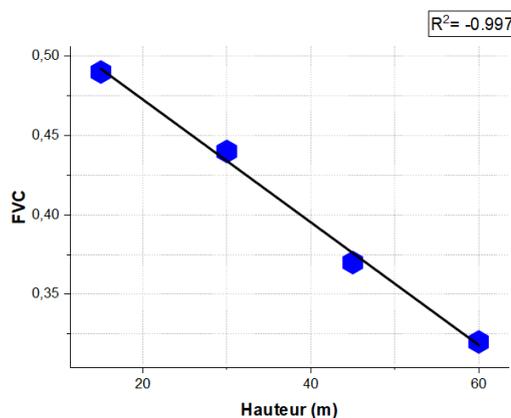
Selon les corrélations, une relation très négative entre la hauteur des constructions et le facteur de vue du ciel (FVC) en fonction de la densité surfacique a été établie. L'élévation de la hauteur pour chaque cas de densité, a entraîné une diminution remarquable des valeurs du facteur de vue du ciel (FVC). Ces corrélations sont représentées par des régressions linéaires avec des coefficients de Pearson $R^2 = -0.997$ pour le cas de la densité 17%, $R^2 = -0.999$ pour le cas de la densité 34%, $R^2 = -0.943$ pour le cas de densité 51%, et enfin $R^2 = -0.998$ pour le cas de densité 68%.

Les valeurs de (FVC) les plus élevées ont été obtenues pour une hauteur de 15m pour les quatre scénarios suivants : le scénario cas de référence 17%, scénario (a) 34%, scénario (b) 51%, et scénario (c) 68%, mais avec des valeurs oscillant de 0.49, 0.44, 0.43, et 0.39 respectivement.

Alors que ses valeurs se dégradent en fonction de la multiplication de la hauteur dans chaque scénario, dont les faibles valeurs ont été obtenues pour le cas de densité 51% et 68% avec des hauteurs qui varient entre 45m et 60m. (Scénario N°08, scénario N°09, Scénario N°11 et scénario N°12).

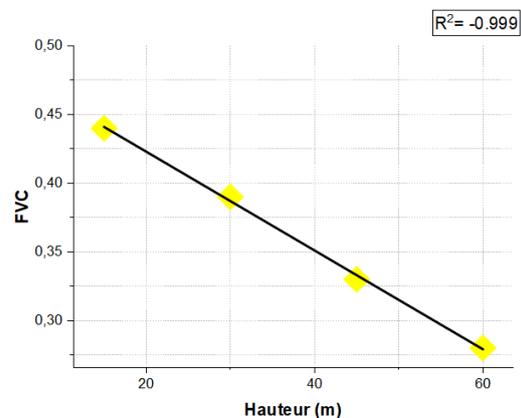
Le cas de densité 17% :

H= 15, 30, 45, 60 m



Le cas de densité 34% :

H= 15, 30, 45, 60 m

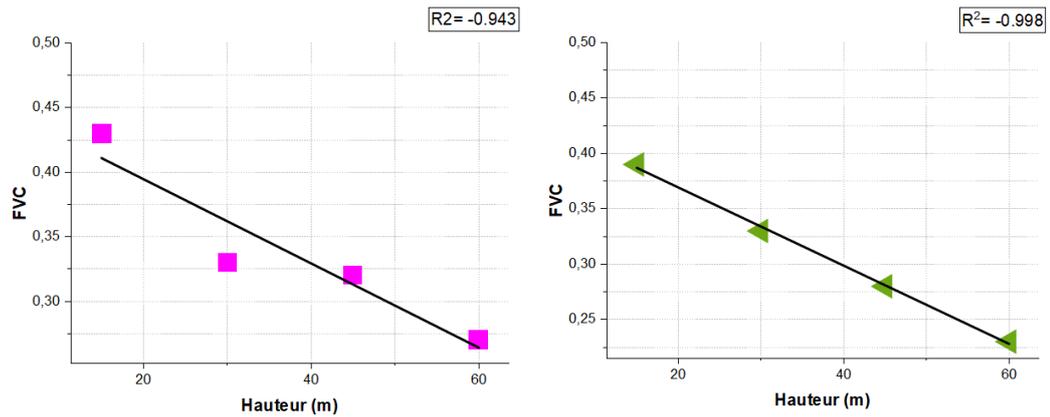


Le cas de densité 51% :

H= 15, 30, 45, 60 m

Le cas de densité 68% :

H= 15, 30, 45, 60 m



Graphes VI. 3 : Corrélation entre la hauteur des constructions et le facteur de vue du ciel (FVC). (Source : (Auteure, 2021))

VI.7. L'influence de la densité surfacique et de la hauteur sur les paramètres microclimatiques

- **Le cas de l'effet de la densité surfacique :** Comparaison des différents paramètres climatiques entre les scénarios : cas de base, scénario (a), scénario (b), et scénario (c).
- **Le cas de l'effet de la hauteur des constructions :** Comparaison des différentes hauteurs pour une densité donnée, suivie d'une analyse comparative pour le cas conjoint de la hauteur et de la densité.

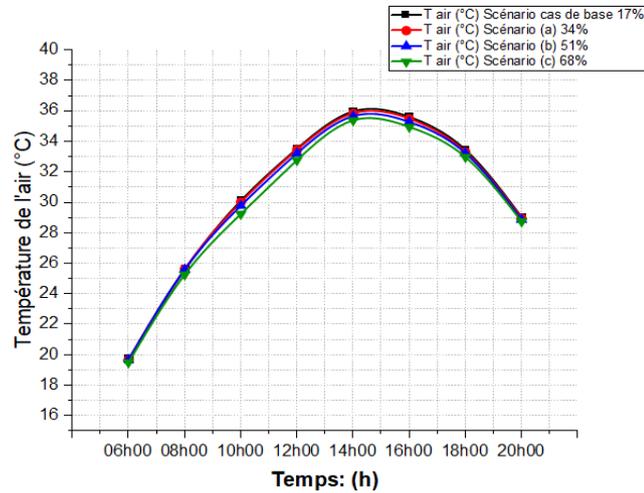
1VI.7.1.1. L'effet de la densité surfacique sur la température de l'air

Les différents scénarios simulés démontrent clairement l'impact de la densité surfacique sur la température de l'air, comme le montre le tableau (VI.4), où certaines distinctions ont été opérées durant les heures de pics de chaleur à 10h00, 12h00, 14h00, et 16h00.

La situation la plus défavorable est observée dans le cas de densité 17% caractérisé par une faible densité surfacique bâtie, alors que la situation la plus favorable est observée dans le cas de densité 68%, qui présente une forte densité surfacique bâtie. Les courbes de température pour des densités 34% et 51% enregistrent des valeurs rapprochées mais qui restent inférieures par rapport au cas réel (17%).

À travers les températures ambiantes moyennes des quatre scénarios, on constate un décroissement significatif des températures durant les heures les plus chaudes de la journée à 10h00, 12h00, 14h00 et 16h00 en fonction des degrés de densité surfacique bâtie, avec des écarts de diminution de l'ordre de : $\Delta T = -0.87^{\circ}\text{C}$ à 10h00, $\Delta T = -0.77^{\circ}\text{C}$ à 12h00, $\Delta T = -0.59^{\circ}\text{C}$ à 14h00, et $\Delta T = -0.66^{\circ}\text{C}$ à 16h00 entre le scénario (c) 68% et le scénario cas de base 17%. Les résultats énoncent que la température diurne est étroitement liée aux zones d'ombre générées par le rapprochement du bâti et à la course du soleil, étant donné que les zones d'ombre tendent à être plus fraîches que les zones exposées au soleil compte tenu de l'effet de l'ombrage

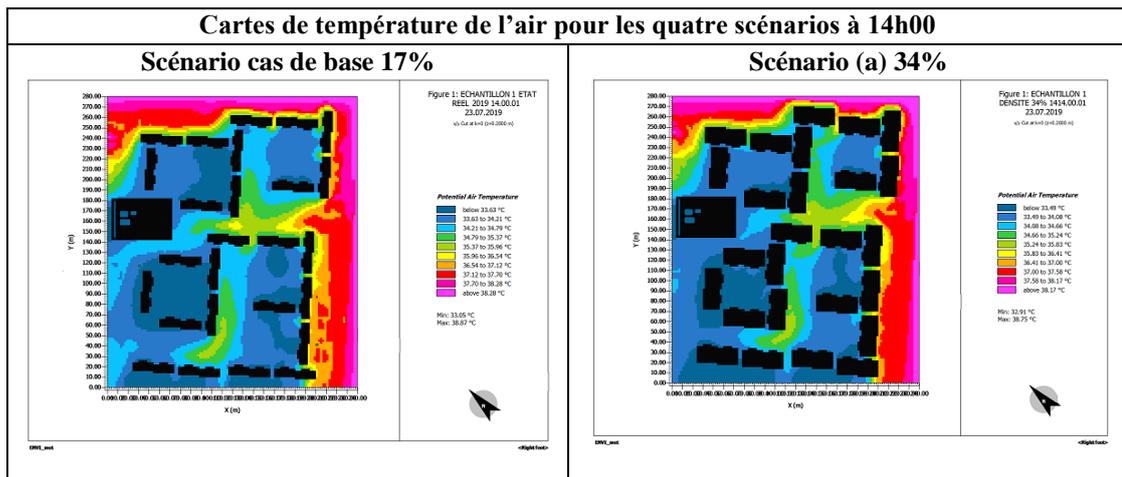
qui bloque une partie de la lumière directe du soleil et agit positivement sur l'atténuation de la chaleur, en réduisant la quantité d'irradiation absorbé et stockée par le sol et les surfaces urbaines. Cela est d'une importance particulière pendant les jours chauds d'été, où les températures élevées peuvent rendre la vie en extérieur inconfortable, voire même dangereuse pour les personnes vulnérables.

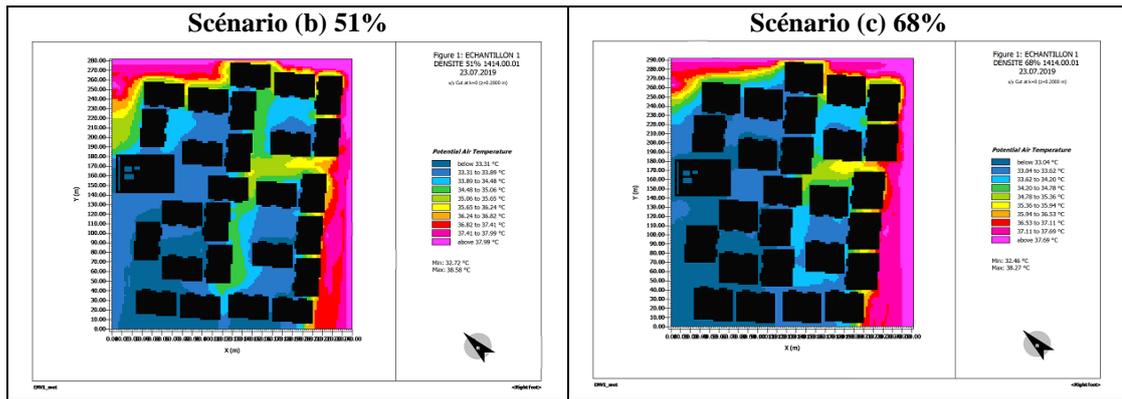


Graph VI.4 : Comparaison entre les températures de l'air moyennes des quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

Les cartes de la répartition spatiale de la température de l'air à 14h00 pour les quatre scénarios simulés de l'effet de la densité surfacique bâtie sont présentées dans le tableau (VI.4) ci-après :

Tableau VI.4 : Cartes des températures de l'air à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)





Cependant, à mesure que la densité du bâti augmente, indiquant une plus grande concentration de surfaces construites dans un espace donné, cela peut influencer la quantité de lumière directe du soleil reçue par les surfaces environnantes et par conséquent, la température de l'air. Plus précisément, avec une densité de bâti élevée, il y a généralement moins d'espaces ouverts ou de zones non construites permettant à la chaleur de s'échapper, entraînant sa rétention (elle sera donc piégée). Les surfaces construites absorbent davantage de rayonnement solaire, ce qui peut augmenter la température de l'air nocturne en restituant lentement la chaleur emmagasinée dans les différentes surfaces sous forme d'ondes infrarouge, ce qui empêche le refroidissement nocturne.

VI.7.1.2. L'effet de la hauteur sur la température de l'air

La hauteur des constructions représente un paramètre critique dans la création de zones ombragées grâce à l'effet d'ombre projeté par les constructions.

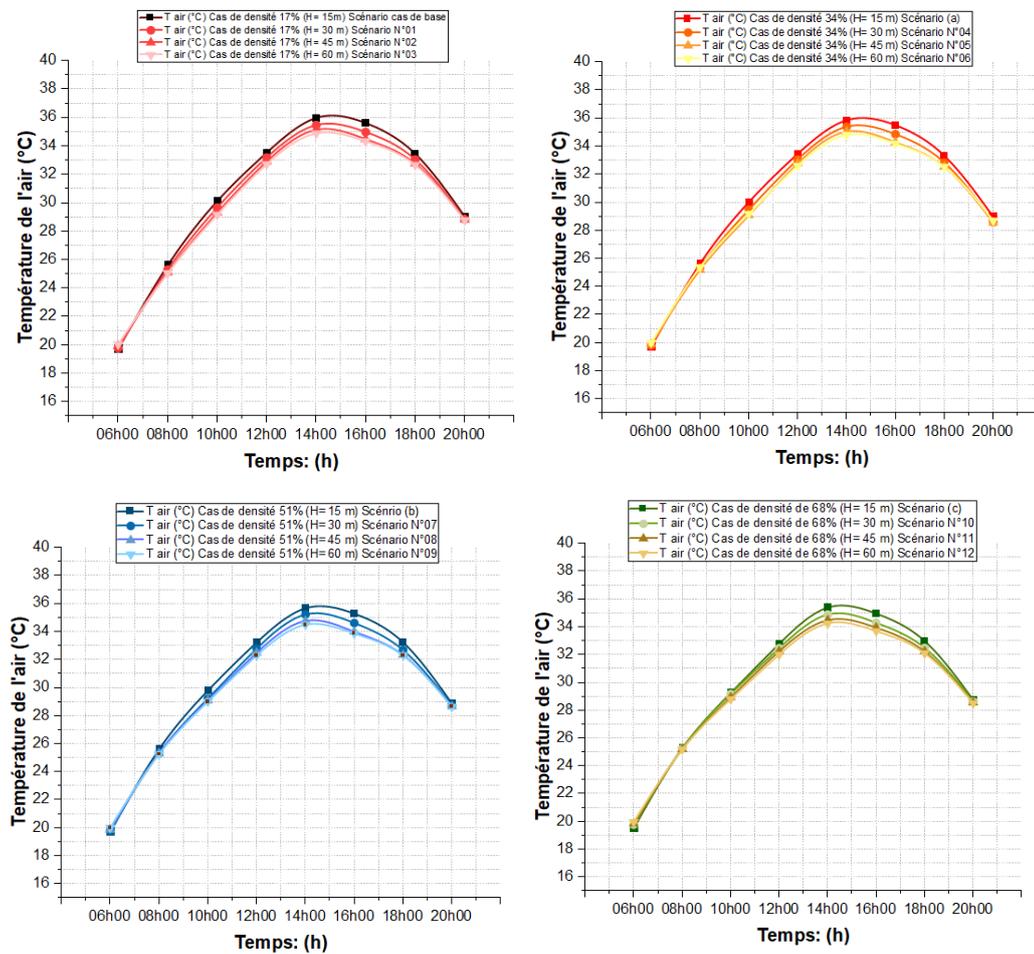
L'influence de la hauteur (H) sur la température de l'air est apparente dans les 12 scénarios simulés, et cela, pour chaque cas de densité surfacique.

Pour le cas de densité 17%, des écarts maximums de diminution des températures à 16h00 ont été obtenus pour les scénarios (N°01 avec H=30m, N°02 avec H=45m et N°03 avec H=60m) et le scénario cas de référence (H=15m) respectivement, avec $\Delta T = -0.63^{\circ}\text{C}$ pour une hauteur de 30m, $\Delta T = -1.13^{\circ}\text{C}$ pour une hauteur de 45m, et un écart $\Delta T = -1.28^{\circ}\text{C}$ pour une hauteur de 60m.

Pour le cas de densité 34%, des écarts de diminution ont été enregistrés entre les scénarios N°04, N°05 et N°06) et le scénario (a) d'une hauteur de 15m respectivement, avec $\Delta T = -0.64^{\circ}\text{C}$ pour une hauteur de 30m, un écart $\Delta T = -1.22^{\circ}\text{C}$ pour une hauteur de 45m, et un écart $\Delta T = -1.31^{\circ}\text{C}$ pour une hauteur de 60m.

Pour le cas de densité de 51%, des écarts de diminution moins importants ont été enregistrés par rapport aux deux cas de densité précédents, avec des écarts $\Delta T = -0.67^\circ\text{C}$ entre le scénario N°07 (H= 30m) et le scénario (b) (H= 15m), $\Delta T = -1.29^\circ\text{C}$ entre le scénario N°08 (H= 45m) et le scénario (b), et un écart $\Delta T = -1.42^\circ\text{C}$ entre le scénario N°09 (H= 60m) et le scénario (b).

Pour le cas de densité de 68%, des écarts de diminution ont été obtenus entre les différents scénarios (scénario N°10 (H= 30m), scénario N°11 (H= 45m), scénario N°12 (H= 60m)) et le scénario (c) (H= 15m) respectivement de : $\Delta T = -0.66^\circ\text{C}$, $\Delta T = -1.01^\circ\text{C}$, et $\Delta T = -1.26^\circ\text{C}$.



Graphe VI. 5 : Comparaisons entre les températures de l’air pour les hauteurs 15m, 30m, 45m, et 60m pour chaque cas de densité surfacique. (Source : Auteure, 2021)

La variation de la température de l’air dans les espaces urbains dépend de plusieurs facteurs, dont la densité et la hauteur des bâtiments. Ces deux paramètres influencent le bilan énergétique des surfaces construites et modifient le microclimat urbain.

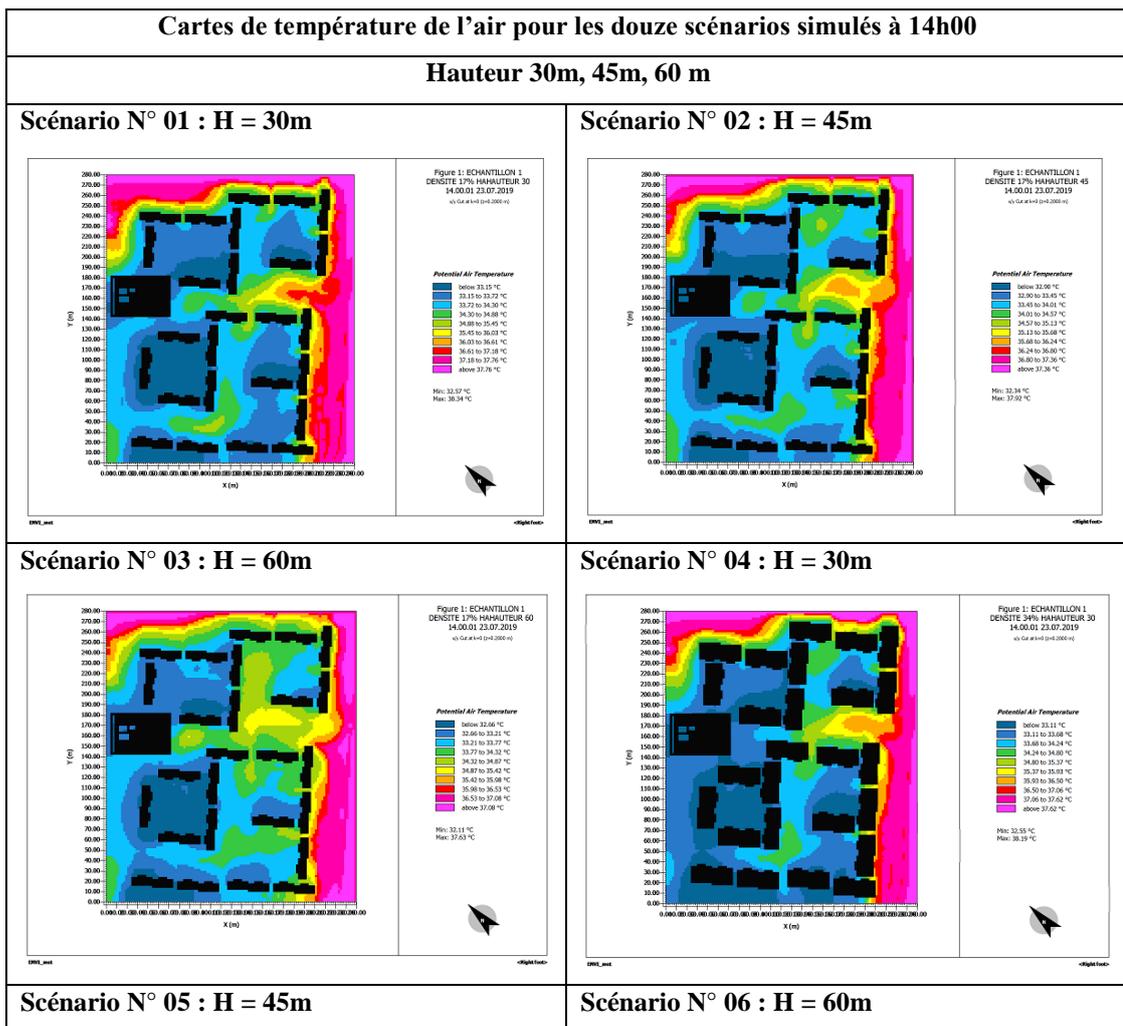
Les résultats montrent que la hauteur des bâtiments a un effet plus marqué que la densité, en créant plus des zones ombragées qui réduisent le rayonnement solaire reçu par les surfaces.

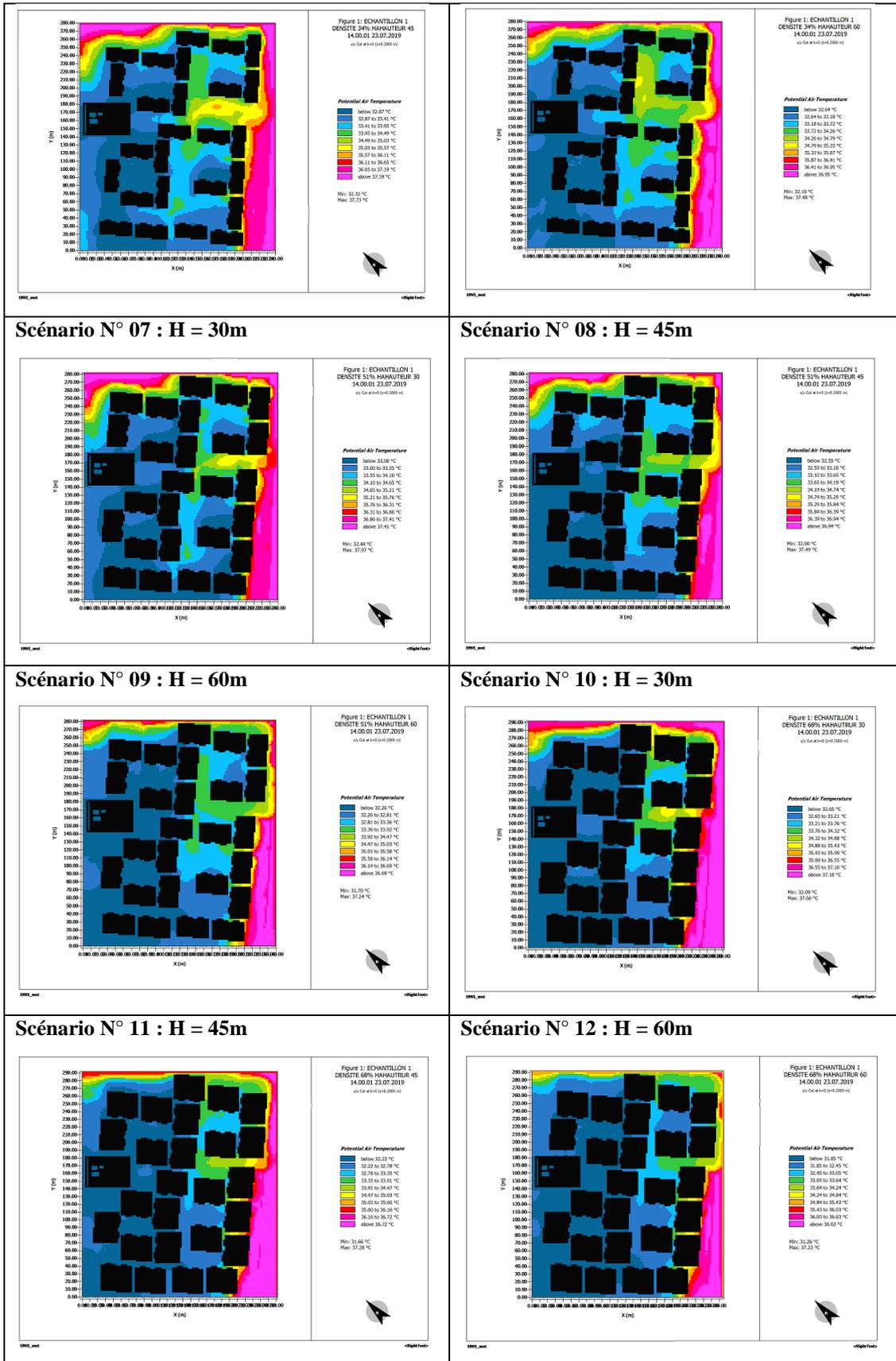
Ainsi, les scénarios avec des hauteurs plus élevées présentent des écarts de diminution de température ambiante plus importants par rapport au scénario de référence, qui correspond à une densité de 17% et une hauteur de 15m. Par ailleurs, l'effet associé de la densité surfacique et de la hauteur des bâtiments amplifie la diminution de la température de l'air dans les espaces extérieurs.

Le scénario le plus favorable est celui qui combine une densité de 51% et une hauteur de 45m, tandis que le scénario le moins favorable est celui du scénario de référence. Au-delà d'une densité de 51%, les écarts de diminution de la température de l'air sont très faibles entre les différentes hauteurs.

Les cartes de la répartition spatiale de la température de l'air à 14h00 pour les douze scénarios résultant de l'effet combiné de la densité et de la hauteur sont présentées dans le tableau (VI.5) ci-après :

Tableau VI. 5 : Cartes des températures de l'air à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)



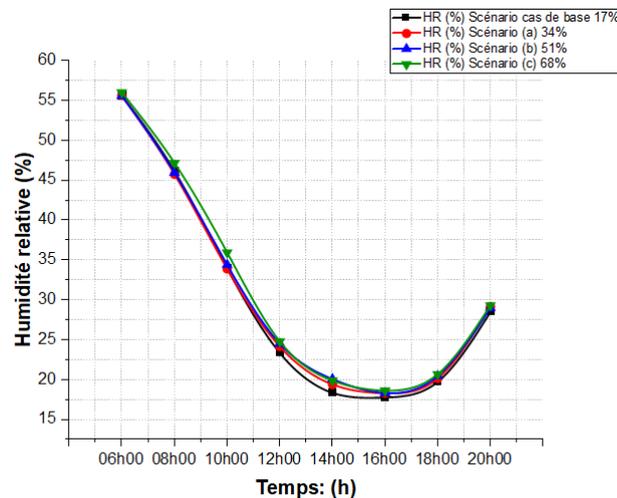


VI.7.2. L'effet sur l'humidité relative

V.7.2.1. L'effet de la densité surfacique sur l'humidité relative

Les valeurs d'humidité relative sont liées aux températures de l'air. Nous avons comparé les valeurs moyennes minimales à 14h00 pour les quatre scénarios de densité surfacique bâtie (cas de base 17%, (a) 34%, (b) 51%, et (c) 68%). Les résultats montrent que l'humidité relative augmente à fur et à mesure avec l'élévation de la densité du bâti, avec des valeurs respectivement de 18.33%, 19.38%, 20.05% et 19.87 %, et des écarts d'augmentation respectifs de l'ordre de $\Delta T= 1.05\%$, $\Delta T= 1.72\%$ et $\Delta T= 1.54\%$ entre les scénarios (a), (b), (c) et le scénario cas de base (cas de référence). À chaque augmentation de la densité surfacique bâtie, on obtient une hausse significative des valeurs d'humidité relative au niveau de notre quartier simulé par rapport au cas réel (17%).

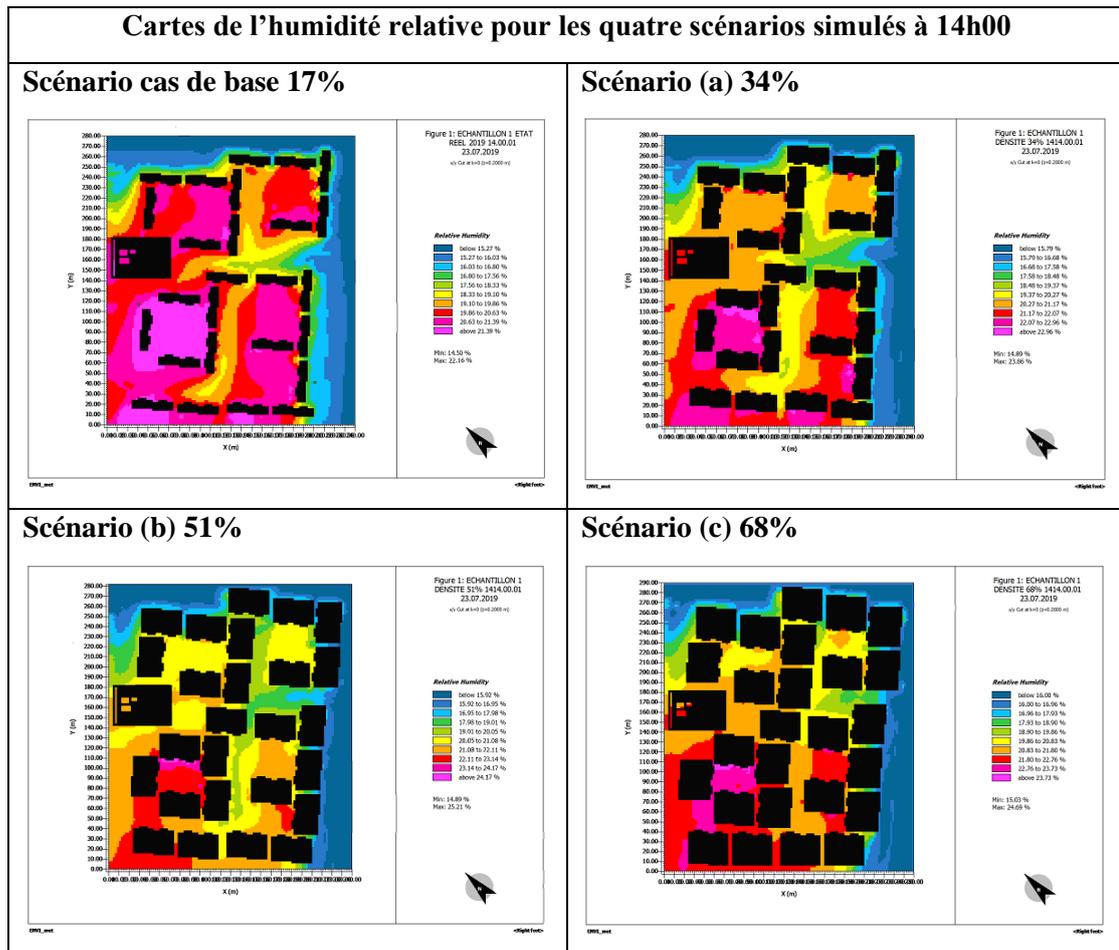
Le scénario (b) avec une densité de 51% et le scénario (c) de 68% de densité, présentent les valeurs d'humidité les plus élevées par rapport aux autres scénarios avec une prédominance du cas de 68% entre 08h00 et 10h00, ensuite les valeurs des deux courbes d'humidité deviennent quasiment identiques. Cette augmentation s'explique par le fait que la densité du bâti réduit la pénétration du rayonnement solaire reçu par les surfaces et favorise la conservation de l'humidité dans l'air entre les bâtiments par l'effet d'ombre, tandis que le scénario cas réel avec une densité de 17% présentant des espaces directement exposés au ciel visible (sans ombre), et le scénario (a) avec 34%, enregistrent les valeurs les plus faibles.



Graphique VI. 6 : Comparaison entre les humidités moyennes des quatre stations pour chaque scénario simulé.
(Source : Auteure, 2021)

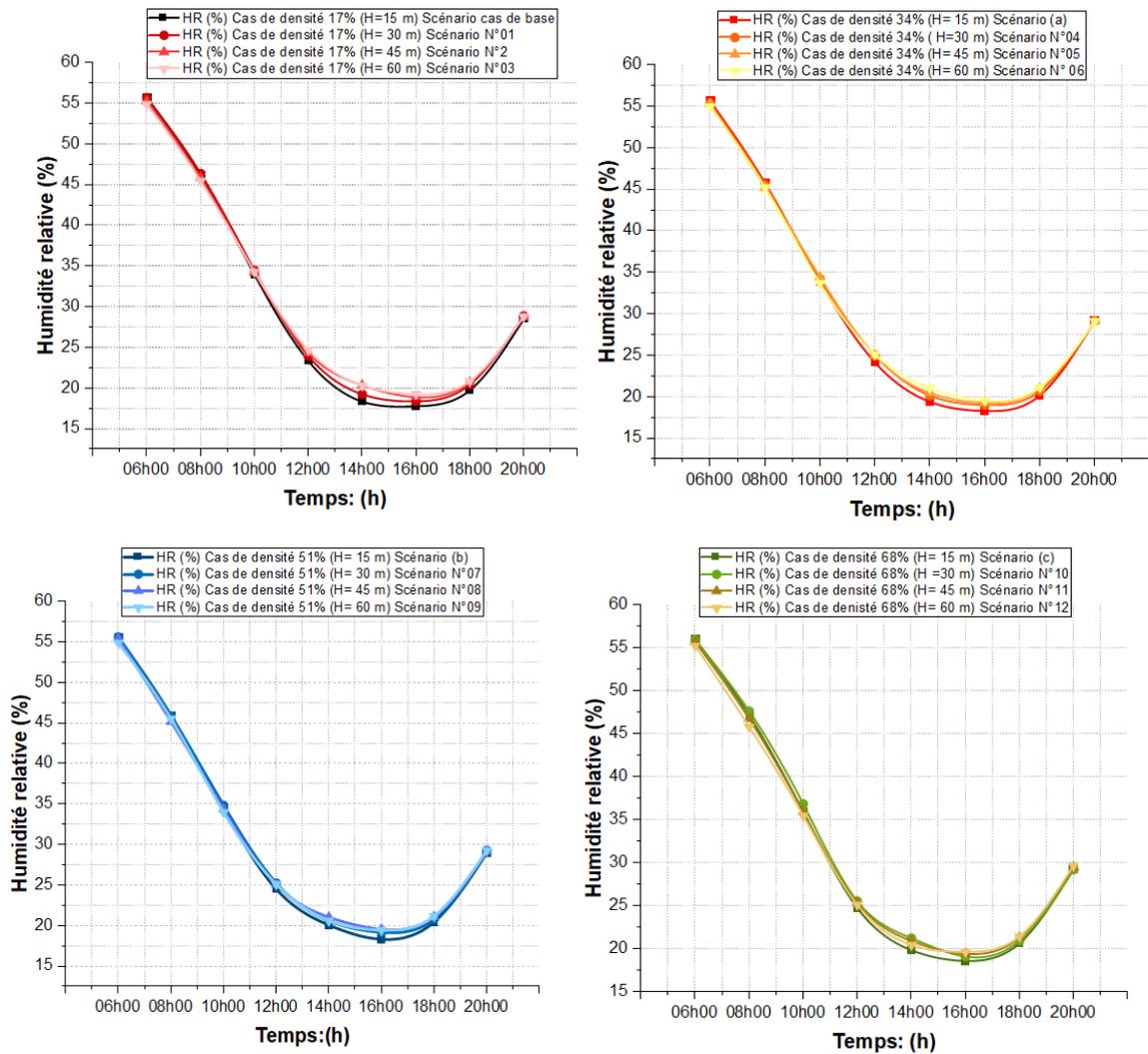
Les cartes de la répartition spatiale de l'humidité relative à 14h00 pour les quatre cas de densité simulés sont présentées dans le tableau (VI.6) ci-après :

Tableau VI. 6 : Les cartes des humidités relatives à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)



VI.7.2.2. L'effet de la hauteur sur l'humidité relative

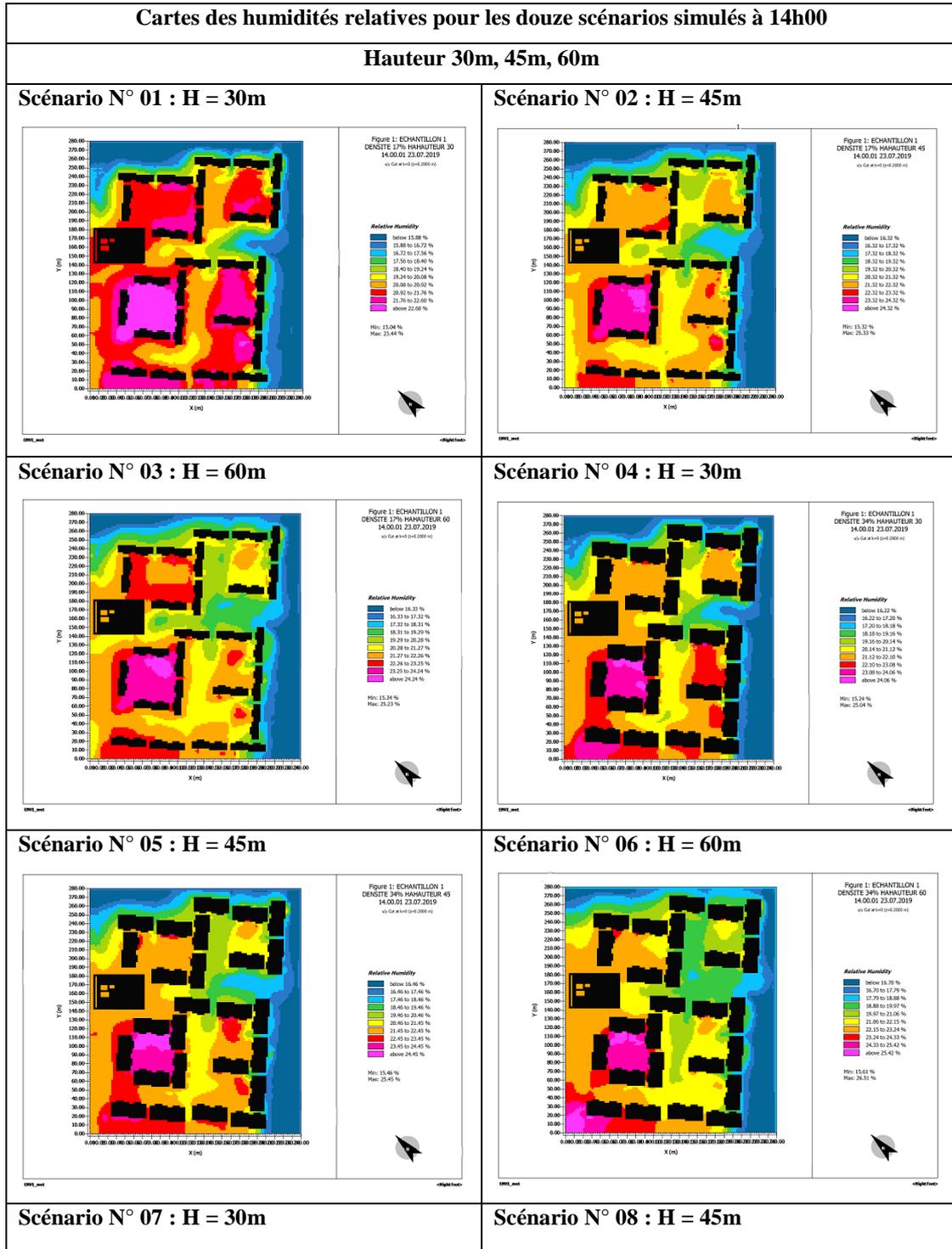
D'après le graphe (VI.7) les courbes des humidités relatives de l'air pour la période de 06h00 à 12h00 et de 18h00 à 20h00 sont en superposition et les valeurs se rapprochant les unes aux autres avec des écarts d'augmentation plus ou moins visibles vers 14h00 et 16h00 pour les douze scénarios. Les humidités dépendent de la hauteur (H) et de la densité surfacique des bâtiments dans les différents scénarios simulés. En augmentant la hauteur dans les mêmes conditions de densité, ou en augmentant la densité pour les mêmes hauteurs, on observe une élévation de l'humidité relative. Cette situation se maintient pour des hauteurs de 15m et 30m, mais s'inverse pour des hauteurs de 45m et 60m, où l'humidité relative diminue légèrement avec des écarts négligeables pour les densités de 51% et 68%.

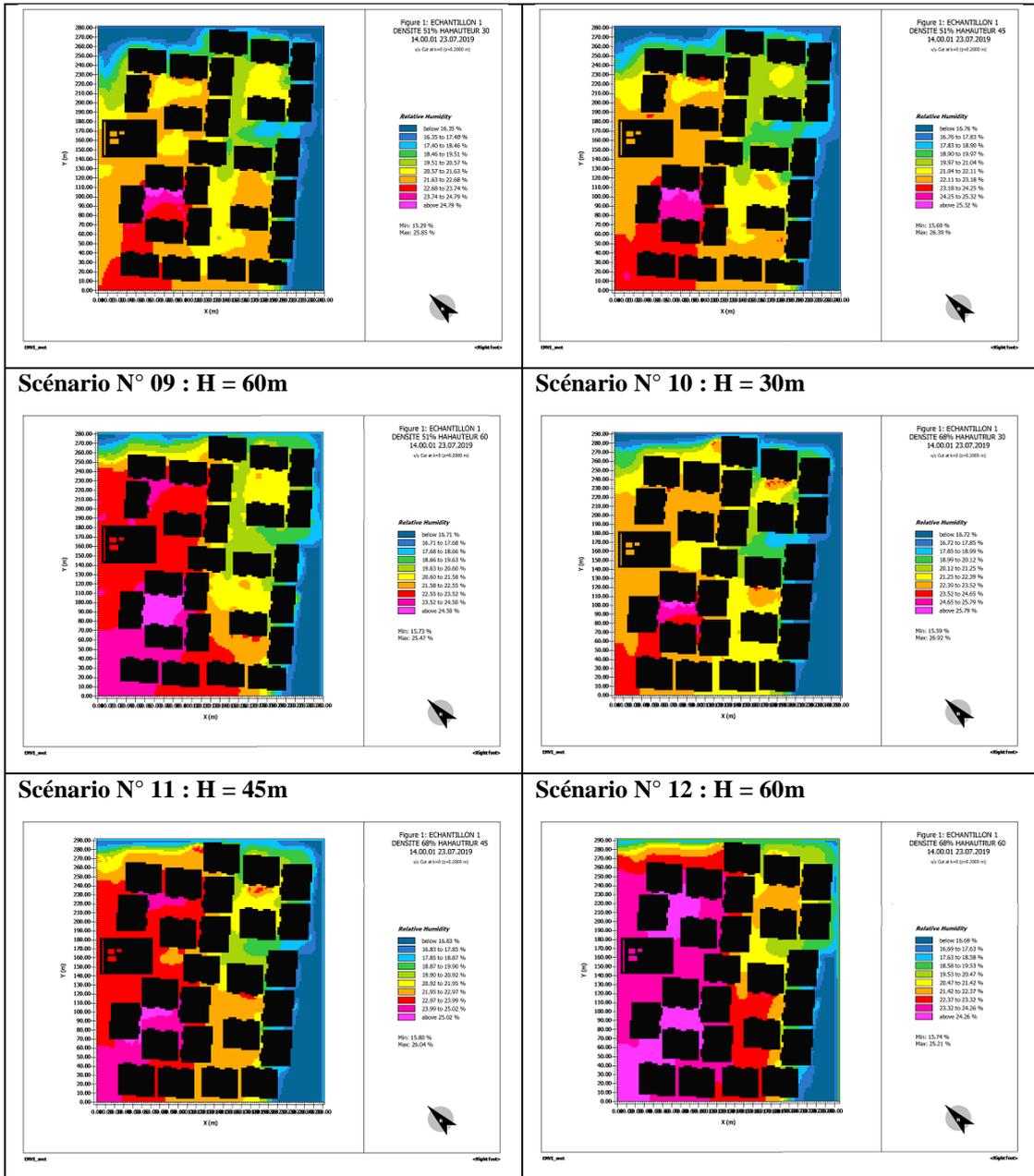


Graph VI. 7 : Comparaisons entre les humidités relatives pour les hauteurs 15m, 30m, 45m, et 60m pour chaque cas de densité surfacique. (Source : Auteure, 2021)

Les cartes de la répartition spatiale de l’humidité relative pour les douze scénarios simulés pour le cas de l’effet combiné de la densité et de la hauteur sont présentées dans le tableau (VI.7) ci-après :

Tableau VI. 7 : Les cartes des humidités relatives à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)





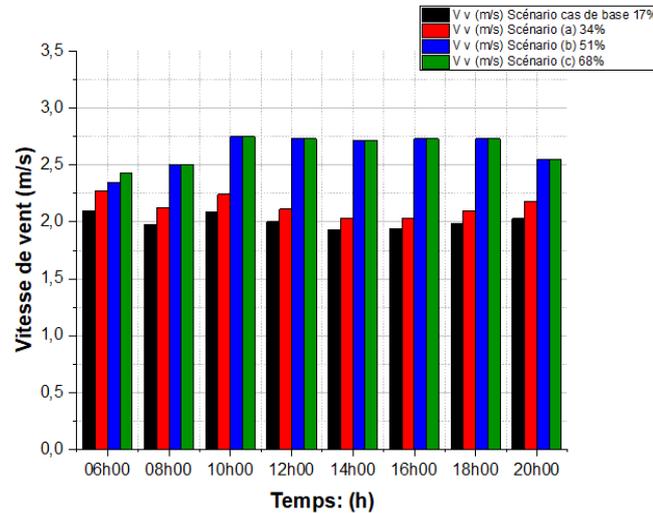
VI.7.3. L'effet sur la vitesse du vent

1VI.7.3.1.L'effet de la densité surfacique sur la vitesse du vent

Pour interpréter les résultats de simulation des vitesses du vent, deux situations se présentent : celle à l'intérieur du quartier et celle autour des constructions. D'après les cartes microclimatiques présentées ci-dessous (Tableau VI.8), il est remarquable qu'à l'intérieur des espaces entourés de bâti, les vitesses du vent sont inversement proportionnelles à la densité surfacique bâtie compte tenu du frottement au contact du sol. En général, plus une surface est construite, plus elle devient rugueuse, et plus la vitesse au sol est faible.

La morphologie du bâti véhicule la circulation de l'air et agit comme un obstacle, déterminant sa pénétration entre les constructions. Par conséquent, une augmentation de la

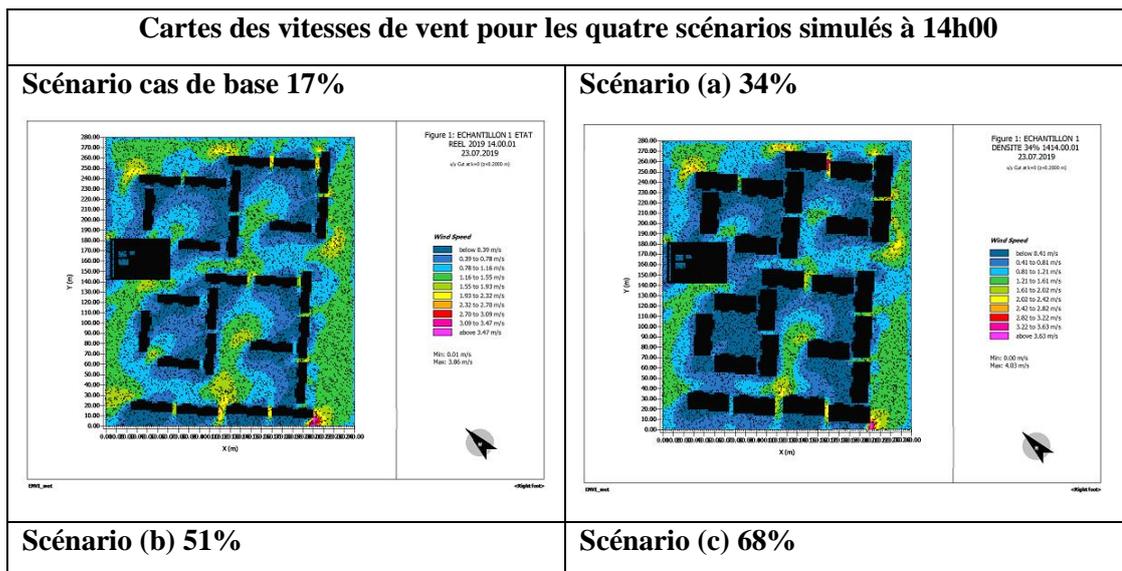
vitesse du vent globale a été constatée dans le quartier aux alentours des constructions à cause des effets tourbillonnaires, avec une différence $\Delta T = -0.79$ (m/s) entre le scénario cas réel et le scénario (c) à 14h00. Il est également important de dire que cette accélération de la vitesse s'interrompt lorsqu'on le seuil de 51% de densité est franchi.

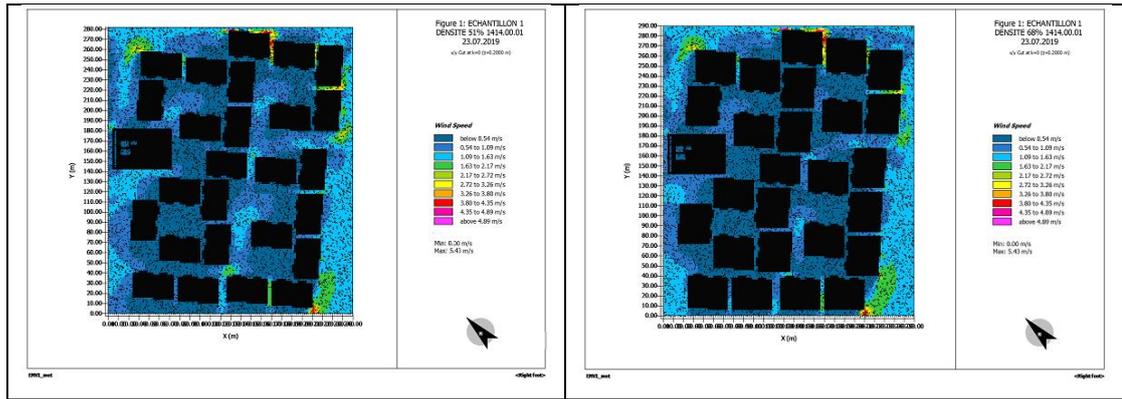


Graph VI.8 : Comparaison entre les vitesses du vent moyennes des quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

Les cartes de vitesse du vent pour les quatre scénarios simulés pour le cas de l'effet de la densité surfacique sont présentées dans le tableau (VI.8) ci-après :

Tableau VI.8 : Les cartes des vitesses du vent à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)





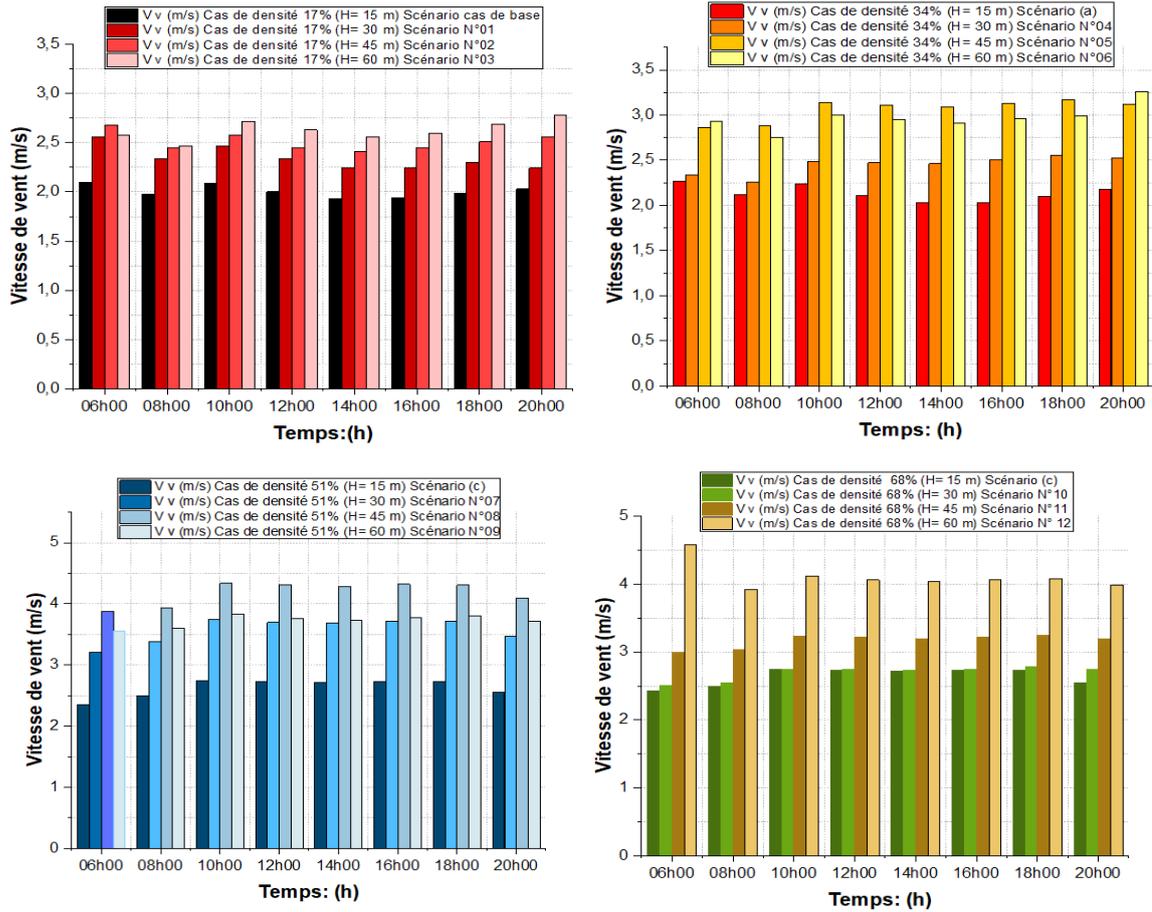
VI.7.4.2. L'effet de la hauteur sur la vitesse du vent

L'effet de la hauteur (H) sur les vitesses du vent est plus prononcé par rapport à l'effet de la densité surfacique bâtie. Dans tous les scénarios simulés, on remarque que les vitesses du vent augmentent avec la hauteur (H). Donc, cette variable microclimatique est plus influencée par la hauteur que par la densité surfacique bâti. Les bâtiments élevés et élancés ont tendance à dévier le vent vers le bas dans des zones qui étaient auparavant protégées.

Plus un bâtiment est élevé, plus il peut altérer le mouvement de l'air et réduire la vitesse du vent à proximité immédiate du bâtiment. Toutefois, les bâtiments plus hauts peuvent également favoriser l'apparition de courants d'air, notamment en générant des turbulences autour de leurs sommets. Ces turbulences peuvent participer à la formation de tourbillons et de courants ascendants, qui peuvent contribuer à disperser la chaleur et à augmenter la vitesse du vent à proximité du bâtiment, ce qui peut contribuer à l'atténuation des îlots de chaleur urbains.

Lorsque la hauteur du bâti ne dépasse pas les 15m, le vent passe par-dessus le volume sans créer de grandes turbulences. Cependant, à des hauteurs dépassant les 30m les effets tourbillonnaires aux alentours des constructions sont beaucoup plus intenses.

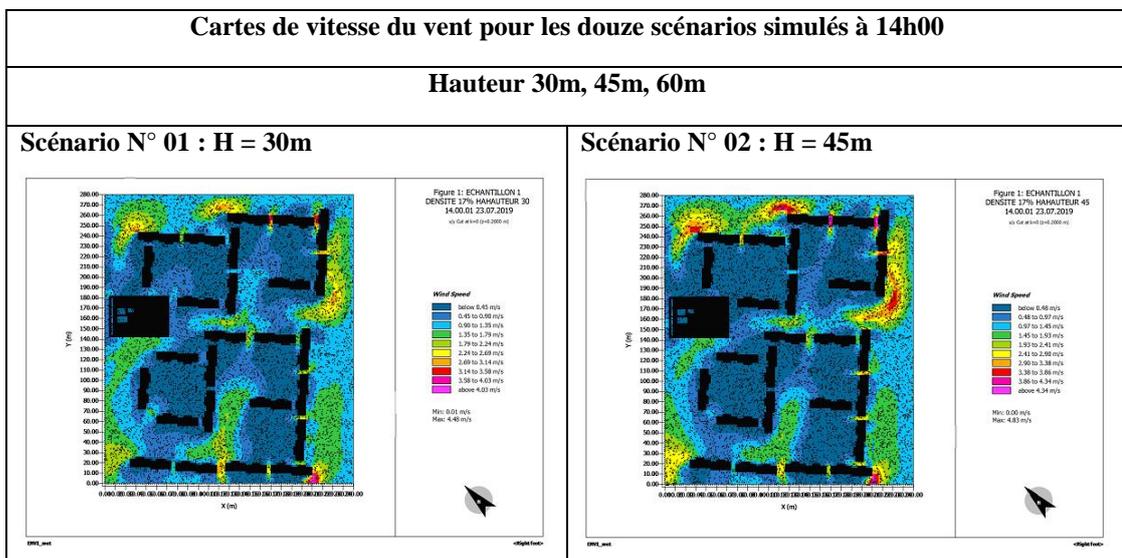
En situation de densité de 51%, les vitesses du vent élevées ont été enregistrées à une hauteur de 45m, pendant que les vitesses faibles ont été enregistrées pour le cas de densité de 17% à une hauteur de 15m.

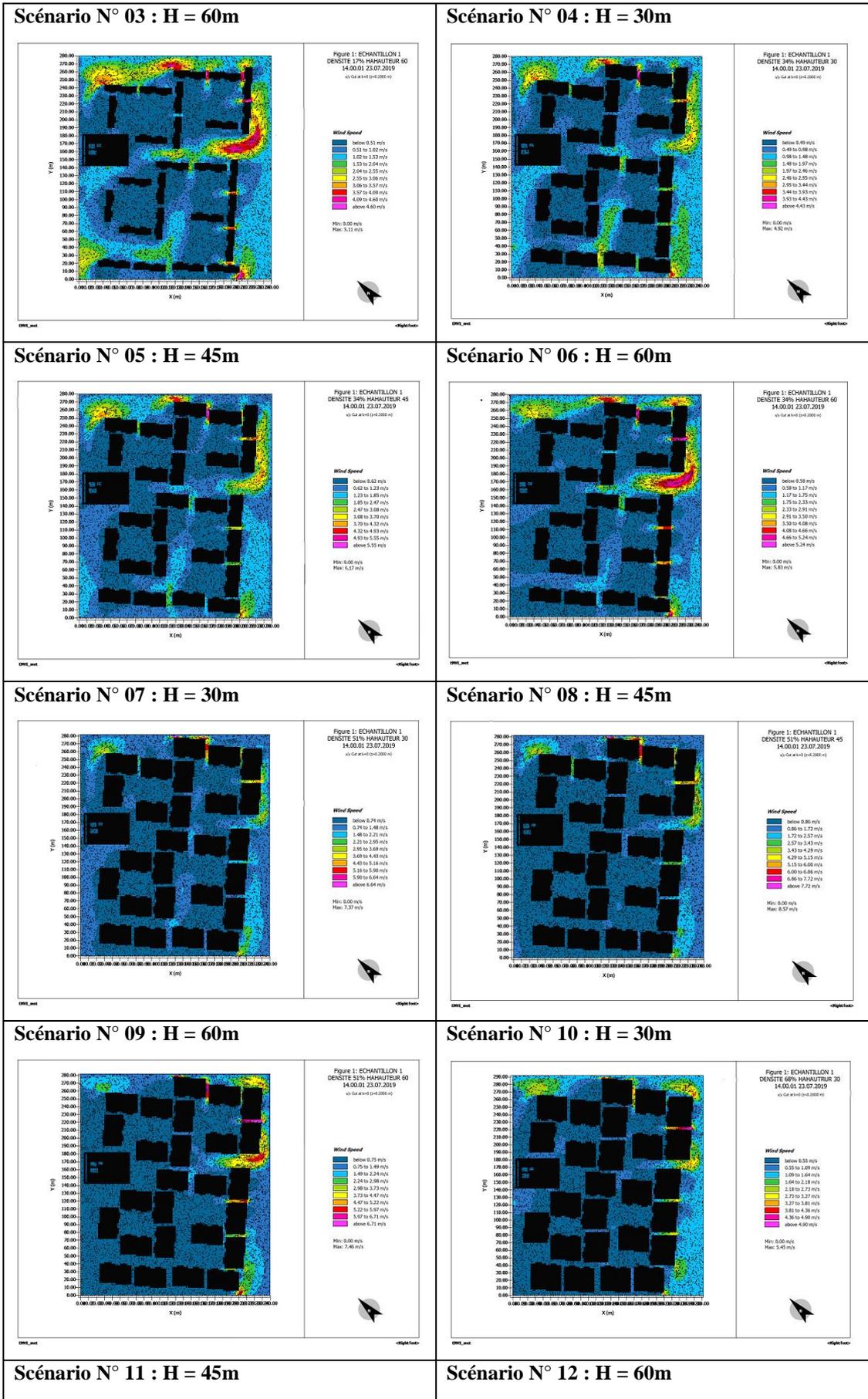


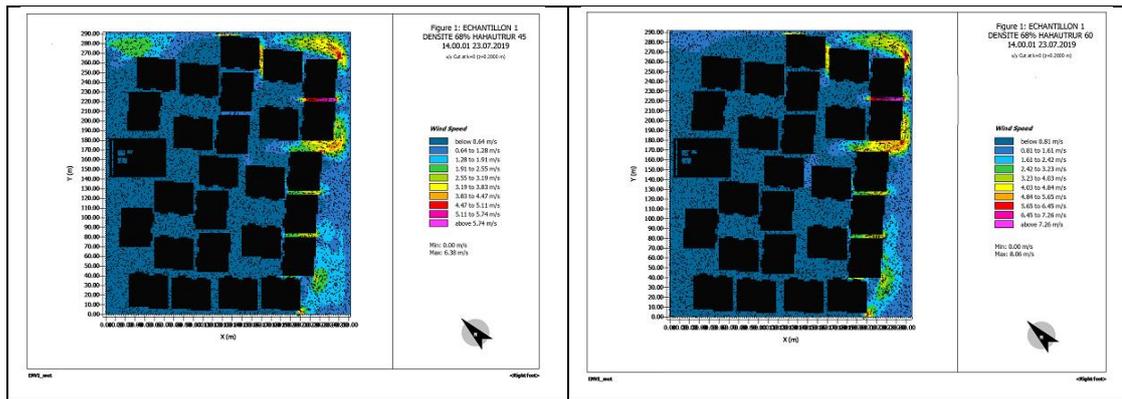
Graphe VI. 9 : Comparaison entre les vitesses du vent moyennes des douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

Les cartes de vitesse du vent pour les quatre scénarios simulés, pour le cas de l'effet associé de la densité et de la hauteur, sont présentées dans le tableau (VI.9) ci-après :

Tableau VI. 9 : Les cartes des vitesses du vent à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)







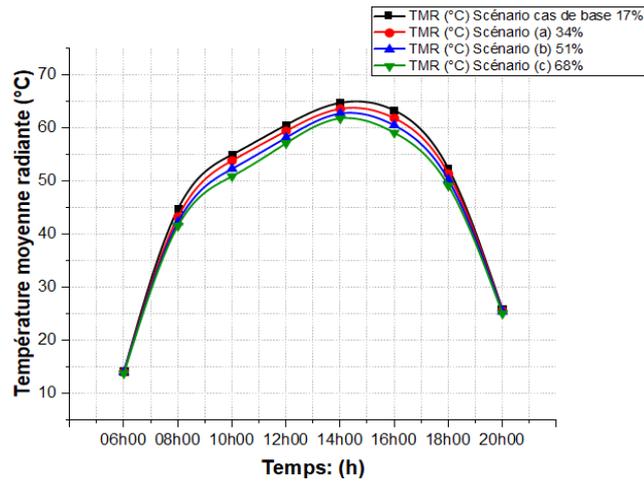
VI.7.4. L'effet sur la température moyenne radiante (TMR)

VI.7.4.1. L'effet de la densité surfacique sur la température moyenne radiante

La température moyenne radiante (TMR) est un paramètre déterminant pour le bilan thermique, surtout pendant des journées chaudes et ensoleillées. Elle est directement liée au confort thermique (Höppe, 1999 ; Thorsson et al., 2007). Ce paramètre, qui est sensible à l'irradiation solaire, mesure la température de toutes les surfaces qui émettent et absorbent de l'énergie thermique dans un environnement donné.

Le graphe (VI.10) montre que les valeurs moyennes de température radiante pour les quatre scénarios simulés varient conjointement avec la densité surfacique bâtie. On remarque que le scénario du cas réel (17%), qui se distingue par une très faible densité, avec des espaces d'une grande ouverture vers le ciel (FVC élevé), a donné des valeurs maximales. Cela peut être expliqué par l'exposition directe de ces espaces aux irradiances solaires. À contrario, les valeurs minimales ont été obtenues pour les scénarios (b) et (c) respectivement, avec des écarts moyens de diminution de cette variable à 14h00 de l'ordre de: $\Delta T = -1.13^{\circ}\text{C}$ entre le scénario (a) et le scénario cas réel, $\Delta T = -2.02^{\circ}\text{C}$ entre le scénario (b) et le cas réel, et $\Delta T = -2.94^{\circ}\text{C}$ entre le scénario (c) et le scénario cas réel. Les courbes de la température radiante montrent une progression continue durant la période la plus ensoleillée de 10h00 à 16h00, où l'on enregistre un pic environ 14h00. Pour la période de 06h00 à 08h00 et de 18h00 à 20h00, les courbes de température radiante présentant des écarts qui restent approximativement identiques avec de légères distinctions, cela est pratiquement dû à l'absence de radiations solaires.

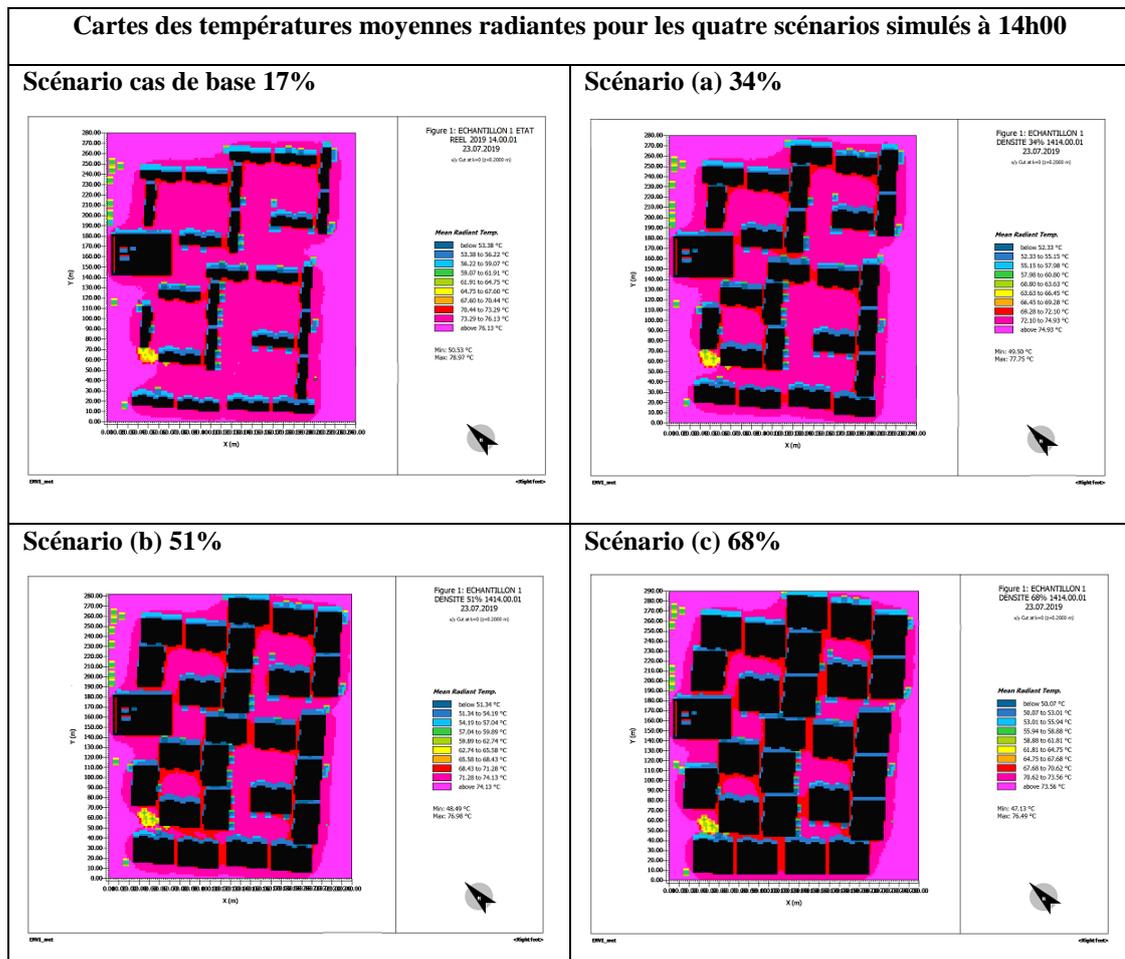
L'interprétation des cartes thermiques démontre qu'en se rapprochant du bâti, les valeurs de la température moyenne radiante diminuent considérablement à cause de l'effet protecteur des bâtiments. Ces valeurs restent néanmoins quelques degrés supérieurs à la température de l'air. Par contre, sous le soleil direct, la température moyenne radiante peut être multipliée et exprime un état de stress thermique extrême.



Graphe VI. 10 : Comparaison entre les valeurs moyennes des températures radiantes des quatre scénarios simulés. (Source : Auteur, 2021)

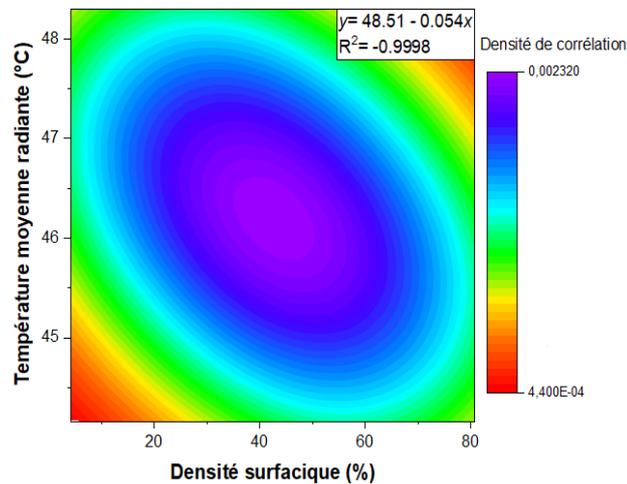
Les cartes de la répartition spatiale de la température radiante à 14h00 pour les quatre scénarios simulés, montrant l’effet d’augmentation de la densité surfacique, sont présentées dans le tableau (VI.10) ci-après :

Tableau VI. 10 : Les cartes des températures moyennes radiantes (TMR) à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteur, 2021)



➤ **Corrélation entre le degré de densité surfacique et la température moyenne radiante**

Le graphe (VI.11) montre une corrélation très forte et négative entre la densité surfacique bâtie et la température moyenne radiante, avec un coefficient de Pearson $R^2 = -0.9998$. Cette relation indique que plus la densité surfacique bâtie est élevée, plus la température moyenne radiante est basse. Cela peut être signifié par la diminution du facteur de vue du ciel (FVC), qui réduit la quantité des gains de rayonnement solaire reçue par les rues et les espaces ouverts du quartier. En conséquence, en augmentant la densité et la compacité du bâti, c'est-à-dire en réduisant les distances entre les bâtiments (Prospect faible) et en augmentant le volume du bâti, on peut limiter l'exposition des surfaces au rayonnement solaire. Cela a pour effet de diminuer la quantité de chaleur absorbée et stockée par ces surfaces en fournissant davantage de zones ombragées, qui permet un refroidissement diurne important.



Graph VI. 11 : Corrélation entre la température moyenne radiante et le degré de densité. (Source : Auteure, 2021)

VI.7.4.2. L'effet de la hauteur sur la température moyenne radiante (TMR)

Comme cela se présente dans le graphe (VI.12), l'effet isolé de la hauteur a un impact considérable sur la diminution des températures radiantes. Plus la hauteur augmente, plus on remarque que les valeurs de ce paramètre physique diminuent de façon proportionnelle. On peut aussi constater que la combinaison de l'effet de la densité à celui de la hauteur des constructions entraîne une double réduction des valeurs de TMR. Donc, la densité renforce cet effet de baisse de la température moyenne radiante (TMR).

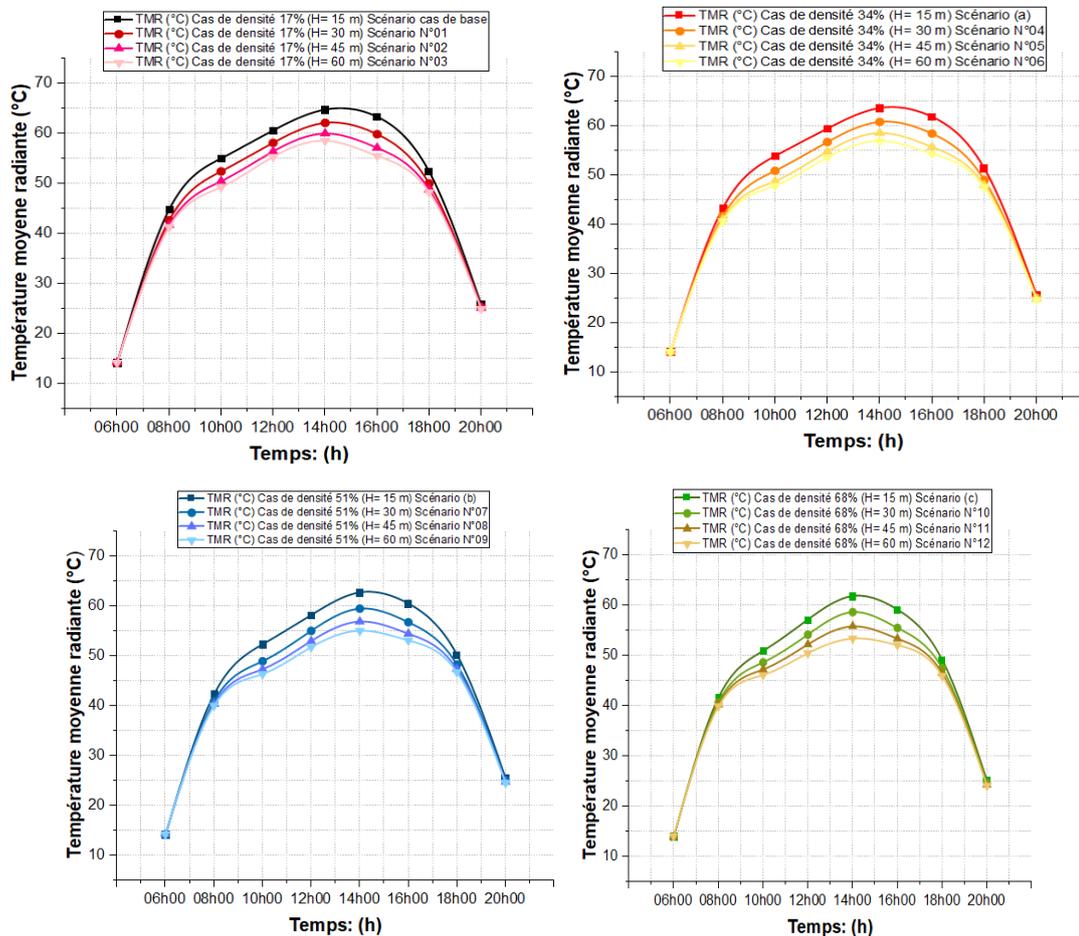
Contrairement à l'effet de la densité surfacique, qui occupe plus d'espace, l'élévation de la hauteur permet une diminution importante des températures moyennes radiantes, même avec

une densité urbaine très faible. Cela implique une consommation rationnelle et réduite des surfaces des terres naturelles.

Les courbes de différents cas de densité avec différentes hauteurs, permettent de constater que la situation la plus défavorable est celle d'une densité de 17% avec une hauteur de 15m suivie du cas d'une densité de 34%, alors que les plus favorables sont celles qui présentent des densités de 51% et 68%.

L'analyse des résultats énonce qu'à partir d'une hauteur de 45m, les écarts de température moyenne radiante commencent à montrer de faibles réductions, ce qui est opéré dans les quatre cas de densité surfacique, c'est-à-dire dans les douze scénarios simulés.

On outre, lorsque la densité atteint le seuil de 51%, on observe des écarts plus importants de la température moyenne radiante entre les différentes hauteurs.

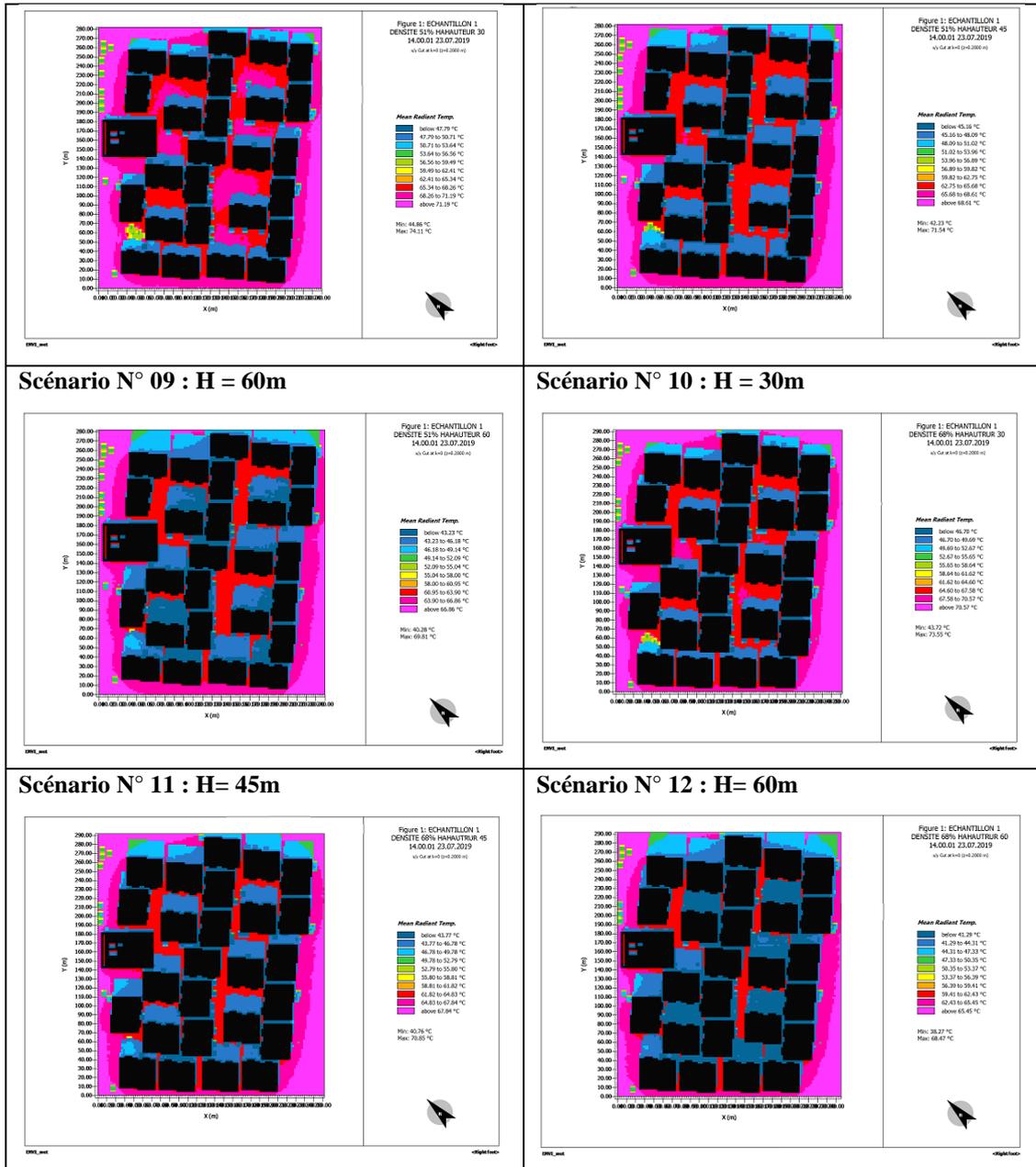


Graphe VI. 12 : Comparaison entre les valeurs moyennes des températures radiantes des douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

Les cartes de la répartition spatiale de température radiante à 14h00 des douze scénarios simulés de l'effet combiné de la hauteur et de la densité, sont présentées dans le tableau (VI.11) ci-après :

Tableau VI. 11 : Les cartes des températures moyennes radiantes (TMR) à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

Cartes des températures moyennes radiantes pour les douze scénarios simulés à 14h00	
Hauteur 30m, 45m, 60m	
<p>Scénario N° 01 : H = 30m</p> <p>Figure 1: ECHANTILLON 1 DENSITE 17% HAUTEUR 30 14.00.01 23.07.2019 v3 CA #1-0 (1-2000-0)</p> <p>Mean Radiant Temp.</p> <ul style="list-style-type: none"> below 53.56 °C 53.56 to 53.85 °C 53.85 to 56.26 °C 56.26 to 58.22 °C 58.22 to 62.11 °C 62.11 to 65.00 °C 65.00 to 67.88 °C 67.88 to 70.77 °C above 73.66 °C <p>Min: 62.67 °C Max: 76.55 °C</p>	<p>Scénario N° 02 ; H = 45m</p> <p>Figure 1: ECHANTILLON 1 DENSITE 17% HAUTEUR 45 14.00.01 23.07.2019 v3 CA #1-0 (1-2000-0)</p> <p>Mean Radiant Temp.</p> <ul style="list-style-type: none"> below 48.39 °C 48.39 to 51.29 °C 51.29 to 54.20 °C 54.20 to 57.08 °C 57.08 to 59.97 °C 59.97 to 62.87 °C 62.87 to 65.76 °C 65.76 to 68.66 °C above 71.35 °C <p>Min: 45.33 °C Max: 74.45 °C</p>
<p>Scénario N° 03 : H = 60m</p> <p>Figure 1: ECHANTILLON 1 DENSITE 17% HAUTEUR 60 14.00.01 23.07.2019 v3 CA #1-0 (1-2000-0)</p> <p>Mean Radiant Temp.</p> <ul style="list-style-type: none"> below 47.01 °C 47.01 to 49.89 °C 49.89 to 52.77 °C 52.77 to 55.66 °C 55.66 to 58.54 °C 58.54 to 61.42 °C 61.42 to 64.30 °C 64.30 to 67.18 °C 67.18 to 70.07 °C above 70.07 °C <p>Min: 44.13 °C Max: 72.95 °C</p>	<p>Scénario N° 04 : H = 30m</p> <p>Figure 1: ECHANTILLON 1 DENSITE 34% HAUTEUR 30 14.00.01 23.07.2019 v3 CA #1-0 (1-2000-0)</p> <p>Mean Radiant Temp.</p> <ul style="list-style-type: none"> below 49.27 °C 49.27 to 52.12 °C 52.12 to 54.97 °C 54.97 to 57.81 °C 57.81 to 60.65 °C 60.65 to 63.49 °C 63.49 to 66.33 °C 66.33 to 69.17 °C 69.17 to 72.01 °C above 72.38 °C <p>Min: 45.33 °C Max: 75.29 °C</p>
<p>Scénario N° 05 : H = 45m</p> <p>Figure 1: ECHANTILLON 1 DENSITE 34% HAUTEUR 45 14.00.01 23.07.2019 v3 CA #1-0 (1-2000-0)</p> <p>Mean Radiant Temp.</p> <ul style="list-style-type: none"> below 46.92 °C 46.92 to 49.80 °C 49.80 to 52.73 °C 52.73 to 55.65 °C 55.65 to 58.55 °C 58.55 to 61.44 °C 61.44 to 64.34 °C 64.34 to 67.24 °C 67.24 to 70.14 °C above 70.14 °C <p>Min: 44.05 °C Max: 73.04 °C</p>	<p>Scénario N° 06 : H = 60m</p> <p>Figure 1: ECHANTILLON 1 DENSITE 34% HAUTEUR 60 14.00.01 23.07.2019 v3 CA #1-0 (1-2000-0)</p> <p>Mean Radiant Temp.</p> <ul style="list-style-type: none"> below 45.29 °C 45.29 to 48.20 °C 48.20 to 51.11 °C 51.11 to 54.02 °C 54.02 to 56.93 °C 56.93 to 59.84 °C 59.84 to 62.75 °C 62.75 to 65.66 °C 65.66 to 68.57 °C above 68.57 °C <p>Min: 42.38 °C Max: 71.48 °C</p>
<p>Scénario N° 07 : H = 30m</p>	<p>Scénario N° 08 : H = 45m</p>



VI.7.5. L'effet sur le flux du rayonnement solaire direct

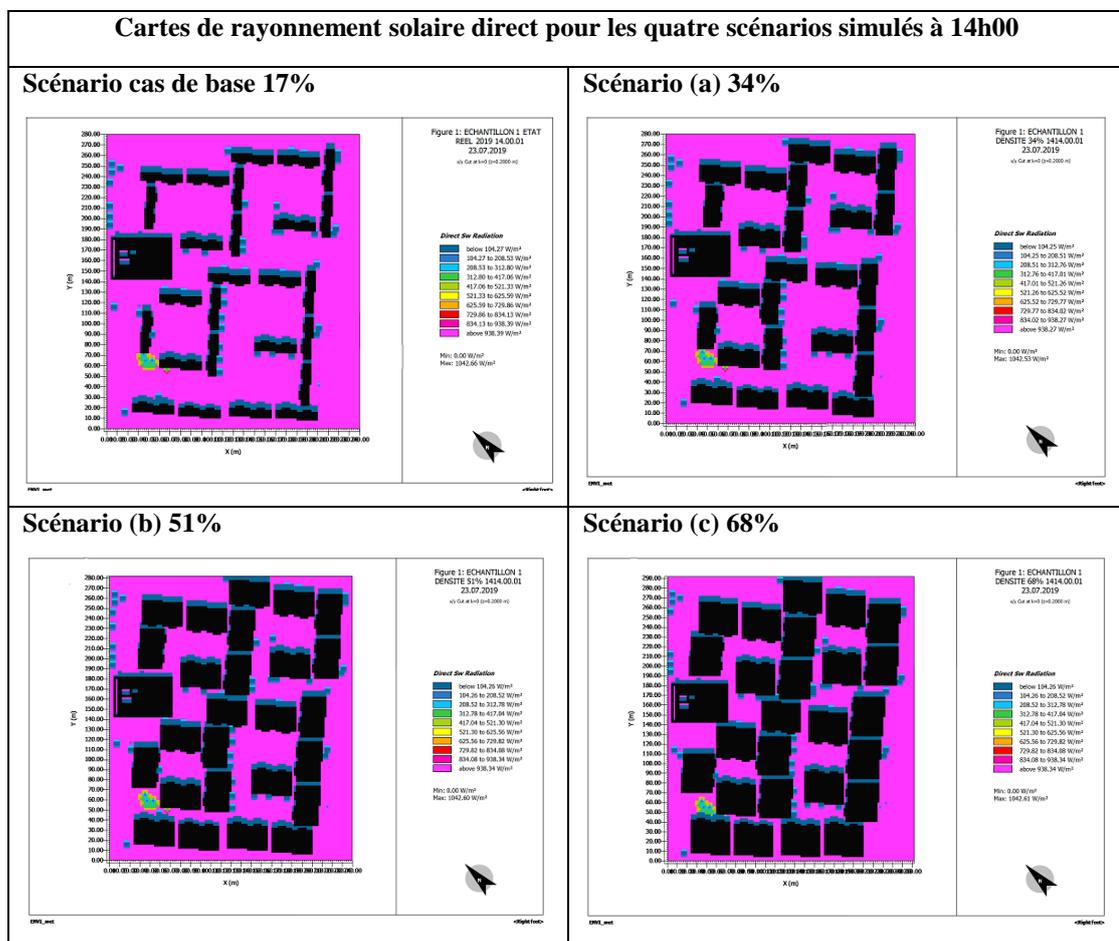
VI.7.5.1. L'effet de la densité surfacique sur le flux du rayonnement solaire direct

Le tableau (VI.12) montre que les valeurs minimales et maximales du flux de rayonnement solaire direct reçu par les surfaces dans toutes les cartes thermiques sont uniformes. Il semble que la seule disparité réside dans la distribution de cette grandeur entre les espaces, car ils ne reçoivent pas la même quantité en raison de la géométrie particulière de chaque espace (espace exposé et espace ombragé). Les espaces ouverts sont fortement exposés au rayonnement solaire direct, comme dans le scénario (cas réel) qui présente un tissu lâche (17%) où l'intensité du rayonnement est importante de 08h00 à 18h00. Cependant, le scénario (c), qui se distingue par une densité très élevée (68%), montre que ses espaces sont les moins

exposés au rayonnement solaire et profitent d'une ombre plus importante pendant la période de 06h00 à 20h00 où les surfaces urbaines reçoivent une partie minimale de l'énergie solaire sauf à midi lorsque le soleil est au zénith. Cette situation est due à la densité élevée du cadre bâti, qui réduit considérablement les distances entre les bâtiments et offre une quantité importante d'ombre.

Les cartes de la répartition spatiale du flux d'énergie solaire direct à 14h00 pour les quatre scénarios simulés de l'effet de la densité Surfaccique bâtie, sont présentées dans le tableau ci-après :

Tableau VI. 12 : Les cartes de rayonnement solaire direct à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)



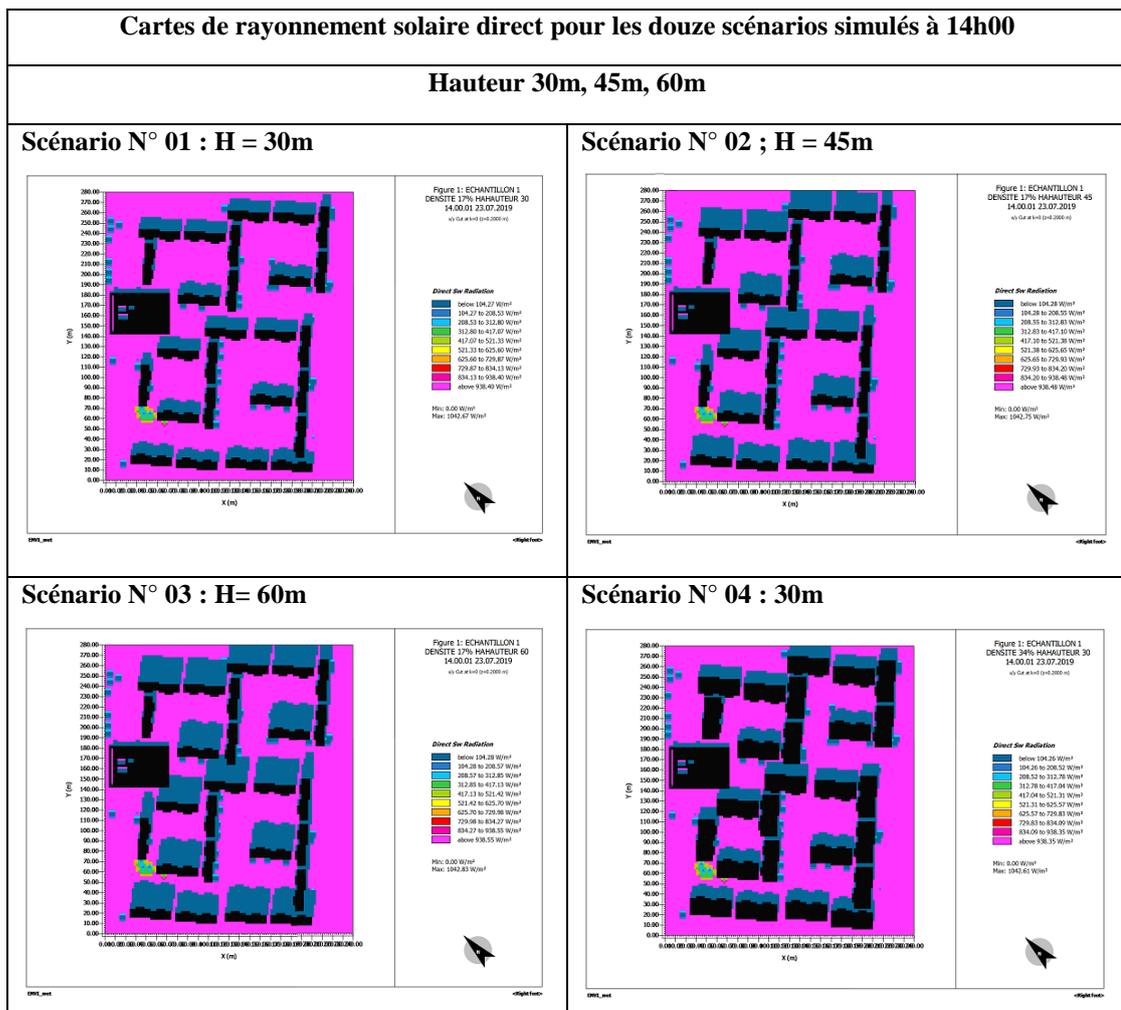
VI.7.5.2. L'effet de la hauteur sur le flux du rayonnement solaire direct

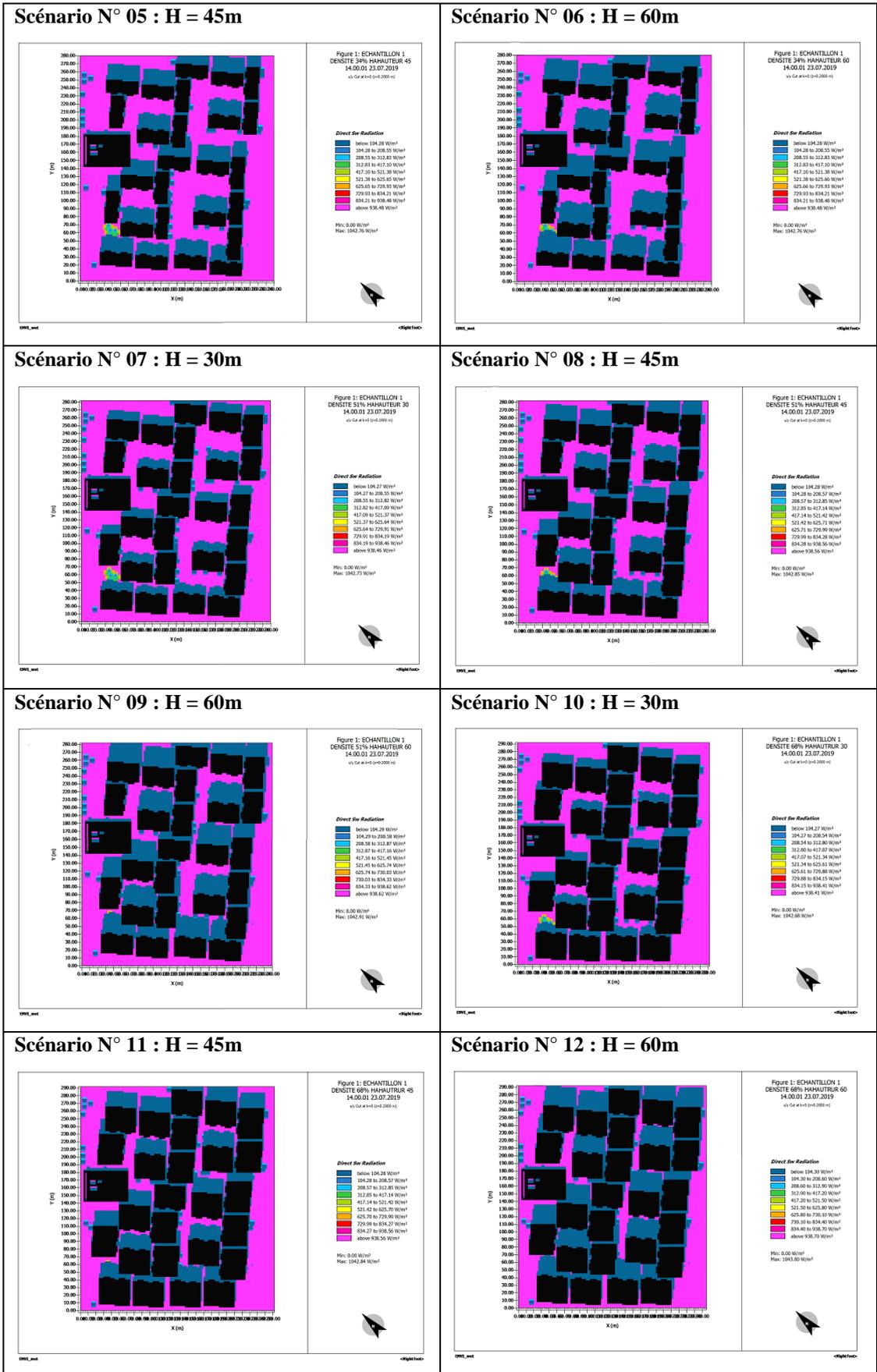
On se référant toujours aux cartes thermiques, le flux de l'énergie solaire direct est également affecté par la hauteur des bâtiments. Cette situation découle des mêmes facteurs évoqués précédemment en ce qui concerne la répartition de cette énergie plus la présence des bâtiments de grande hauteur qui empêchent l'énergie solaire d'atteindre les surfaces urbaines. Dans un environnement construit l'effet de la densité associé à celui de la hauteur, contribue à

créer davantage de surfaces ombragées recouvrant la totalité des espaces de la zone d'étude, cela se manifeste clairement pour des hauteurs de 45m et 60m, associées à des densités de 51% et 68%, gardant la plus parts des surfaces à l'abri du rayonnement direct. Il faut dire que cette situation est également observée même au niveau d'un environnement de faible densité, mais avec des bâtiments de grande hauteur. Cela est aussi dû à la diminution des espacements entre les bâtiments, générant ainsi de vastes surfaces ombragées tout au long de la journée en suivant la trajectoire du soleil. Le rayonnement solaire direct demeure un paramètre critique, car les températures radiantes (TMR) sous l'ombre sont inférieures à celles exposées au soleil.

Les cartes de la distribution spatiale du rayonnement solaire à 14h00 pour les douze scénarios simulés, tenant compte de l'effet combiné de la densité et de la hauteur, sont présentées dans le tableau (VI.13) ci-après :

Tableau VI. 13 : Les cartes de rayonnement solaire direct à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)





VI.8. L'influence de la densité surfacique sur le confort thermique extérieur

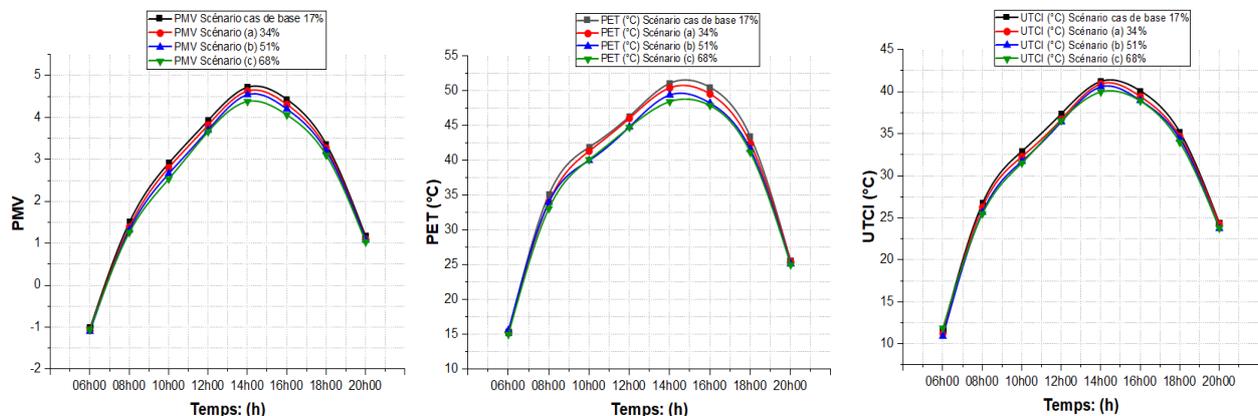
Les résultats indiquent une diminution de la température moyenne radiante (TMR) ainsi que des indices de confort thermique (PMV, PET et UTCI) en corrélation avec l'augmentation de la densité du cadre bâti, particulièrement lors des périodes de stress thermique extrême, ce qui permet d'atténuer les températures ambiantes et radiantes et d'avoir des espaces plus frais, et ce sur une période prolongée au cours de la journée, car ces indices sont corrélés positivement à la température moyenne radiante.

Les valeurs des trois indices (PMV, PET et UTCI) se distinguent par un accroissement ininterrompue de 08h00 jusqu'à 14h00, 15h00 et 16h00 où l'on enregistre un maximum de sensation de stress thermique. Ensuite, ils commencent à décroître de 16h00 à 18h00 pour atteindre leurs minimums. La zone d'étude est soumise à un état d'inconfort de 10h00 à 18h00, est cela pour les quatre scénarios simulés qui se situent hors la zone de confort.

Les périodes de 06h00 et 20h00 peuvent être négligées lors de la comparaison à cause de l'absence d'une distinction apparente entre les valeurs des différents indices calculés.

Il paraît également que le seuil de densité de 50% se distingue comme le cas le plus optimal par rapport aux densités de 17%, 34% et 68%. Les trois indices (PMV, PET et UTCI) baissent, et assurent un meilleur confort thermique extérieur, sauf à 14h00, où un léger écart moyen est observé entre le cas de 51% et 68% de l'ordre de 0.16 pour le PMV, 0.96 pour la PET et 0.61 pour l'UTCI.

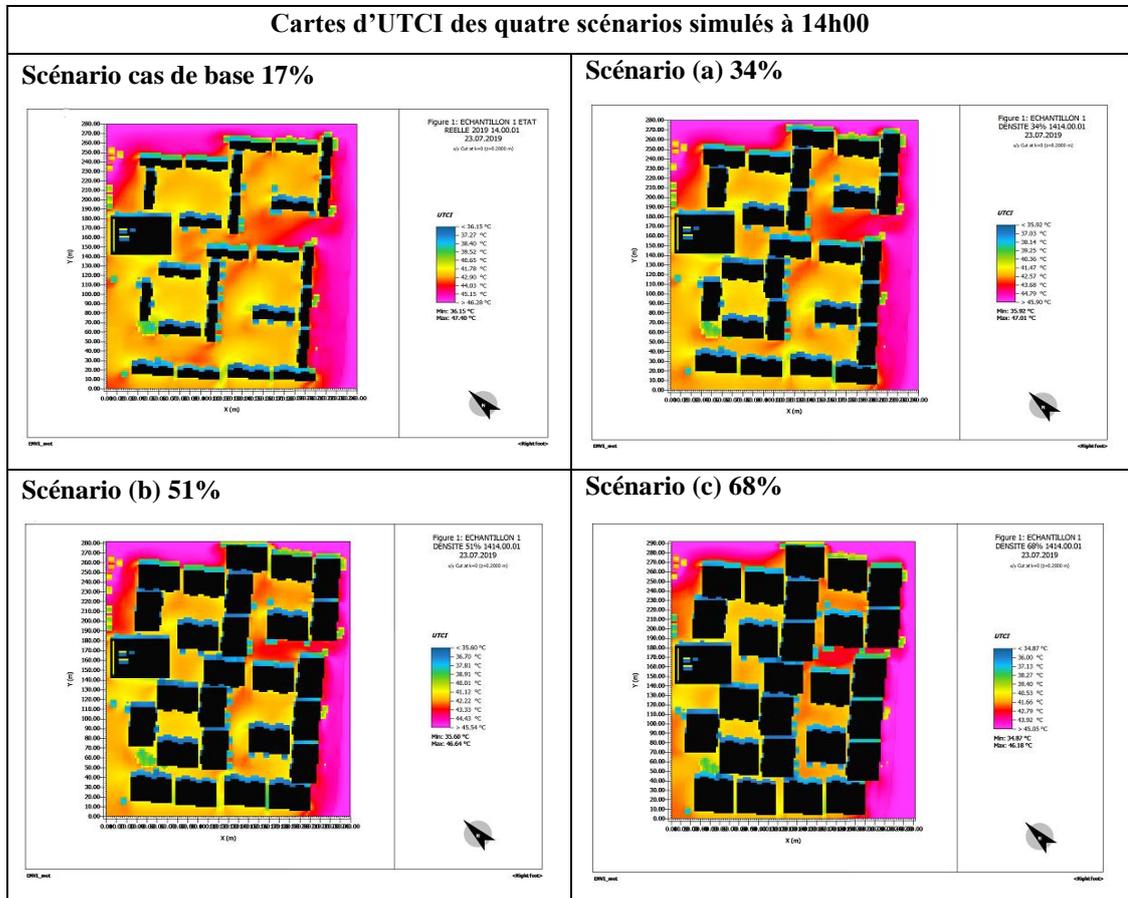
Les résultats présentés dans (L'annexe 05) confirment que la densification des tissus urbains est la meilleure solution pour améliorer le confort thermique dans les régions arides et semi-arides. Ces conclusions peuvent être utiles aux urbanistes et aux architectes pour optimiser les effets de la densité bâtie sur l'amélioration du confort thermique dans les zones résidentielles.



Graphe VI. 13 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour les différents cas de densité (17%, 34%, 51%, 68%). (Source : Auteure, 2021)

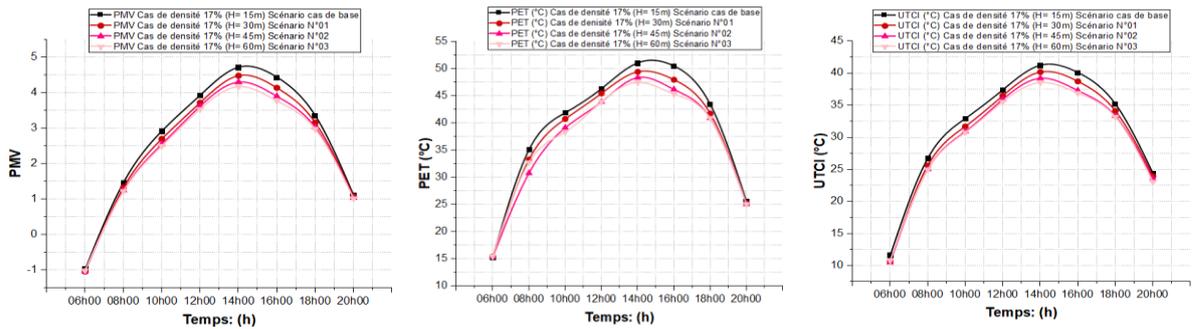
Les cartes illustrant la distribution spatiale d'UTCI à 14h00 pour les quatre scénarios simulés, prenant en compte de l'effet de la densité surfacique sont présentées dans le tableau (VI.14) ci-après :

Tableau VI. 14 : Les cartes d'UTCI à 14h00 pour les quatre scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)

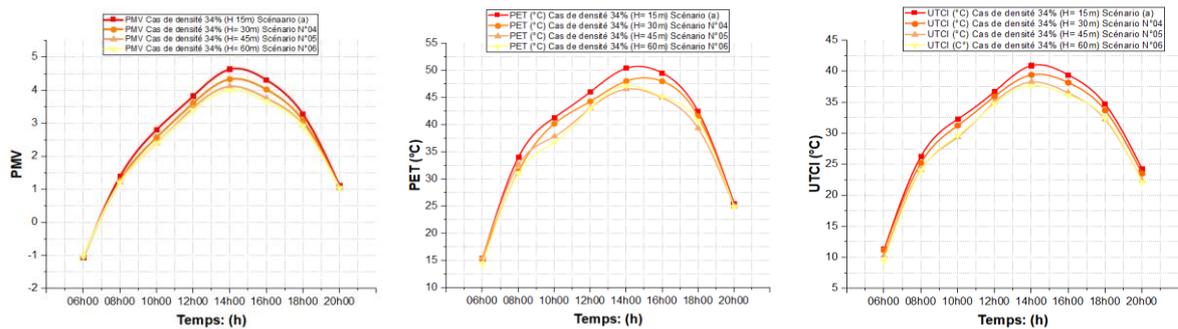


VI.9. L'influence de la hauteur sur le confort thermique extérieur

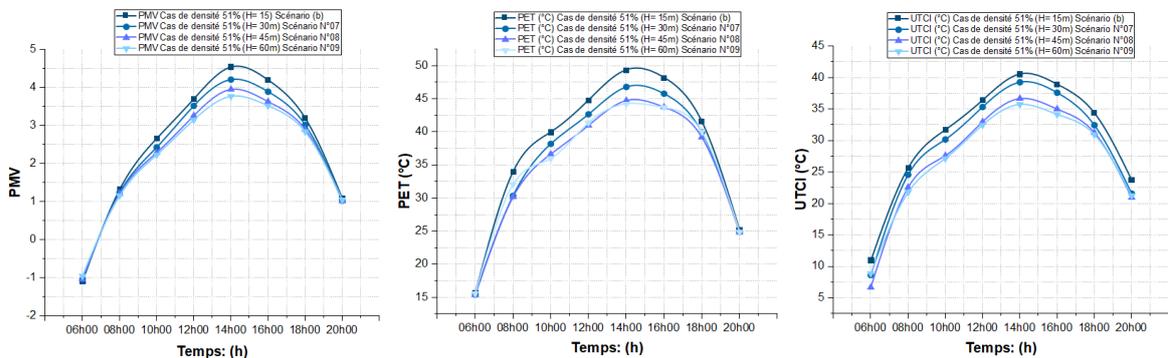
Les simulations ont produit des résultats passionnants, indiquant pour tous les scénarios de densité testés, la hauteur peut avoir un impact significatif sur le confort thermique extérieur. Les bâtiments plus hauts sont capables de créer des zones d'ombre plus étendues jouant le rôle de masque contre le rayonnement solaire et améliore la sensation thermique des piétons. Les résultats de simulation soulignent que la hauteur de 45m demeure optimale pour atteindre des niveaux de confort thermique satisfaisants pendant toute la journée, et que les valeurs des trois indices sont relativement similaires pour une densité de 51%, où les valeurs des trois indices pour les hauteurs de 30m et 45m restent légèrement inférieures au cas de 68%, sauf pour la hauteur de 60m, où l'on constate une légère diminution de l'UTCI par rapport au cas de 51%. Pour les cas de densité 17% et 34% (avec des hauteurs de 15m, 30m, 45m et 60m), les valeurs des trois indices montrent une tendance à décroître à mesure que la hauteur augmente (Voir l'annexe 05), (même situation a été observée pour les autres cas de densité 51% et 68%).



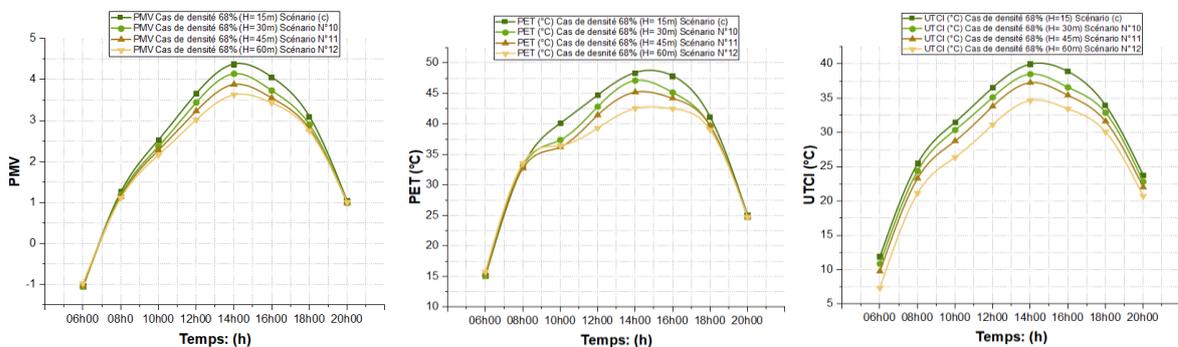
Graphe VI. 14 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 17% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021)



Graphe VI. 15 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 34% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021)



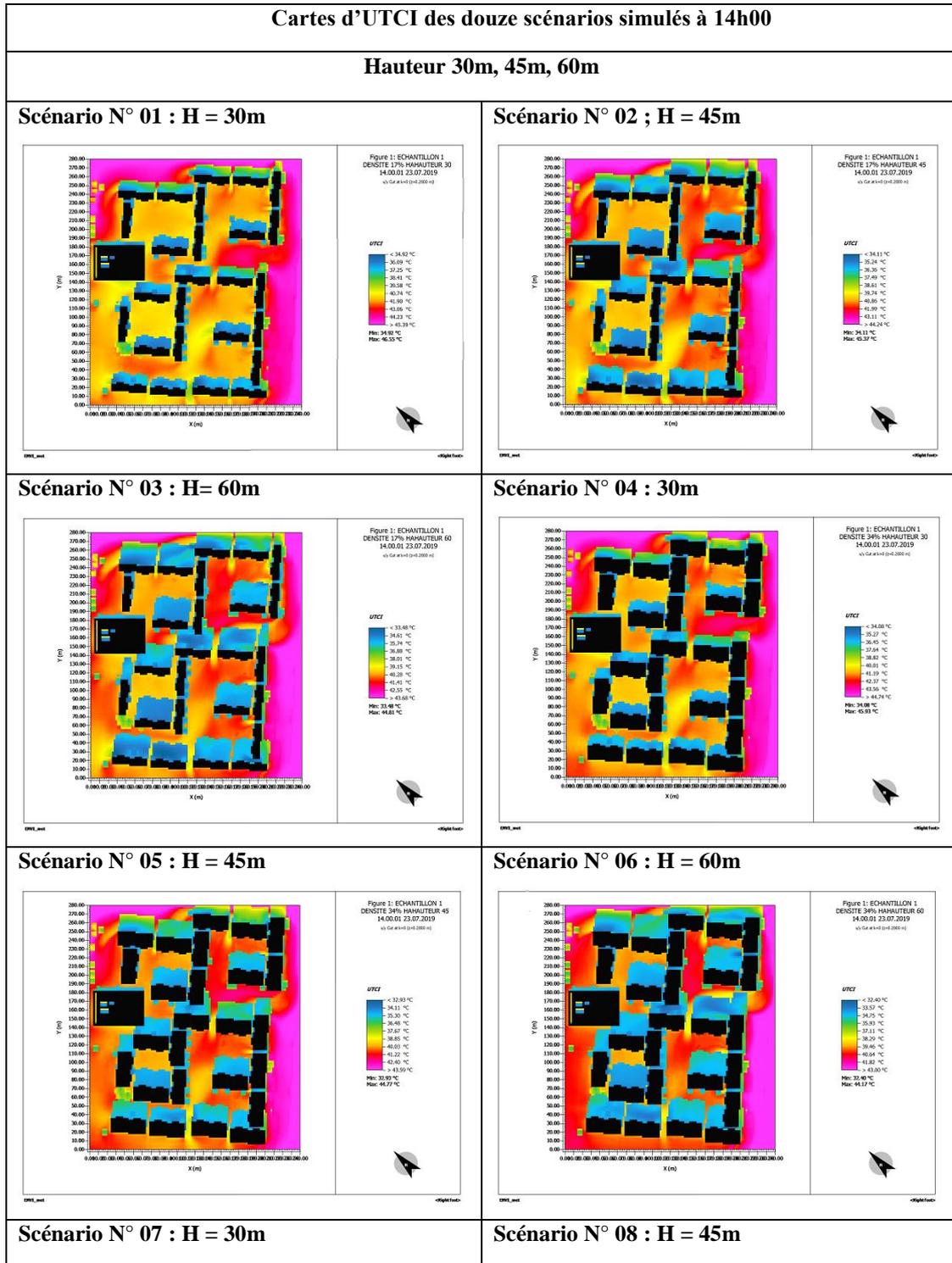
Graphe VI. 16 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 51% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021)

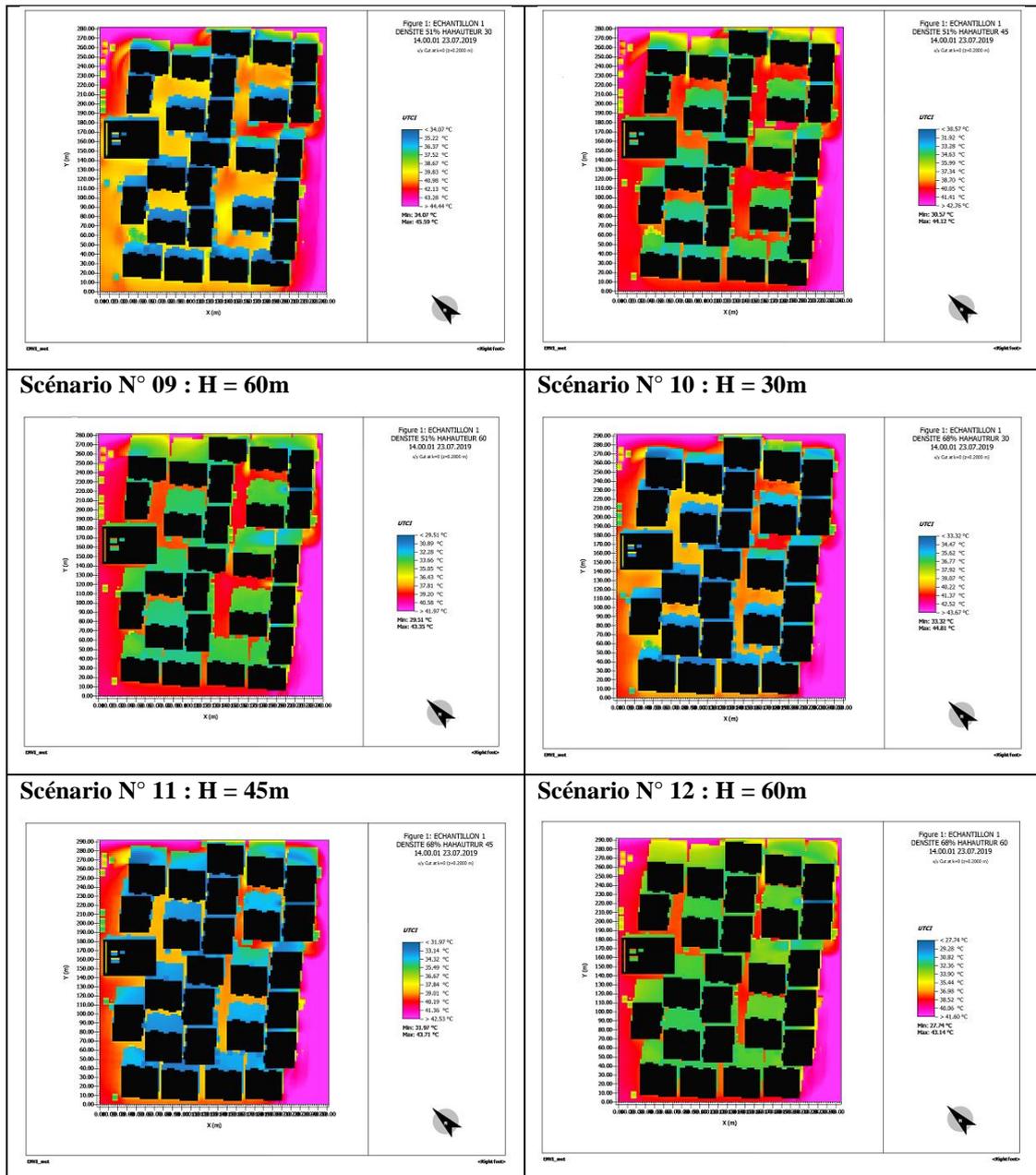


Graphe VI. 17 : Les indices thermiques (PMV, PET, UTCI) pour le cas de densité 68% avec les hauteurs 15, 30, 45 et 60m. (Source : Auteure, 2021)

Les cartes illustrant la répartition spatiales d'UTCI pour les douze scénarios simulés de l'effet combiné de la densité et la hauteur, sont présentées dans le tableau (VI.15) ci-après :

Tableau VI. 15 : Les cartes d'UTCI à 14h00 pour les douze scénarios simulés. (Source : Auteure, 2021)





Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une série d'aménagements urbains en utilisant la simulation numérique avec le logiciel ENVI-met, dans le but d'analyser l'effet de la densité du bâti et de la hauteur des constructions sur l'amélioration du confort thermique extérieur. Les résultats obtenus ont souligné l'importance de l'application de l'approche numérique dans les domaines de la planification urbaine et architecturale liés au microclimat urbain. Cette approche permet de fournir des solutions adaptées aux problèmes liés aux conditions climatiques et au confort thermique dans les espaces urbains extérieurs.

Les résultats ont révélé l'efficacité de deux solutions pour atténuer les paramètres microclimatiques, en particulier les ambiances thermiques en milieu urbain. La première solution consiste à augmenter la densité du bâti, tandis que la deuxième solution consiste à augmenter la hauteur des bâtiments. Ces deux stratégies permettent de créer plus de surfaces ombragées pendant les journées chaudes et ensoleillées. Les résultats des trois méthodes appliquées dans cette étude ont démontré que l'ombrage joue un rôle déterminant dans la régulation des paramètres microclimatiques, et que les espaces ombragés offrent le confort thermique le plus agréable pour les usagers.

L'ombrage, en tant qu'élément générateur, résulte de l'adaptation de la morphologie et de la géométrie des espaces extérieurs, notamment du rapport H/L et (FVC). Ces deux mesures sont étroitement liées à la densité surfacique du bâti et à la hauteur des bâtiments. La densification du tissu urbain, impliquant une augmentation des surfaces bâties, a des effets sur la compacité du bâti en augmentant son volume et sur les indicateurs géométriques fondamentaux (H/L et FVC). Ces variations ont des répercussions sur les paramètres microclimatiques et le confort thermique. Une densité surfacique dépassant le seuil de 50% a un impact minimal, proche de celui d'une densité de 60%. En revanche, l'élévation de la hauteur des bâtiments a un effet significatif sur la régulation des paramètres microclimatiques et le confort thermique.

Cette étude a révélé qu'à partir d'une hauteur de 45m, l'effet sur les différents paramètres climatiques devient négligeable, voire inverse. Une densité surfacique d'environ 50% avec une hauteur de 45m représente le cas optimal pour atteindre un confort thermique maximal. Cependant, il est important de noter que l'effet de la densité bâtie et de la hauteur des bâtiments sur l'amélioration du confort thermique extérieur peut varier en fonction de la forme et de la disposition des bâtiments, ainsi que de la présence d'espaces verts dans la zone urbaine. Dans certains cas, une densité bâtie trop élevée peut réduire la ventilation naturelle et amplifier les conditions de chaleur, ayant des effets négatifs sur la sensation thermique des usagers. Il est également crucial d'équilibrer la hauteur du bâti avec la densité bâtie et la présence d'espaces verts et ouverts pour éviter d'aggraver les conditions de stress thermique extérieur.

En conclusion, la combinaison de différents paramètres tels que la densité surfacique du bâti, la hauteur des bâtiments et la disposition des constructions peut contribuer à améliorer le confort thermique extérieur. La planification urbaine doit prendre en compte ces facteurs pour maximiser les effets positifs pour l'atténuation des températures de l'air et radiantes afin de garantir un environnement urbain confortable et durable.

**Conclusion générale
(Recommandations, et perspectives de
la recherche).**

Conclusion générale

Depuis toujours l'homme cherchait à se développer économiquement, technologiquement, et politiquement, en créant ainsi des villes et des métropoles gigantesques abritant des millions et des millions de populations, ce progrès a généré de nombreux problèmes de climat urbain.

L'éclatement des villes dans tous les sens et leurs urbanisations excessives ont engendré différentes formes urbaines, avec plus de minéralisation des terres nues et agricoles, cela a accentué le phénomène d'îlot de chaleur urbain en milieu urbain.

Outre, l'urbanisation des villes d'aujourd'hui, est une réalité incontournable, d'autant plus que la population croît de jour en jour, cet état des lieux incite donc à trouver des solutions adéquates à ce phénomène surtout en zones de climats hostiles caractérisés principalement par des périodes de surchauffes estivales.

Les périodes de surchauffe urbaine peuvent causer de graves problèmes sanitaires arrivant jusqu'à la mort chez les sujets et un stress thermique extrême pour les usagers des espaces extérieurs.

Face à cette situation, notre étude a essayé d'analyser les principaux facteurs ayant un impact considérable sur les ambiances thermiques extérieures et sur le confort thermique dans les espaces urbains.

À travers cette étude, nous avons mis en évidence la question liée à la morphologie urbaine et ses interactions sur le climat urbain à différentes échelles spatiales, par l'acquisition de trois méthodes qui s'avèrent les plus efficaces en matière de caractérisation du confort thermique en milieux urbains.

La première méthode de la télédétection spatiale et les SIG est devenue une démarche impérative d'actualité qui permet la collecte et l'analyse des données spatiales et climatiques suivant l'objectif ciblé, elle permet donc la quantification à une échelle globale.

Cependant, la deuxième méthode concernant les mesures instantanées in situ, permet une surveillance sur terrain des différents paramètres microclimatiques (T_{air} , T_{mrt} , HR, V_v), à une échelle locale. Par contre, la troisième méthode est celle qui fait appel à la simulation numérique, c'est une démarche de grande envergure, permet de quantifier le confort thermique dans les espaces extérieurs urbains, en reproduisant les différents phénomènes urbains, et la création de divers scénarios d'adaptations, à une échelle plus réduite que celle de la ville.

Grâce à ces méthodes nous avons étudié et analysé l'impact de la morphologie urbaine de deux tissus urbains sur le climat urbain et par conséquent sur le confort thermique dans les espaces extérieurs.

Les deux tissus urbains ont été choisis suivant une classification morphologique et climatique de la ville de Batna, le premier tissu urbain est caractérisé par une très faible densité bâtie et une forme urbaine éclatée, alors que le deuxième tissu est sous forme de bâti compact et continu avec des hauteurs variées et une densité urbaine élevée, ces deux formes urbaines affectent différemment le microclimat et le confort thermique dans les espaces extérieurs.

Le tissu urbain dense (Quartier Kemouni) révèle des résultats favorables en matière de conditions thermiques par rapport à la forme éclatée du quartier 500 logements, qui offre moins de surfaces ombragées durant les heures de stress thermique extrême.

La forme éclatée du quartier 500 logements permet de garantir la lumière du jour pour les bâtiments. Cela peut être pertinent pour la période hivernale lorsque les élévations solaires sont faibles et que le chauffage passif des bâtiments est souhaité. Cependant, pendant l'été long et chaud, lorsqu'une protection solaire est nécessaire, il en résulte un microclimat très médiocre au niveau des espaces extérieurs.

Ensuite, et dans l'objectif d'étudier l'effet de la densité urbaine et de la hauteur des constructions sur la régulation des paramètres microclimatiques et sur le confort thermique extérieur, plusieurs scénarios d'aménagements urbains ont été élaborés.

Les résultats affirment qu'afin d'obtenir d'un max de surfaces ombragées à l'intérieur des tissus urbains, on a deux solutions, la première consiste à l'augmentation de la densité surfacique du bâti et la compacité urbaine sans intervenir sur la hauteur des constructions et cela pour des tissus urbains destinés à des bâtiments de faible hauteur, où les parcelles sont très grandes et la couverture des parcelles est faible. Alors que la deuxième vise à augmenter la hauteur des bâtiments suivant la couverture de surface bâtie, cette stratégie est efficace pour des zones urbaines là où la densité surfacique est très faible.

Recommandations

La présente recherche permet de lever des leviers d'action pour améliorer les conditions de confort thermique en milieu urbain en signalant le rôle de la morphologie urbaine à travers la densification des formes bâties soit horizontalement ou verticalement.

La densification des tissus urbains permet non seulement de générer des ambiances thermiques extérieures moins agressives et des niveaux de confort agréables, mais permet

également d'éviter le phénomène de l'étalement urbain en contribuant à la réservation des milieux naturels pour les futures générations qui s'inscrit dans le cadre du développement durable.

Une densité de 50% de la surface bâtie peut être considérée comme un seuil optimal pour atteindre un meilleur confort thermique dans les espaces extérieurs urbains.

La densification horizontale du cadre bâti est une stratégie très efficace pour des zones urbaines caractérisées d'un climat chaud et sec, et destinée à des constructions de faibles hauteurs afin de minimiser les apports solaires extérieurs et intérieurs, et de bénéficier de l'ombre créée par l'agencement du bâti compact.

La densification verticale avec une hauteur du bâti au-delà des 45m n'a pas d'effet spécifique dans la régulation des paramètres microclimatique et donc sur le confort thermique extérieur.

La hauteur du bâti a un impact climatique sur les environnements extérieurs très significatif. Cette stratégie est pertinente pour les formes urbaines éclatées de très faible couverture surfacique, là où le bâti est distant. Elle permet de bénéficier de l'ombrage projeté par les constructions sur les espaces publics.

La combinaison d'une densité de 50% et une hauteur de 45m est le cas optimum pour des formes urbaines contemporaines.

L'augmentation de la densité surfacique permet d'obtenir plus de surfaces ombragées durant le jour et diminue les températures de l'air diurnes, mais juste après le coucher du soleil, elle accentue l'effet de l'îlot de chaleur urbain en augmentant les températures de l'air nocturnes.

L'augmentation de la hauteur des constructions pour des cas de faible densité, cela permet également d'obtenir plus de surfaces ombragées grâce à l'ombre portée des constructions, elle permet ainsi une meilleure ventilation naturelle afin de rafraîchir l'air chaud dans les espaces extérieurs.

Une meilleure conception des formes urbaines assurant un confort thermique optimum doit être conçue selon plusieurs critères : géographiques, topographiques, et surtout climatiques, car les spécificités du climat local du site se diffèrent d'un site à un autre.

Futurs axes de recherche

Comme tout travail de recherche, notre étude s'est affrontée à des limites, ce qui permet de s'orienter vers d'autres champs de recherche, à savoir :

- L'effet de la densification urbaine horizontale et verticale sur la perception des usagers.
- L'effet de la densification urbaine sur le paysage urbain.
- L'effet de la densification urbaine sur la consommation énergétique.
- L'effet combiné de la morphologie urbaine et le végétal urbain sur la régulation des ambiances thermiques extérieures.
- L'effet combiné de la morphologie urbaine et les matériaux de revêtement et de construction sur l'amélioration des conditions thermiques extérieures.
- L'effet de la forme urbaine sur la psychologie de l'utilisateur.
- À savoir également que notre travail de recherche s'est limité à la saison estivale qui présente la période de surchauffe urbaine, donc il serait pertinent de faire une étude portant sur l'impact de la morphologie urbaine en période hivernale, là où le stress de froid est extrême.

Bibliographie

Ouvrages :

Adolphe, L. (1998). Ambiances architecturales et urbaines. Editions Parenthèses, 1998. Numéros 42 à 43 de Cahiers de la recherche architecturale, ISSN 0243-1742. P 251.

Ansiaux, Jaques R. (1946). La notion de mésoclimat et de microclimat en phytosociologie. Extrait de : Bull. Insi. Agron. S Stat. Rech. Gembloux Tome XV, n° 1-4, p. 99-105.

Allain, R. (2004) : Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville, Paris, A. Colin, coll. U Géographie, 254 p.

Erell, E., Pearlmutter, D. and Williamson, T. (2011). « Urban microclimate: designing the spaces between buildings », Editions Earthscan. 288p.

Escourrou, G. Climat et environnement, Les facteurs locaux du climat. Edition:Masson, 1981.

Escourrou, G. Le climat et la ville. Edition: Nathan, 1991.

Fanger, P. O. (1970). « Thermal comfort ». Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 244 p.

Fellous, Jean-Louis. (2005). Le climat, Idées reçues, Edition : Cavalier Bleu. 127 pages.

Givoni, B. (1976). Man, Climate & Architecture. 2nd Edition, Applied Science Publishers, Ltd., London, PP. 483.

Givoni, B. (1998). Considérations climatiques dans la construction et la conception urbaine. Van Nostrand Reinhold, New York, 109.

GUYOT, G. (1997). Climatologie de l'environnement, Masson, 505 p.

Moser, G. (2009). Psychologie environnementale, les relations homme-environnement. Bruxelles : de Boeck, 298 p. ISBN : 978-2-8041-1753-5.

Musco,F. (2016). Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario. Springer.

Nikolopoulou, M. (Ed.) (2004). *Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach*. Centre for Renewable Energy Sources, EESD, FP5.

Oke, T.R. (1987). Climats de la couche limite. 2^e édition, Methuen Co., Londres, New York, 435.

Saidouni, M. (2000). Eléments d'introduction à l'urbanisme, éd. Casbah édition urbanisme, p101.

Santamouris, M. (2001). Energy and Climate in the Urban Built Environment.1st Edition.

Tabeaud, M. (2000).*La climatologie*. Paris : Armand Colin. Print.

Articles :

ADEUS. (2014). Les notes de l'Agence de développement et d'urbanisme de l'agglomération Strasbourgeoise, Les îlots de fraîcheur dans la ville, Note 140, Novembre, 2014.

Adolphe, L. A. (2001). Simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities, *environment and Planning B: Planning and Design*. 28:183-200.

Ahmadi Venhari, A. Tenpierik, M. & Taleghani, M. (2019). The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *Journal of Arid Environments*, 166, 68-76.

Akbari, H.Pomerantz, M, & Taha, H. (2001). Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas. *Solar Energy*, 70, 295-310.

Ali-Toudert, F. Djenane, M.Bensalem, R. Myer, H. (2005) Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria, *Clim Res* 28: 243–256, 2005.

Ali-Toudert, F. Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot dry and dry climate, *Building and environment*, 41(2), 94-108.

Amrouni, H. (2013). *Batna terre des hommes libres*. memoria.dz.

Angelotti, A. Dessì, V. Scudo, G. (2007). The evaluation of thermal comfort conditions in simplified urban spaces: the COMFA+ model. In: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete island, Greece.

Arantes. L, Marry.S, Baverel. O et Quenard. D, (2016). « Efficacité énergétique et formes urbaines : élaboration d'un outil d'optimisation morpho-énergétique », *Cybergeo: European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 777.

Arnfield, A.J. (1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*. Volume 14, Issue 2, 117-131.

Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulences, exchanges of energy and water ant the urban heat islands. *International journal of climatology*, n°23, p.1-26.

ASHRAE (2001). *ASHRAE fundamentals handbook 2001 (SI Edition)*, Vol. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, ISBN: 1883413885.

AUCAME (Agence d'études d'urbanisme de CAEN-Métropole). (2008). La notion de densité. N° 02.

Baltazar, S. (2014). New bioclimatic maps of Lisbon. Spatial modelling of physiological equivalent temperature. *Finisterra - Revista Portuguesa de Geografia*, pages 81 – 94.

Bart De Maerschalck , Stijn Janssen, Jean Vankerkom, Clemens Mensink, Aad van den Burg and Paul Fortuin. (2007). CFD Simulations of the impact of a line vegetation element along a motorway on local air quality.

Baruti, M.M. Johansson, E. and Åstrand, J. (2019). Review of studies on outdoor thermal comfort in warm humid climates: challenges of informal urban fabric. *Int J Biometeorol* **63**, 1449–1462.

Benyahia, L. Dridi, H. (2017). L'analyse diachronique de la superficie urbaine par télédétection et SIG d'une grande ville algérienne (Batna). *Sciences & technologie. D, Sciences de la terre. Volume 0, Numéro 45, Pages 101-108.*

Blazejczyk, K. Epstein, Y. Jendritzky, G. Staiger, H. Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology* 56, 515–535.

BOKO N. P. M. VISSINE E. W. HOUSSOU S. C. BŁAŚEJCZYK K. (2013). Application de l'indice universel de charge thermique dans le contexte africain : exemple de cotonou (republique du benin). *XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie.*

Boucheriba, F. (2021). L'urbanisme durable à travers l'interaction: formes urbaines/climat cas de l'habitat individuel à la ville d'Ain Smara (Algérie). *Algerian journal of arid environment. vol. 11, n°2, 139-154.*

Boucheriba, F. (2022). Adaptation of Urban Law to Micro-Climate parameters Inalgeria-Case of Collective Housing in a Semi-Arid Area. *Int J Innov Stud Sociol Humanities. 7(6): 42-52.*

Boudjellal, L. Bourbia, F. (2017). An evaluation of the cooling effect efficiency of the oasis structure in a Saharan town through remotely sensed data, *International Journal of Environmental Studies.*

Bouketta, S et Bouchahem, Y. (2012). L'effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et la ventilation naturelle extérieure. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°4. 639 – 659639.*

Boukhelkhal, I. Bourbiab, F. (2016). Thermal Comfort Conditions in Outdoor Urban Spaces: Hot Dry Climate -Ghardaia- Algeria. *4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island (UHI) 2016. Procedia Engineering 169 ; 207 – 215.*

Bourbia, F. Awbi, H. (2004). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate, Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renewable Energy* 29 (2):249-262.

Boutellis, T. Bouchair, A. (2022). Experimental investigation on thermal comfort assessment in public open spaces: Case of Jijel, Algeria. *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES* ; 371–387.

Bröde, P. Krüger, E.L. Rossi, F.A. Fiala, D. (2012). Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil. *International journal of biometeorology* 56, 471–480.

Bruse, M. Fleer, H. (1998). Simulating Surface-Plant-Air Interactions inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model. *Environ. Model. Softw*, 13, 373–384.

Bruse, M. (2009). ENVI-met. <http://www.envi-met.com>.

Cantat, O. (2004). « L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps », *Norois* [En ligne], 191.

Cantini, A. Angelotti, A. Zanelli, A. (2019). A lightweight textile device for urban microclimate control and thermal comfort improvement: concept project and design parameters. *Proceedings of the TensiNet Symposium. Softening the habitats. Politecnico di Milano. Italy.*

CAT-MED à l'échelle du territoire marseillais. Agence d'urbanisme de l'agglomération marseillaise. Février 2012.

Cianfarani MA. (1994), *Batna, la porte du Sud*, magazine *Pieds Noirs d'Hier et d'Aujourd'hui* n°48, France.

Chatzidimitriou, A. Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society* 33, 85–101.

Chebli, M. Charfi, S. Dahech, S. (2020). Spatio-temporal temperature spread in the Kairouan agglomeration (Tunisia) during the summer of 2019. *Climatologie*, 17, 4.

Cheela, VRS, John, M., Biswas, W. et Sarker, P. (2021). Combating Urban Heat Island Effect. A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. *Buildings* 11, no. 3: 93.

Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X. et 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.

Cheng, V. Ng, E. Chan, C. Givoni, B. (2012). Outdoor thermal comfort study in a sub-tropical climate: a longitudinal study based in Hong Kong. *International journal of biometeorology* 56, 43–56.

Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J.-L., Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* 18, 33–57.

Colombert, M. Salagnac, J.L. Morand, D et Diab, Y. (2012). « Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines », *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement.

CPDT (Conférence Permanente du Développement Territorial Wallonie) – NOTE DE RECHERCHE, numéro 36 : DENSITÉ ET DENSIFICATION – NOVEMBRE 2012.

D'Ambrosio Alfano, F.R. Palella, B.I. Riccio, G. (2011). Thermal environment assessment reliability using temperature-humidity indices. *Industrial health* 49, 95–106.

Deng, J-Yu. Wong, NH. (2019). Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts, *Sustainable Cities and Society*.

Djongyang, N. Tchinda, R. Njomo, D. (2010). "Thermal comfort: A review paper," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 14(9), pages 2626-2640.

Doulos, L. Santamouris, M. Livada, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Solar Energy*. Volume 77, Issue 2, 2004, Pages 231-249.

ElHozayen. A. (2013). Letraitementdesespacesurbainsdans lesvillesauclimatchaudet secpour diminuer leursproblèmes climatiques. Étudedecas: lavilleduCaire. *Sciences agricoles*.

Eliasson, I. Knez, I. Westerberg, U. Thorsson, S. Lindberg, F. (2007). Climate and behaviour in a Nordic city. *Landscape and Urban Planning*, Volume 82, Issues 1–2, Pages 72-84.

Elwya, I. Ibrahima, Y. Fahmya, M. Mahdy, M. (2018). Outdoor microclimatic validation for hybrid simulation workflow in hot arid climates against ENVI-met and field measurements. 5th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER. / *Energy Procedia* 153, 29–34.

Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment* 40, 1591–1601.

- Emmanuel, R., Rosenlund, H., & Johansson, E. (2007). Urban shading—a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Climatology*, 27, 1995–2004.
- Farah, A. Algouti, A. Algouti, A. Ifkirne, M. Rafik, A. (2021). Remote Sensing for Spatio-temporal Mapping of Land surface temperature and Surface Energy Fluxes in the Bouregreg-Chaouia Region of Morocco. *JEAS* 2(1): 23-35.
- Fiala, D. Havenith, G. Bröde, P. Kampmann, B. Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 56, 429–441.
- Fisher, B. Kukkonen, J. Piringer, M. Rotach, W. and Schatzmann, M. (2005). Meteorology applied to urban air pollution problems: concepts from COST 715. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 5, 7903–7927.
- Foissard, X. Quenol, H. Dubreuil, C. (2013). Analyse et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération Rennaise. XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Conférence : Actes du 26e colloque de l'AIC À : Cotonou, Bénin.
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.* ;(United States) 92.
- Gagge, A.P. Stolwijk, J. and Nishi, Y. (1971). An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *ASHRAE Transactions*, 77, 247-262.
- Giannini, M. B. Belfiore, O. R. Parente, C and Santamaria, R. (2015). Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 8 (3): 83 – 90.
- Greuillet, C. et Galsomiès, L. (2013). “L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air, *GéoProdig, portail d'information géographique*.
- Grimmond, C.S.B. Potter, S.K. Zutter, H.N. and Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International journal of climatology Int. J. Climatol.* 21: 903–913.
- Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R. (2002) Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41, 792-810.
- Gulyas, A. and Matzarakis, A. (2009). Seasonal and spatial distribution of physiologically equivalent temperature (pet) index in hungary. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*.

Hamel, KH. and Mazouz, S. (2007). The compact city: an urban path towards sustainability in arid areas, Sustainable Construction, Materials and Practices - Challenge of the Industry for the New Millennium, Portugal, 2007, 650 – 657.

Hämmerle, M. Gál, T. Unger, J. Matzarakis, A. (2011). Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theor Appl Climatol* **105**, 521–527.

Hassani, N. et Drogue, G. (2020). Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019. *Climatologie*, 17, 8.

Hattab, S & Ziane, M. (2003). Le coefficient d'occupation du sol cos et la promotion des techniques modernes de la gestion urbaine -cas de la ville d'Alger. *Courrier du Savoir – N°04*, Juin 2003, pp. 29-33.

Havenith G, Fiala D. Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. *Compr Physiol*. 2015 Dec 15;6(1):255-302. doi: 10.1002/cphy.c140051. Erratum in: *Compr Physiol*. 2016;6(2):1134. PMID: 26756633.

Hillier, B; (1987) La morphologie de l'espace urbain: l'evolution de l'approche syntaxique. *Architecture et Comportement/Architecture and Behaviour* , 3 (3) pp. 205-216.

Hillier. B. Hanson. . (1987). Introduction: un second paradigme. *Arch. And Comport/Arch.Behav*.Vol 3.n 3. P. 201-203.

Honjo,T. (2009). Thermal Comfort in Outdoor Environment. *Global Environmental Research* ©2009 AIRIES 13/2009:43-47 printed in Japan.

Honvo, S, Dossou-Yovo, C. (2021). Mutations Socio-Spatiales Et Extension Urbaine Au Sud Du Plateau De Sakété (Sud-Est Du Benin). *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 28(1), 01-16.

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature. A universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71–75.

Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings, Special Issue on Thermal Comfort Standards* 34, 661–665.

Huttner, S. and Bruse, M. (2009, June–July). Numerical modelling of the urban climate – A preview on ENVI-met 4.0. Paper presented at the 7th International Conference on Urban Climate ICUC7, Yokohama, Japan.

ISO 7730, (2005). Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. Edition AFNOR.

ISO 7243, (2017). Ergonomie des ambiances thermiques — Estimation de la contrainte thermique basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir).

Izard, J.L. (2000). Microclimat urbain laboratoire ABC Marseille.

Jendritzky G, de Dear R, Havenith G (2012) UTCI—why another thermal index? *Int J Biometeorol* 56(3):421–428.

Johansson, E Emmanuel, R. (2006). L'influence du design urbain sur le confort thermique extérieur dans la ville chaude et humide de Colombo, Sri Lanka. *Int J Biométéorol*, 51:119–133.

Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41, 1326–1338.

Johansson, E. Thorsson, S. Emmanuel, R. Krüger. E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - the need for standardization *Urban Clim.*, 10, pp. 346-366.

Johansson, E. and Yahia, MW. (2010). Vers une conception urbaine sensible au climat : la nécessité de modifier les règles d'urbanisme actuelles.

Johnson, T. G. and Watson, I. D: 1984, 'The Determination of View-Factors in Urban Canyon's, *J. Clim. Meteorol.* 23, 329- 335.

Karimi Afshar, N. Karimian, Z. Doostan, R. Habibi Nokhandan, M. (2018). Influence Of Planting Designs On Winter Thermal Comfort In An Urban Park. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. Volume 26 Issue 3: 232–240.

Kenny, N.A. Warland, JS. Brown, RD. Gillespie, TG. (2009). Part B: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity, *Int J Biometeorol*.

Knez, I. and Thorsson, S. (2006) Influence of Culture and Environmental Attitude on Thermal, Emotional and Perceptual Evaluations of a Square. *International Journal of Biometeorol*, 50, 258-268.

Krüger, E.L., Minella, F.O. & Matzarakis, A. (2014). Comparison of different methods of estimating the mean radiant temperature in outdoor thermal comfort studies. *Int J Biometeorol* 58, 1727–1737.

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.

Latini, G. R., Grifoni, C., Tascini, S. (2010). Thermal Comfort and Microclimates in Open Spaces, *Journal of Building*.

Lau, K.K.-L., Lindberg, F., Rayner, D., Thorsson, S. (2014): The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: a study of three European cities. *Int. J. Biometeorol.* 59, 799–814.

Lavoye, F., Thellier, F. (2008). Le confort thermique dans les bâtiments. (hal-02180957).

Lebaut, S., Hassani, N., Drogue, G. (2021). Mesure et détection des îlots de chaleur et de fraîcheur en milieu tempéré semi-continental : l'exemple du territoire de Metz Métropole. 34e colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie, Casablanca, Maroc. fhal-03465195f.

Levy, A. (2005). Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, n°(sup) 122, 25- 48.

Lindberg, F., Holmér, B., Thorsson, S. (2008). Solweig 1.0 - modelling spatial variations of 3d radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology*, Volume 52 (7), pp. 697-713.

Lindberg, F., Grimmond, C.S. (2011). The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 311-323.

Lin, T.P. and Matzarakis, A. (2008) Tourism Climate and Thermal Comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *International Journal of Biometeorology*, 52, 281-290.

Li, K., Zhang, Y., Zhao, L., 2016. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China. *Energy and Buildings*.

Maignant, G. (2005). Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable. In *Actes du colloque Développement urbain durable, gestion des ressources et gouvernance*.

Mansouri O, Bourbia F, Belarbi R. (2017). Effect of urban albedo surfaces on thermal comfort. *J. Fundam. Appl. Sci*, 9(2), 878-896.

Matallah, M.EL. Alkama, D. Ahriz, A. Attia, SH. (2020). Assessment of the Outdoor Thermal Comfort in Oases Settlements. *Atmosphere* 2020, 11, 185.

Matzarakis, A. (2010). RayMan. <http://www.urbanclimate.net/rayman>.

Matzarakis, A. (2012). 132: Linking urban micro scale models-The models RayMan and SkyHelios.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54, 131-139.

Matzarakis, A., Gangwisch, M., & Fröhlich, D. (2021). RayMan and SkyHelios Model.

Maurus Baruti, M. Johansson, E. Åstrand, J. (2019). Review of studies on outdoor thermal comfort in warm humid climates: challenges of informal urban fabric. *International Journal of Biometeorology*.

Middel, A. Selover, N. Hagen, B. Chhetri, N. (2016). Impact de l'ombre sur le confort thermique extérieur - une étude de terrain saisonnière à Tempe, Arizona
Journal international de biométéorologie, 60, p. 1849 – 1861.

Monteiro L, M. (2005). Review of numerical modelling of outdoor thermal comfort. The 2005 World Sustainable Building Conférence. Tokyo.

Morakinyo, TE. Lau, KK-L. Ren, C, Ng E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving, *Building and Environment*.

Morille, B. (2008). Rapport de simulation. Extension du groupe scolaire Ivry Levassor – démonstrateur bioclimatique et écoresponsable. Volet bioclimatique – phase 3 : Simulation du microclimat sur le projet retenu par la maîtrise d'œuvre.

Musy, M. Molines, N. Pham, T. Siret, D. Groleau, D. (2006). Elaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel Rapport final du CERM. ADEQUA.

Musy, M. (2008). Approches physiques des ambiances urbaines caractérisation et conception. CERMA – UMR CNRS.

Nikolopoulou, M., N. Baker et K. Steemers, 2001, Thermal comfort in outdoor urban spaces : the human parameter, *Solar Energy*, 70, 3, pp. 227-235.

Nikolopoulou, M et Lykoudis, S (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries, *Building and Environment*, V.41, pp.1455-1470.

Nikolopoulou, M. and Steemers, K. (2003) Thermal Comfort and Psychological Adaptation as a Guide for Designing Urban Spaces. *Energy and Buildings*, 35, 95-101.

Noro, M. Lazzarin, R. (2015). Urban heat island in Padua, Italy: Simulation analysis and mitigation strategies. *Urban Climate*. Volume 14, Part 2, Pages 187-196.

Oke, T.R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands, *Atmosphere*, 14:4, 268-277.

Oke, T.R. (1982). The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.

Oke, T-R. (1988). « Street Design and Urban Canopy Layer Climate », *Energy and buildings* n°11, Canada, pp.103-113.

Parsons KC. (2003). *Human thermal environments: the effect of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance*. Taylor & Francis, New York.

Perrineau, H. (2013). Développement d'un outil, basé sur le logiciel de simulations thermiques dynamiques TRNSYS, permettant de réaliser des études paramétriques pour évaluer le confort extérieur avec la température perçue.

Peter.J. Crank. Middel, A. Wagner, M. Hoots, D. Smith, M. Brazel, A. (2020). Validation of seasonal mean radiant temperature simulations in hot arid urban climates. *Science of The Total Environment*. Volume 749, 20, 141392.

Pickup, J. and de Dear, R. (2000). An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT-SET*)-Part I—The Model and Its Assumptions. 5th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology, Macquarie University, Sydney, 279-283.

Piéchaud, J.P. (2008). *Ville et développement durable*. CITEGO.

Piombini, A. (2013). Contexte spatial des ambiances urbaines et usage des lieux. *Ambiances*.

Prado. R. T. A, Ferreira F. L, (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 4, Pages 295-300, ISSN 0378-7788.

Ratti, C. Raydan, D. Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings* 35 (2003) 49–59.

Rizwan Ahmed Memon, dennis Y.C. Leung, Liu Chunho. (2007). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20(2008) 120–128.

Sahabi-Abed, S. and Kerrouche, M. (2017) Indices Bioclimatiques : Etude du cas de la Vague de Chaleur en Algérie, Dans la Perspective de l'Elaboration de Cartes de Vigilance : « Humidex » et « PET ». *JAMA*, Vol. 1, 75-82.

Santamouris. M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1:1, 123-150.

Santamouris. M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*, Volume 103.

Saouli, R. A. Benhassine, N. Oularbi, A. (2020). A spatio-temporal retrospective of the urban sprawl of Annaba (Algeria). *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 12(2) : 825-844.

Sekertekin, A. Bonafoni, S. (2020). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. *Remote Sensing*, 12(2), 294.

Shahidan, M.F. (2015). Potential of Individual and Cluster Tree Cooling Effect Performances Through Tree Canopy Density Model Evaluation in Improving Urban Microclimate. *Current World Environment* 10(2): 398-413.

Sinsel, T. Simon, H. Ouyang, W. Gusson, C.D.S. Shinzato, P. Bruse, M. (2021). Implementation and evaluation of mean radiant temperature schemes in the microclimate model ENVI-met. *Urban Climate*.

Sözen, I. Koçlar Oral, G. (2018). Outdoor thermal comfort in urban canyon and courtyard in hot arid climate: A parametric study based on the vernacular settlement of Mardin. *Sustain. Cities Soc.* 48:101398.

Staiger H, Bucher K, Jendritzky G (1997) Gefühlte Temperatur Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. *Annalen der Meteorologie* 33:100–107.

Staiger H, Laschewski G, Grätz A (2012) The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int J Biometeorol* 56:165–176.

Stewart, I.D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Int.J.Climatol.*, 31 (2), pp. 200-217.

Taha, H., Akbari, H. & Rosenfeld, A. Heat island and oasis effects of vegetative canopies: Micro-meteorological field-measurements. *Theor Appl Climatol* 44, 123–138 (1991).

Taleghani, Mohammad, 2018. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Elsevier Ltd.

Tebbani.H & Bouchahem .Y (2016) Caractérisation du confort thermique dans les espaces extérieur « Cas de la ville d'Annaba » Revue « Nature & Technologie ». *Sciences de l'Environnement*, n° 15.

Teller, J., & Azar, S. (2001). Townscope II—A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy*, 70, 187-200.

Thorsson, S., Lindqvist, M., & Lindqvist, S. (2004). Conditions bioclimatiques thermiques et modèles de comportement dans un parc urbain à Göteborg, Suède. *Journal international de biométéorologie*, 48, 149-156.

Thorsson, S., F. Lindberg, I. Eliasson, B. Holmer (2007) Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International journal of climatology* 27(14):1983- 1993.

Tong, S. Wong, N.H. Tan, Ch.L. Jusuf, S.K. Ignatius, M. Tan, E. (2017). Impact of urban morphology on microclimate and thermal comfort in northern China. *Solar Energy* 155 (2017) 212–223.

Touati, A, (2015). L'argument de densité, enquête sur l'histoire d'une notion en vogue. https://www.citego.org/bdf_fiche-document-58_fr.html.

Troche, JP et al. (2007). Comment prendre en compte le microclimat local dans la conception du projet urbain. En Colloque : Urbanisme et environnement climatique. Nantes : ADEME (Direction Régionale des Pays de la Loire).

Tumini, I. Higuera García, E. et Baereswyl Rada, S. (2016). Modélisation du microclimat urbain et du confort thermique : stratégies de rénovation urbaine, *Journal international des technologies du bâtiment durable et du développement*.

Van Hove, L.W.A. Jacobs, C.M.J. Heusinkveld, B.G. Elbers, J.A. van Driel, B.L. Holtslag, A.A.M. (2015). Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration, *Building and Environment*, Volume 83, Pages 91-103, ISSN 0360-132.

VDI (1998). Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Climate. VDI Guideline 3787. Beuth, Berlin.

Verhage Roelof et Leroy Marie. (2014). « Développement urbain durable : Comment apprendre des expériences d'écoquartiers ? », *Géocarrefour* [En ligne], vol. 89/4.

Voogt, J. A. (2002). Urban Heat Island. In *Encyclopedia of Global Environmental Change* (Vol. 3, pp. 660-666). Chichester: Wiley.

Voogt, J.A., 2004. *Urban Heat Islands: Hotter Cities*. American Institute of Biological Sciences.

Walls, W. Parker, N. Walliss, J. (2015). Designing with thermal comfort indices in outdoor sites. 49th International Conférence of the Architectural Science Association.

Wenjie Ji, Yingxin Zhu, Heng Du, Bin Cao, Zhiwei Lian, Yang Geng, Shuli Liu, Jianyin Xiong, Changzhi Yang. (2022). Interpretation of standard effective temperature (SET) and explorations on its modification and development, *Building and Environment*, Volume 210, 108714.

Yoshino, M., 1990-1991, Development of urban climatology and problems today, *Energy and buildings*, vol. 15, pp. 1-10.

Zare, S. Hasheminejad, N. Shirvan, H.E. Hemmatjo, R. Sarebanzadeh, K. Ahmadi, S.(2018).Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year, *Weather and Climate Extremes*, Volume 19, Pages 49-57.

Zhang, S., & Lin, Z. (2020). Standard effective temperature based adaptive-rational thermal comfort model. *Applied Energy*, 264, 114723.

Thèses et mémoires :

Abboud Abou Djaoude, R. (2020). Développement d'une nouvelle approche d'évaluation du confort dans le contexte des véhicules électriques connectés ; Thèse de doctorat. Université Paris sciences et lettres.

Adam, M. (2010). Densité : Etude transversale de l'évolution de la forme urbaine d'un quartier de grands ensembles entre arguments environnementaux et perception habitantes. Mémoire master STEU. Ecole supérieure d'architecture de Nantes.

Ait-Ameur, K. (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du micro climat dans les espaces publics : validation d'un système d'indicateurs « morpho-climatiques » et d'un indicateur de confort, thèse de doctorat, sciences pur l'ingénieur, université de Nantes, Nantes, 288p.

Ahmed Ouameur F. (2007) morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics « étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec », mémoire présenté pour l'obtention du grade de maître des sciences (m.se.), école d'architecture faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels université Laval Québec.

Athamena, K. (2012). Modélisation et Simulation des Microclimats Urbains : Etude de L'impact de la Morphologie Urbaine sur le Confort Dans les Espaces Extérieurs. Cas des éco-quartiers, Thèse de doctorat, Spécialité : architecture filière doctorale : ambiances architecturales et urbaines, Ecole centrale de Nantes.

Azam, Marie-Hélène. "Simulation du bâtiment au quartier : Exploration du potentiel de la PGD paramétrique comme méthode de réduction de modèles pour des calculs précis et rapides. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

Benamouma Djamila (2018). L'impact de la géométrie des espaces sur le confort thermique extérieur (Cas de la ville de Batna). Mémoire de magister. Département d'architecture-Université Mouhamed kheider de Biskra.

Bendib. Abdelhalim. (2017). GEOMATISATION DES INSTRUMENTS D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE POUR UNE GESTION COHERENTE ET DURABLE DE L'ESPACE - CAS DE LA VILLE DE BATNA. Institut des sciences de la terre et de l'univers Université de Batna 02.

Boucheriba, F. (2004). IMPACT DE LA GEOMETRIE DES CANYONS URBAINS SUR LE CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR – Cas du Coudiat de Constantine – Mémoire de magister. Université Mentouri de Constantine.

Boucheriba, F., (2017). IMPACT DE LA DENSITE URBAINE SUR LE MICROCLIMAT « Cas de l'habitat individuel à la ville d'Ain Smara ». Thèse de doctorat. Université Constantine 3

Boukhabla, M. (2015). L'influence des facteurs climatiques sur la modification de l'îlot de chaleur urbain dans une rue « canyon, dièdre et dégagée », Cas des lotissements Biskra. Thèse de doctorat ; Université Mohaed Khider Biskra.

Boukhezer, H. (2002). Caractérisation environnementale des tissus urbains en vue de leur classification : application à trois quartiers de la ville d'Oran Centre-ville, « Haï Tarik », « Maraval » et de la ZHUN « Haï Otmania ». Nantes : CERMA | DEA Ambiances architecturales et urbaines option Thermique et Energétique CERMA-1995-2006.

Boussoualim, A. Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur. Université de Nantes. Nantes.

Bozonnet, E. (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : cas de la rue Canyon Thèse de doctorat. La Rochelle.

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.

Foures, D. (2015). Validation de modèles de simulation. Thèse de doctorat en génie industriel. Toulouse.

Djaghroui, D. (2021). Fluctuation des ambiances thermiques extérieures sous l'effet du végétal dans les zones arides. « Cas d'une placette à Biskra ville ». Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider. Biskra.

Fahed, J. (2018). Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Thèse de doctorat. Université de Toulouse.

Fouchier, V. (1997). Des fortes densités urbaines, les villes nouvelles d'Ile de France dans l'espace métropolitain. Thèse de doctorat, Institut français d'urbanisme, Université de Paris VIII.

Ghaffour, W. Etude de l'effet de la morphologie urbaine sur le confort thermique des espaces extérieurs ». Cas d'étude : La ville de Tlemcen. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen.

Gherraz, H. (2021). L'impact de l'espace vert sur le microclimat urbain et l'utilisation des espaces extérieurs (Cas de la ville de Constantine). Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider. Biskra.

Grignon-Massé, L. (2010). Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au

confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine. Thèse de doctorat. Centre énergétique et procédés Paris.

Grosdemouge, V. (2020). Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des Eco-Quartiers. Thèse de doctorat. Université de la Réunion.

Hamel, KH. (2005), « La ville compacte : une forme urbaine d'une ville durable en régions arides ». Mémoire de magister, Université de Biskra, département d'architecture.

Kedissa, CH. (2010). Impact de la géométrie des espaces extérieurs sur le microclimat urbain (Cas de places). Mémoire de magister. Département d'architecture et d'urbanisme- Université Mentouri de Constantine.

Knodel Susan Honjo. (2012). Evaluation de l'environnement thermique urbain comme outil d'aménagement du territoire. Etude de cas dans deux quartiers de la ville de São Paulo (Brésil). Mémoire de Master en Sciences de l'Environnement. Institut des Sciences de L'environnement, Université de Genève.

Mouada, N. (2019). Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique et la marchabilité dans les espaces publics extérieurs. Cas de la ville de Sidi Okba. Département d'architecture et d'urbanisme- Université de Biskra.

Moujalled B. « Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés », Thèse de doctorat, Lyon 2007.

Sadek, R. (2022). ILOTS DE CHALEUR URBAINS : COMMENT ADAPTER LES OUTILS NUMERIQUES A LA CONCEPTION ARCHITECTURALE ? CAS D'ETUDE EN France. Université de Liège, Liège, Belgique.

Szücs, Á. (2005).Caractérisation des ambiances des stades modernes du point de vue du confort aérothermique des spectateurs : contribution à l'approche multicritères aérothermique, visuelle et acoustique. Thèse de doctorat. La Rochelle.

Tsoka, S. (2011). Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons : application au cas des éco-quartiers.

Villadiego Bernal K. (2014). Une lecture de la forme urbaine et des microclimats : le cas de Barranquilla. Thèse de doctorat en Urbanisme et aménagement. France.

Rapports :

Annexe nationale de l'eurocode EN 1991-1-4.

Monographie de la wilaya de Batna (2007).

(PDAU-Batna, 2011).

Sites internet :

(Collectivités viables.org, 2013)

(l'internaute.fr)

(www.envi-met.com)

(www.ladybug.tools)

(vizea.fr, Perrine Rivoal, 2019)

www.geoinformatik.uni-main

Annexes

Annexe 01:

1.1.Le logiciel Origin Pro, 2018 :

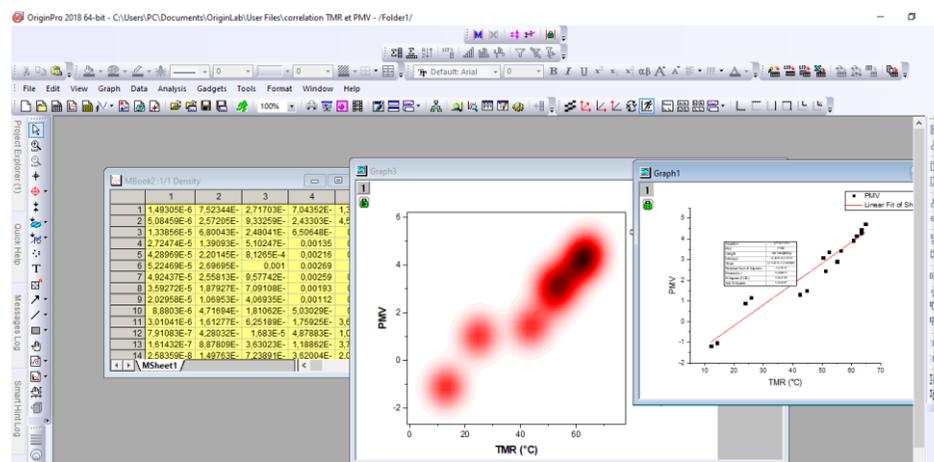
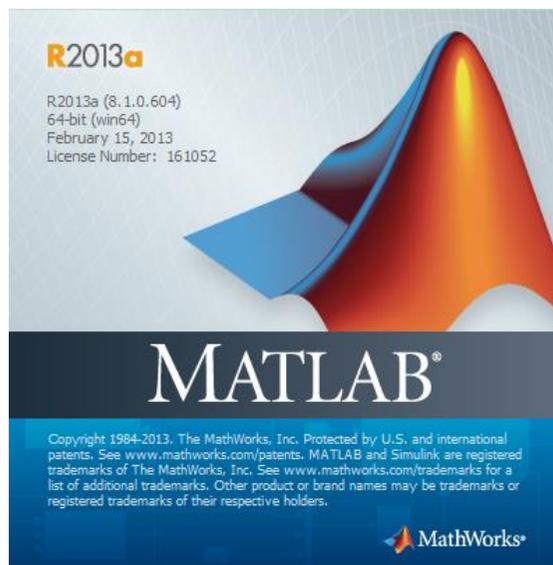


Figure 1.1: L'interface du logiciel Origin Pro, 2018. (Source : Auteure)

Annexe 02 :

2.1. Le code Matlab effectué pour le calcul de la TMR :



```
MATLAB ▶ R2013a ▶
Editor - D:\bureau fichiers\temperature.m
correlation.m × temperature.m ×
1 function [ TMR ] = temperature(tg,va,ta)
2 %UNTITLED Summary of this function goes here
3 % Detailed explanation goes here
4
5 TMR=((tg+273)^4+2.5*10^8*va^0.6*(tg-ta))^0.25-273
6
7
8
end
```

Figure 2.1 : Le code Matlab pour le calcul de la TMR. (Source : Auteure)

Annexe 03 :

3.1. Les données nécessaires pour le calcul de coefficient de forme (Cf) et le rapport des surfaces exposées/ surfaces non exposées

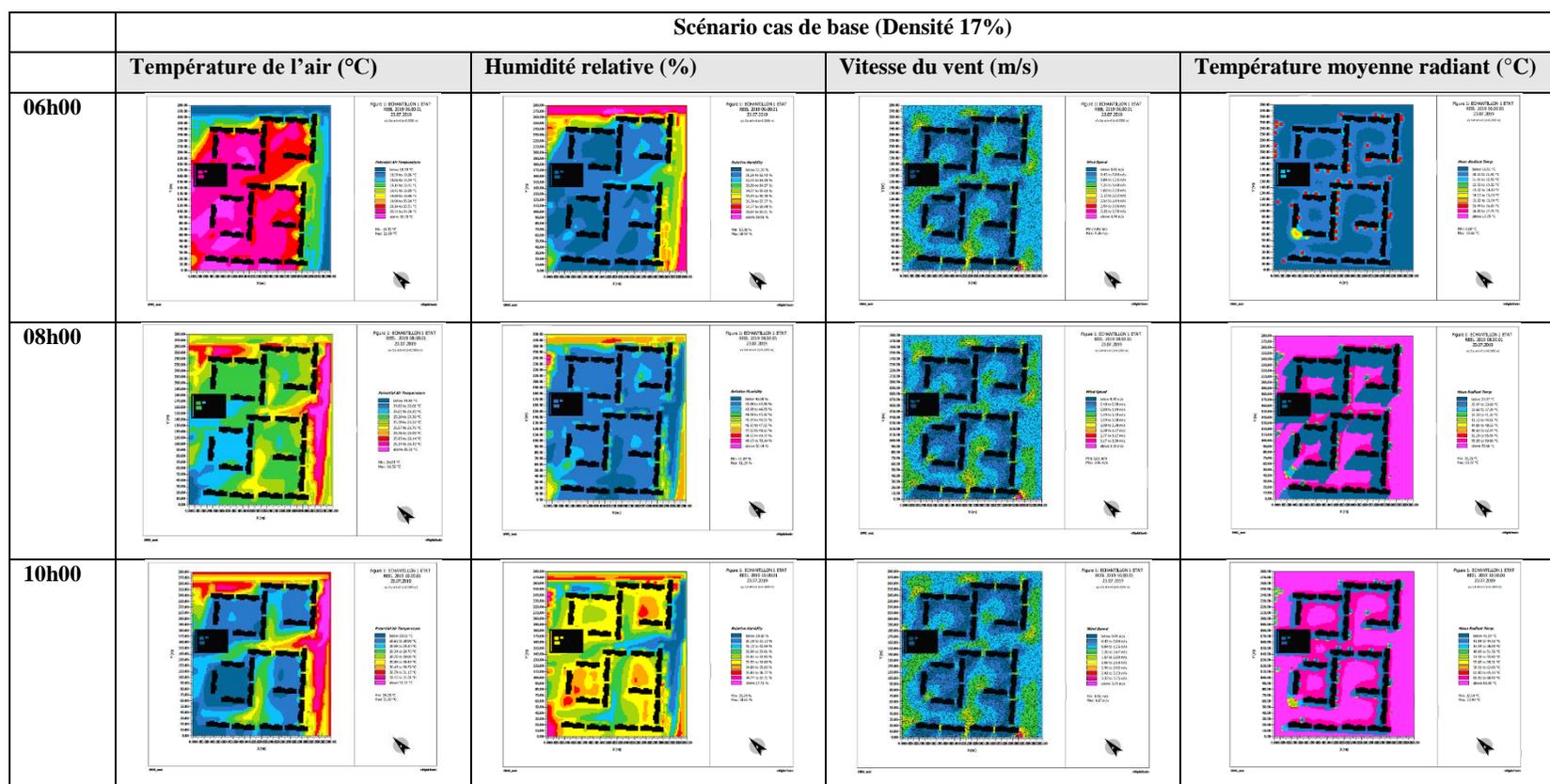
	Densité 17%	Densité 34%	Densité 51%	Densité 68%
Surface urbaine totale (m ²)	Hauteur initiale			
	65824	65824	65824	65824
	Hauteur 30			
	65824	65824	65824	65824
	Hauteur 45			
	65824	65824	65824	65824
	Hauteur 60			
	65824	65824	65824	65824
Surface totale bâtie (m ²)	11476	21252	31028	40804
	Hauteur 30			
	11476	21252	31028	40804
	Hauteur 45			
	11476	21252	31028	40804
	Hauteur 60			
11476	21252	31028	40804	
Volume totale bâti (m ³)	Hauteur initiale			
	162044.8	310489.6	458934.4	607379.2
	Hauteur 30			
	304624	595648	886672	1177696
	Hauteur 45			
	450136	886672	1323208	1759744
	Hauteur 60			
595648	1177696	1759744	2341792	
Surfaces totales d'enveloppes (m ²)	Hauteur initiale			
	60075.2	81992.8	104697.6	127304
	Hauteur 30			
	107096	141640	176184	210728
	Hauteur 45			
	155084	202012	248940	295868
Hauteur 60				
203072	262384	319696	381008	

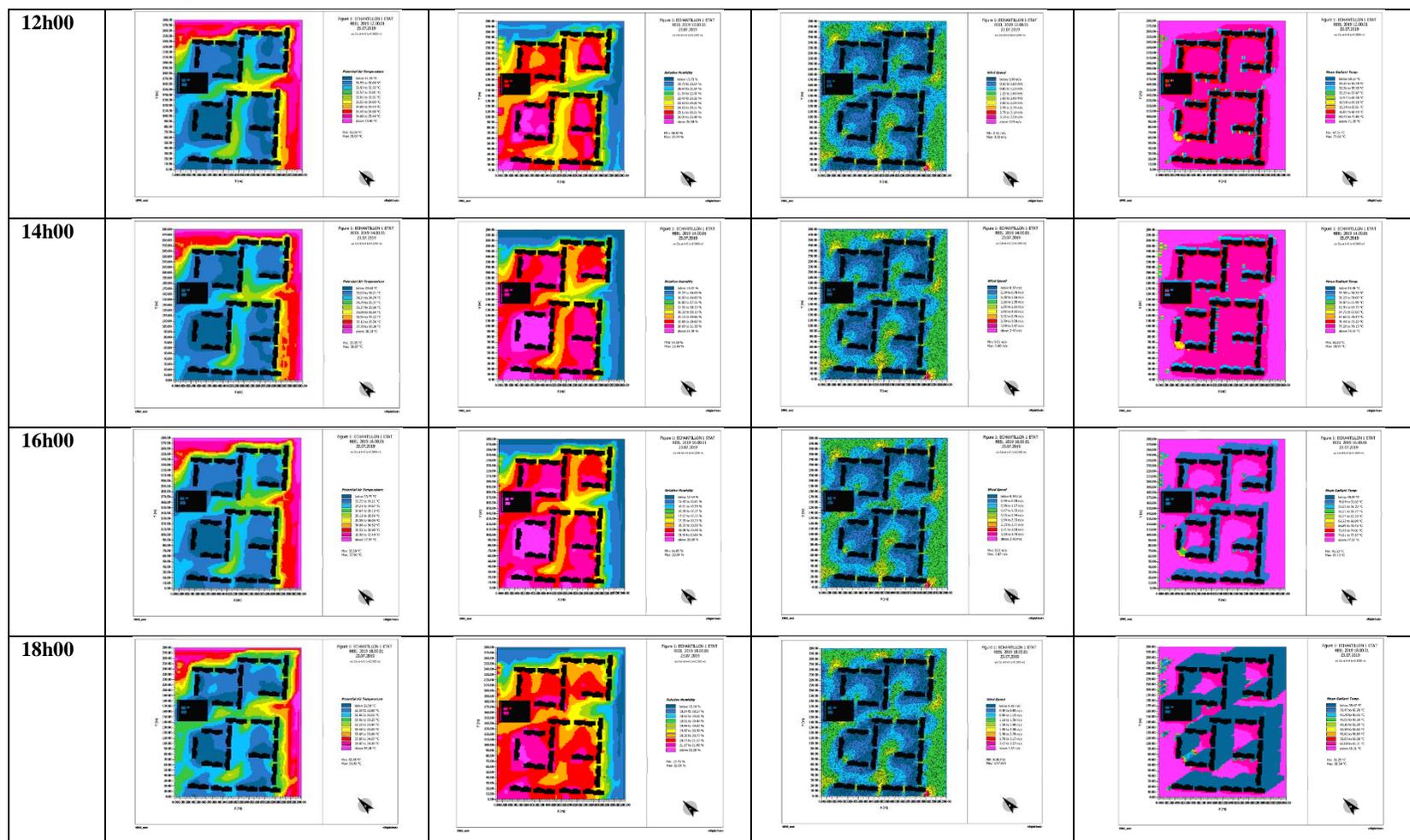
Tableau 3.1 : valeurs de coefficient de forme (Cf) et le rapport des surfaces exposées et les surfaces non exposées pour chaque cas de densité. (Source : Auteure)

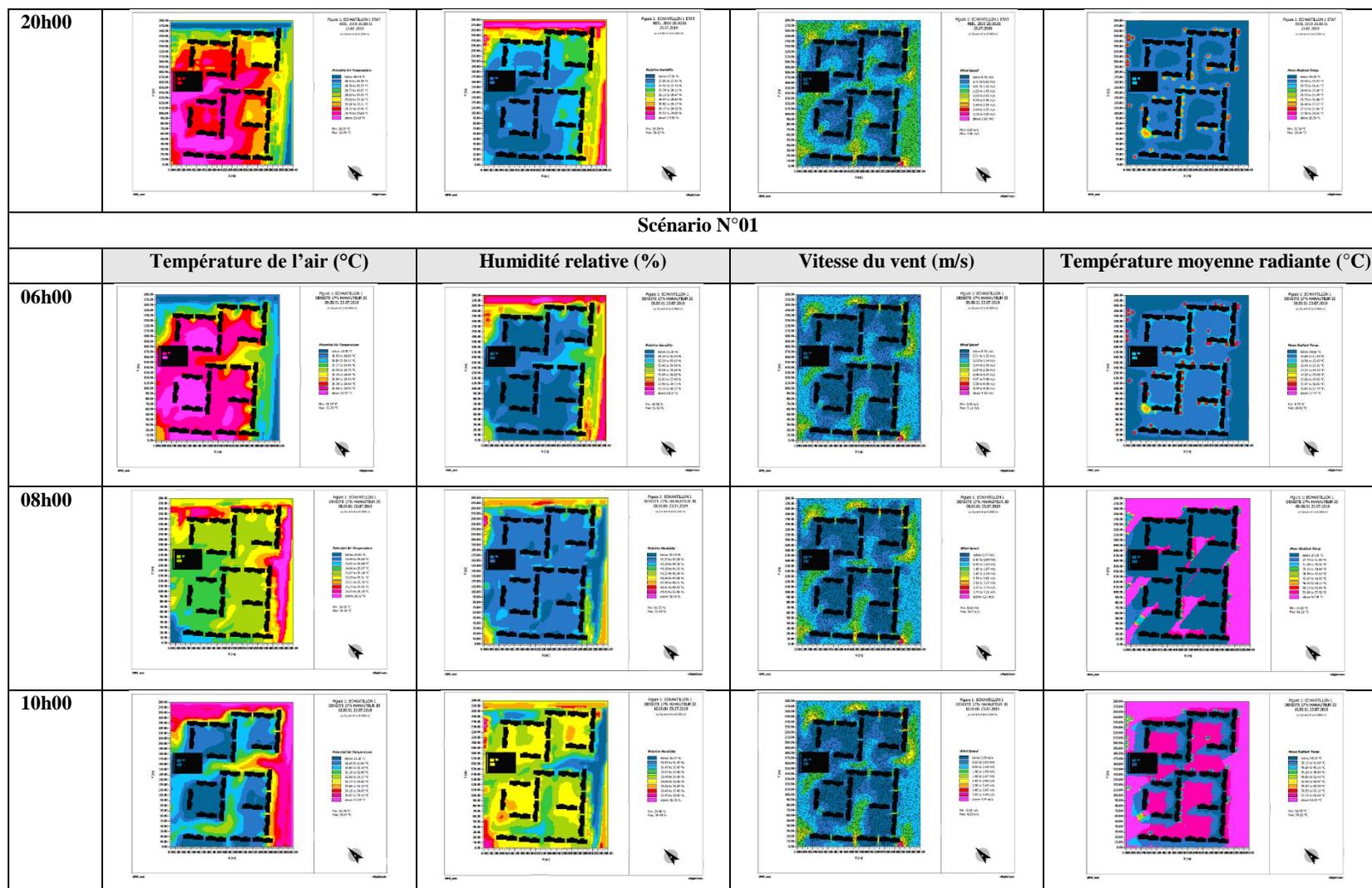
Annexe 04 :

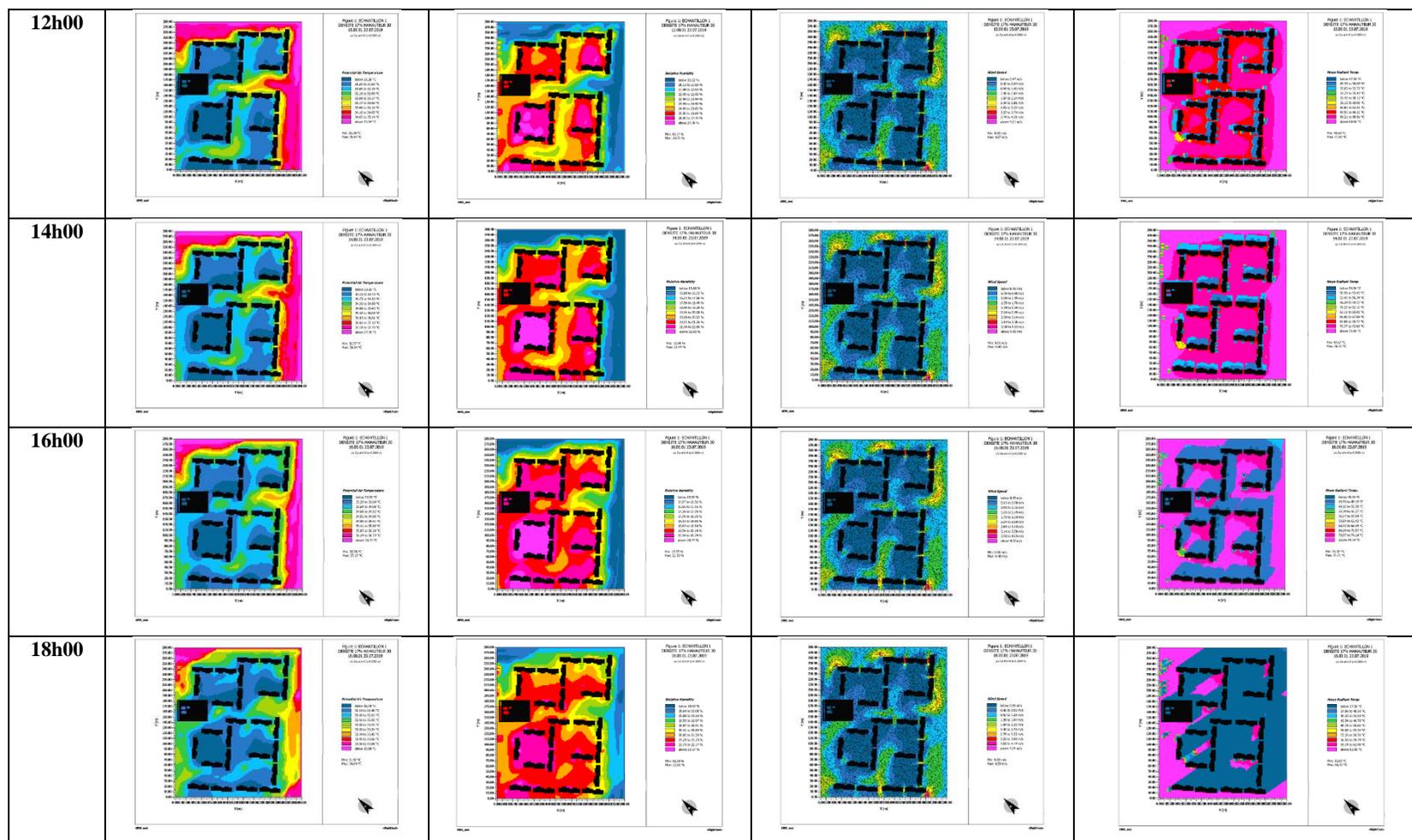
4.1. Les Output de simulation à l'aide du logiciel ENVI-met 4.4.6

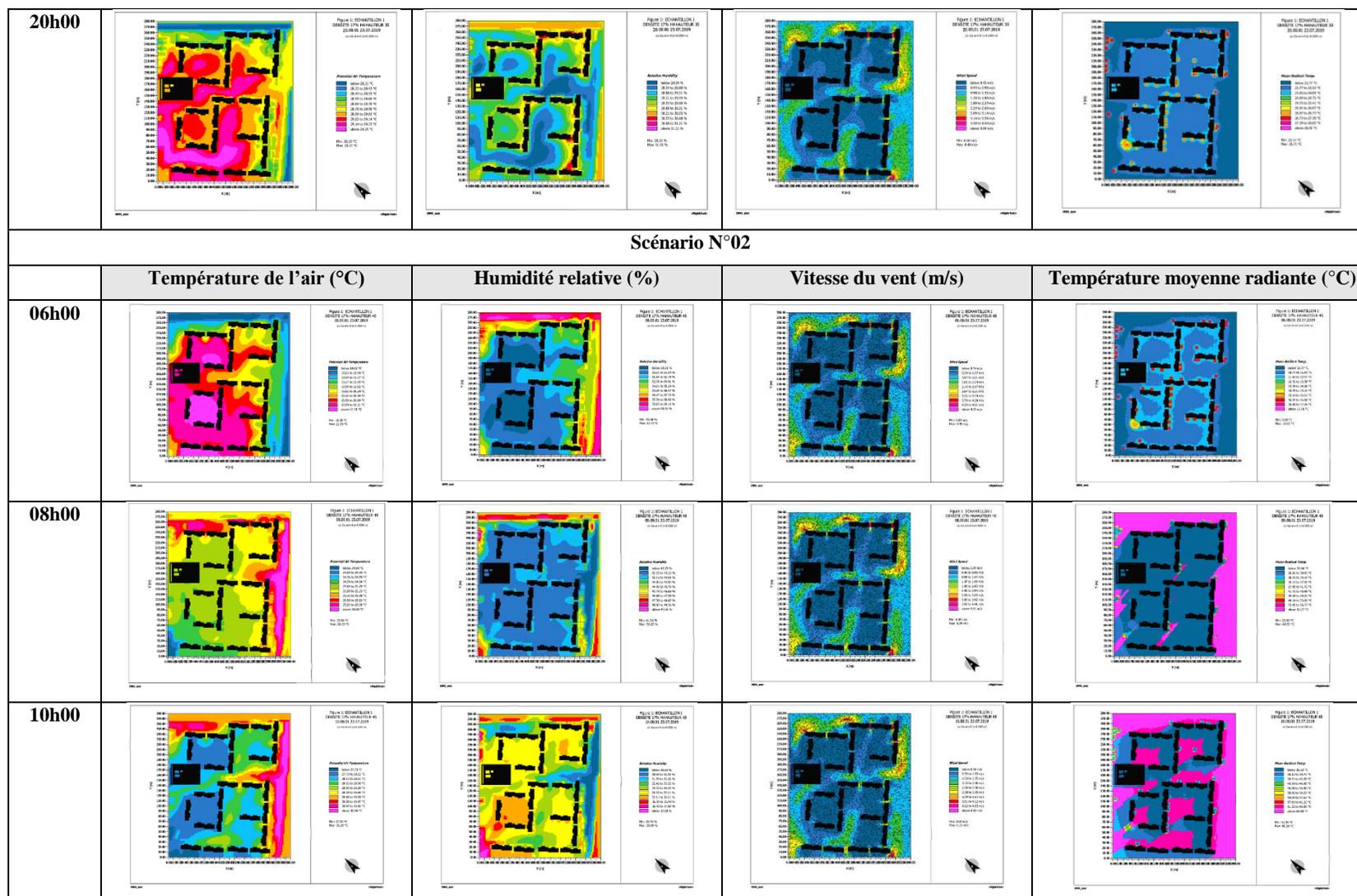
4.1.1. Les Output des paramètres microclimatiques pour les 16 scénarios

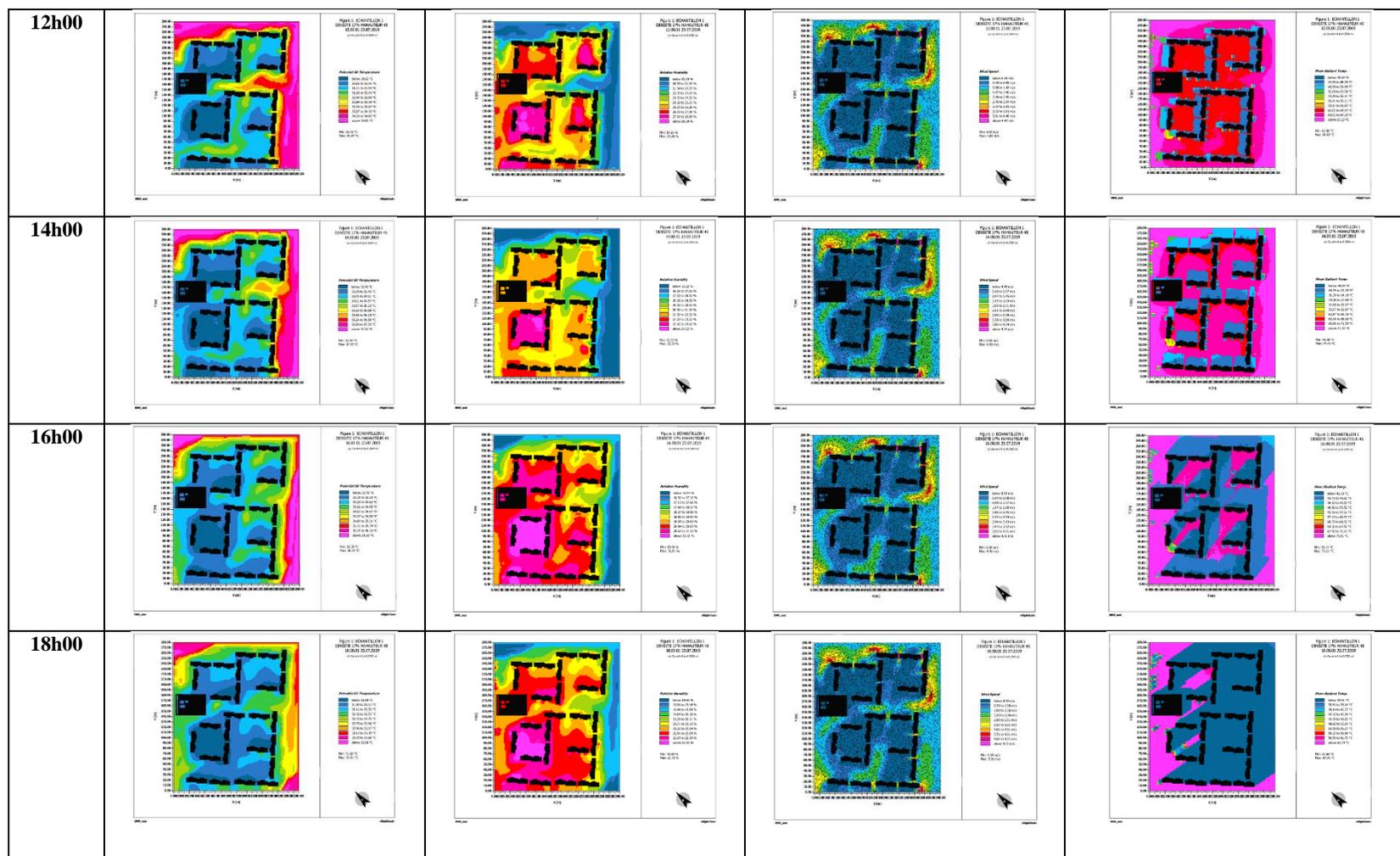


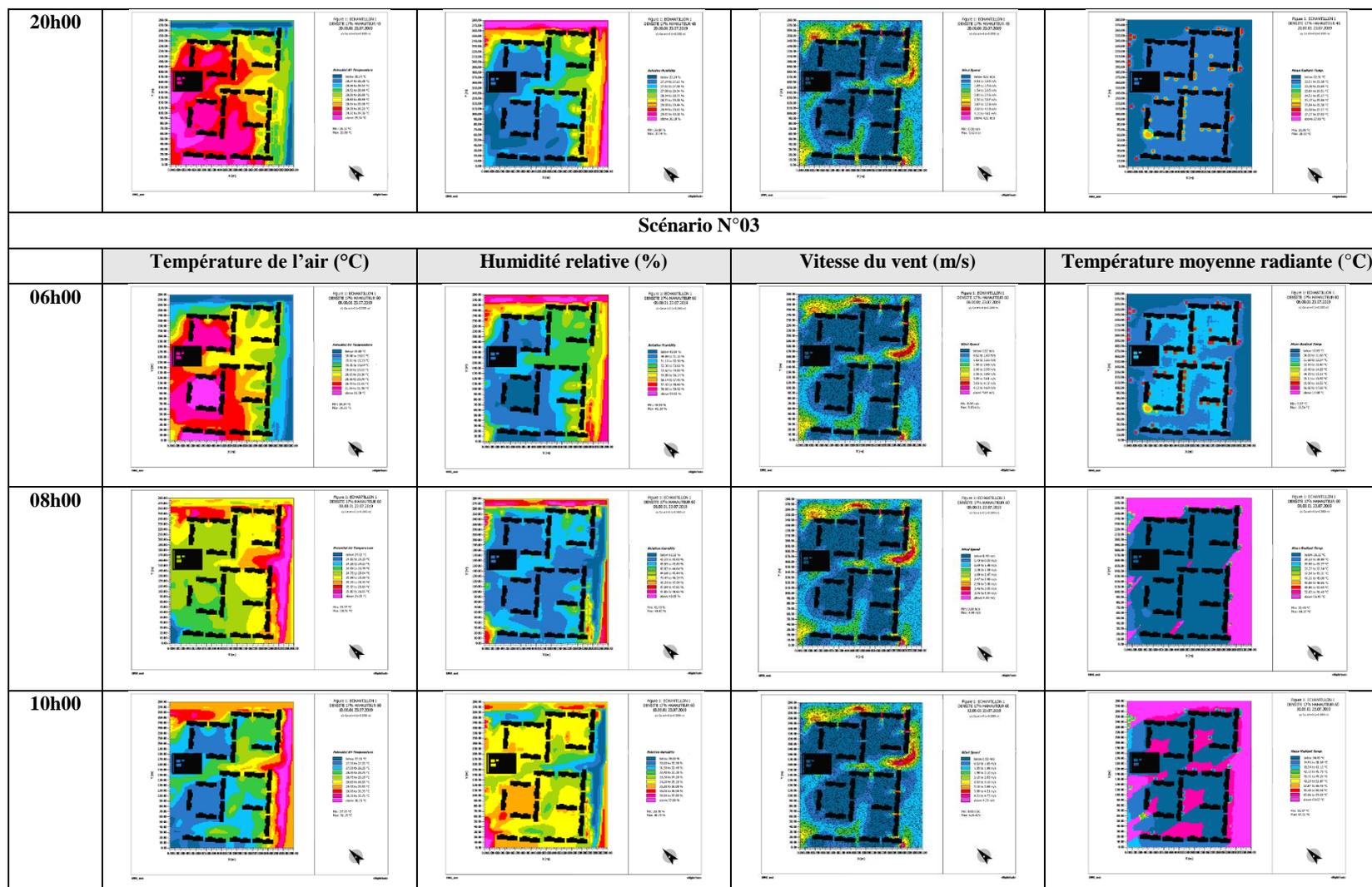


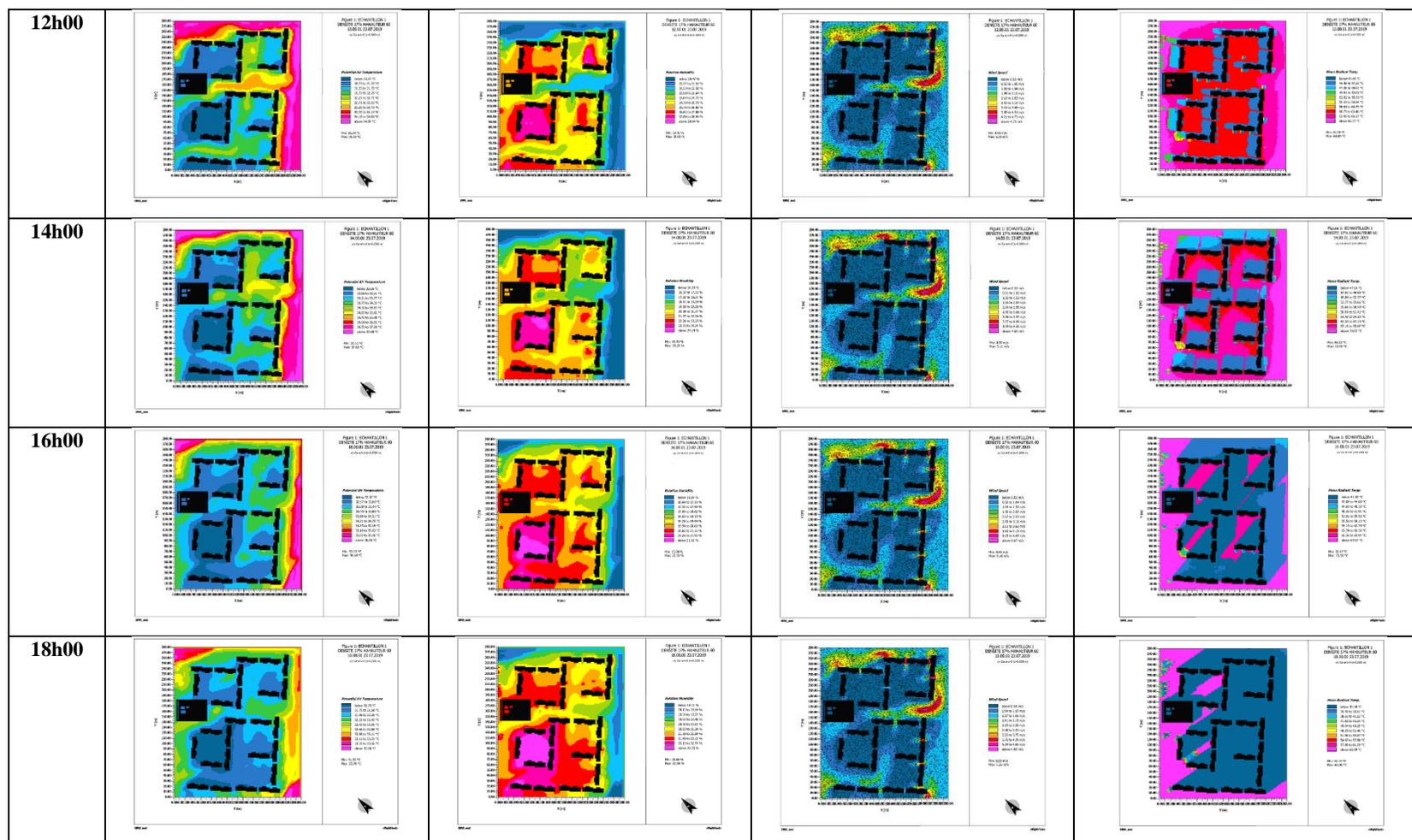


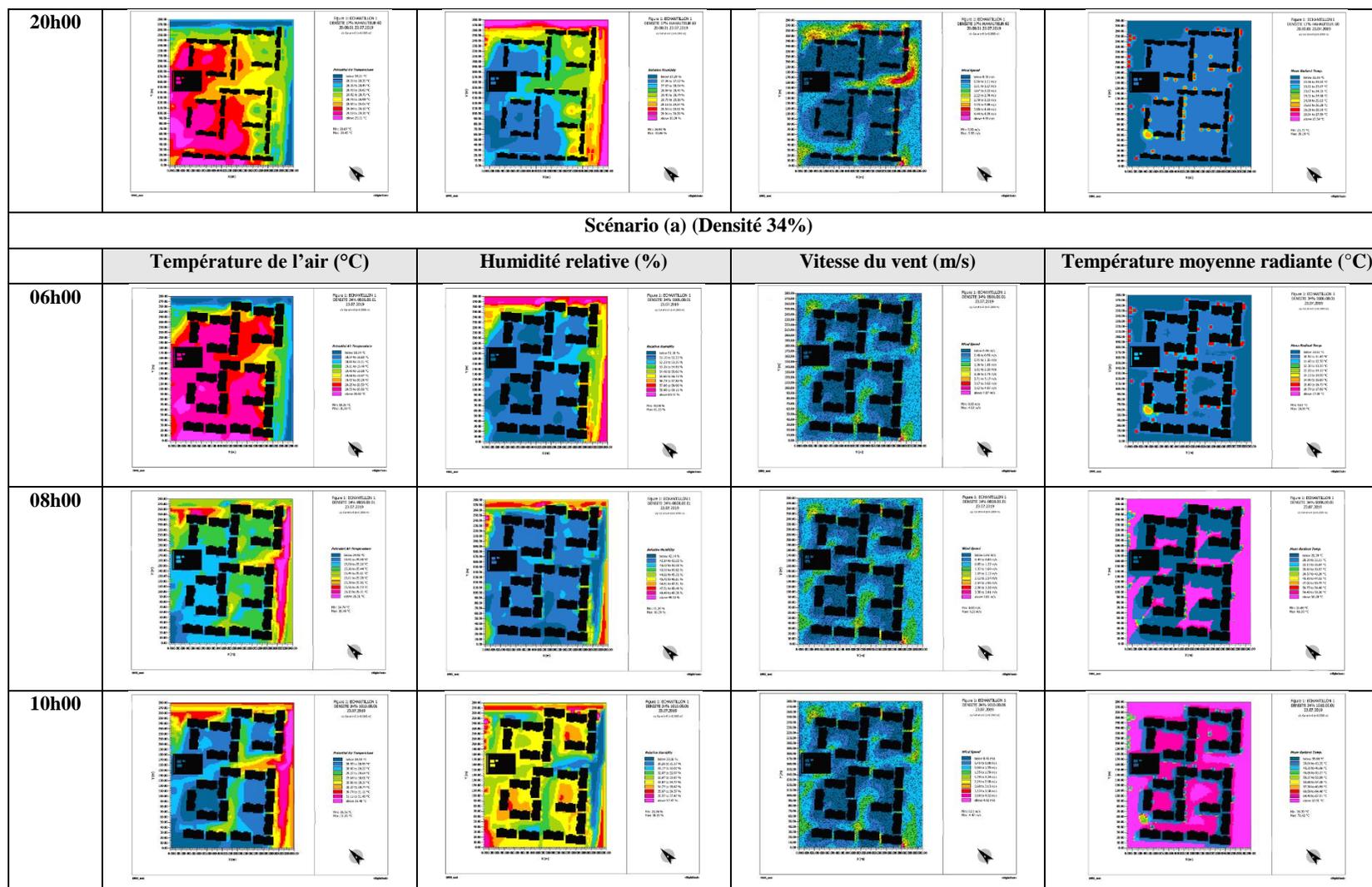


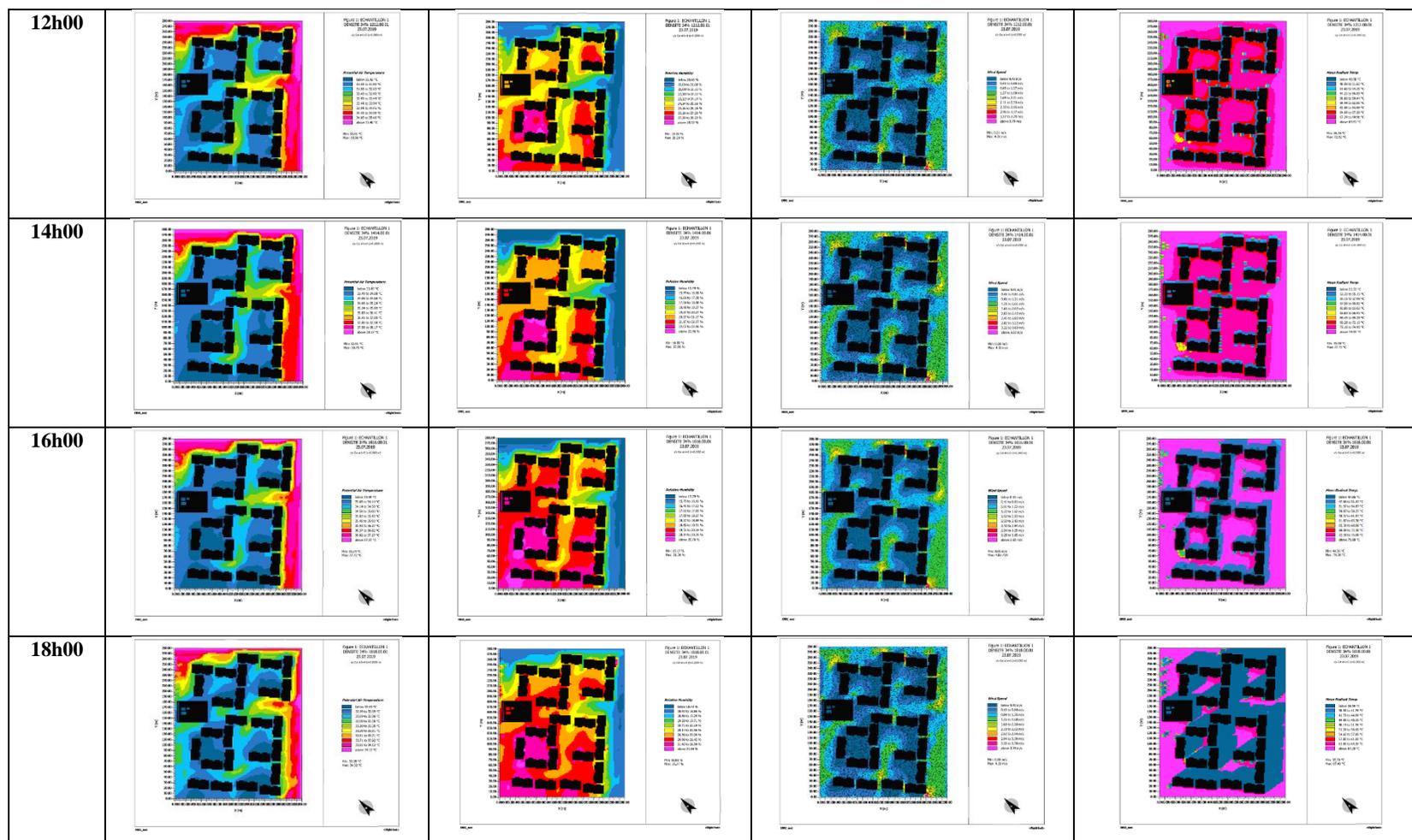


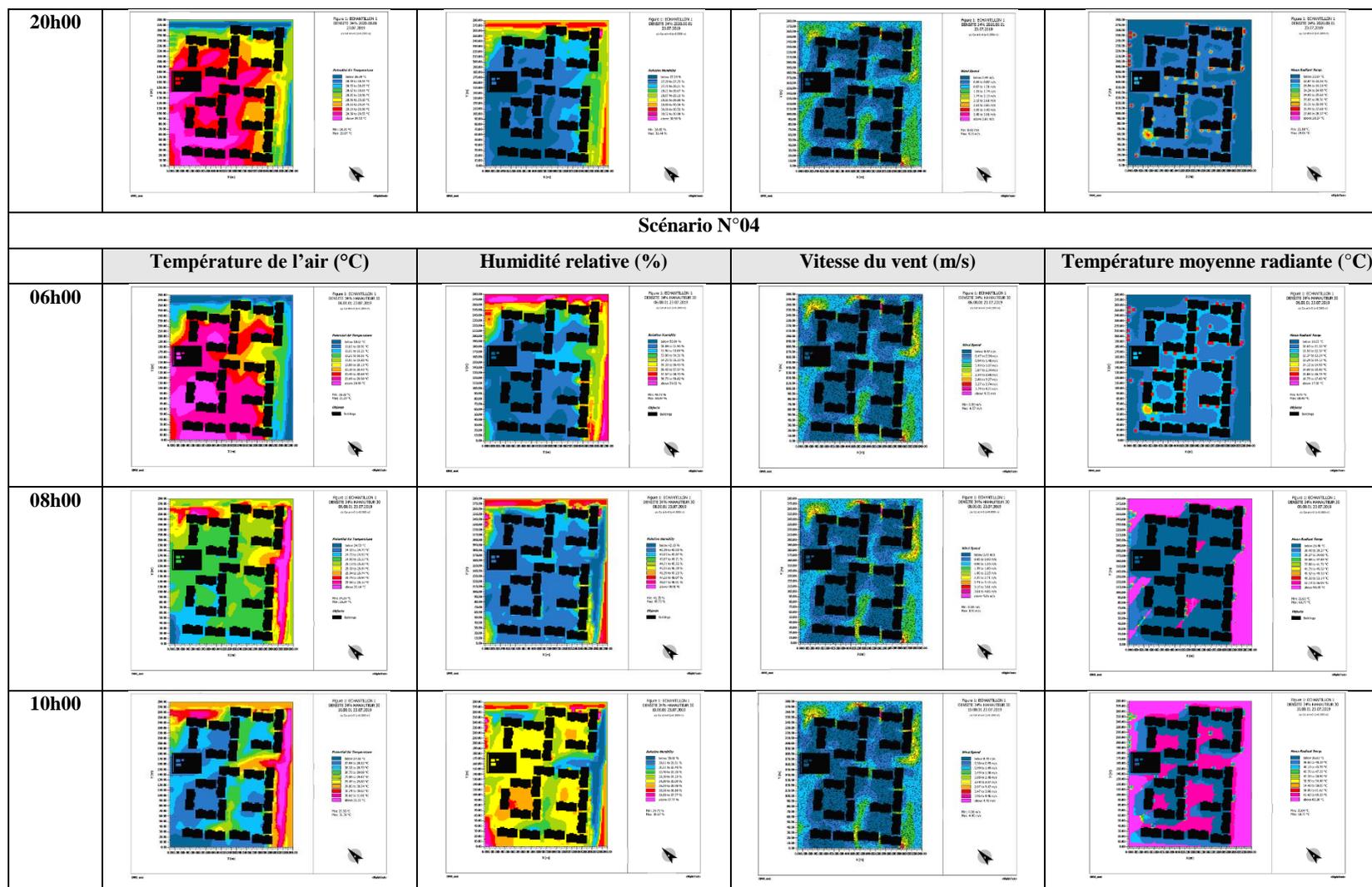




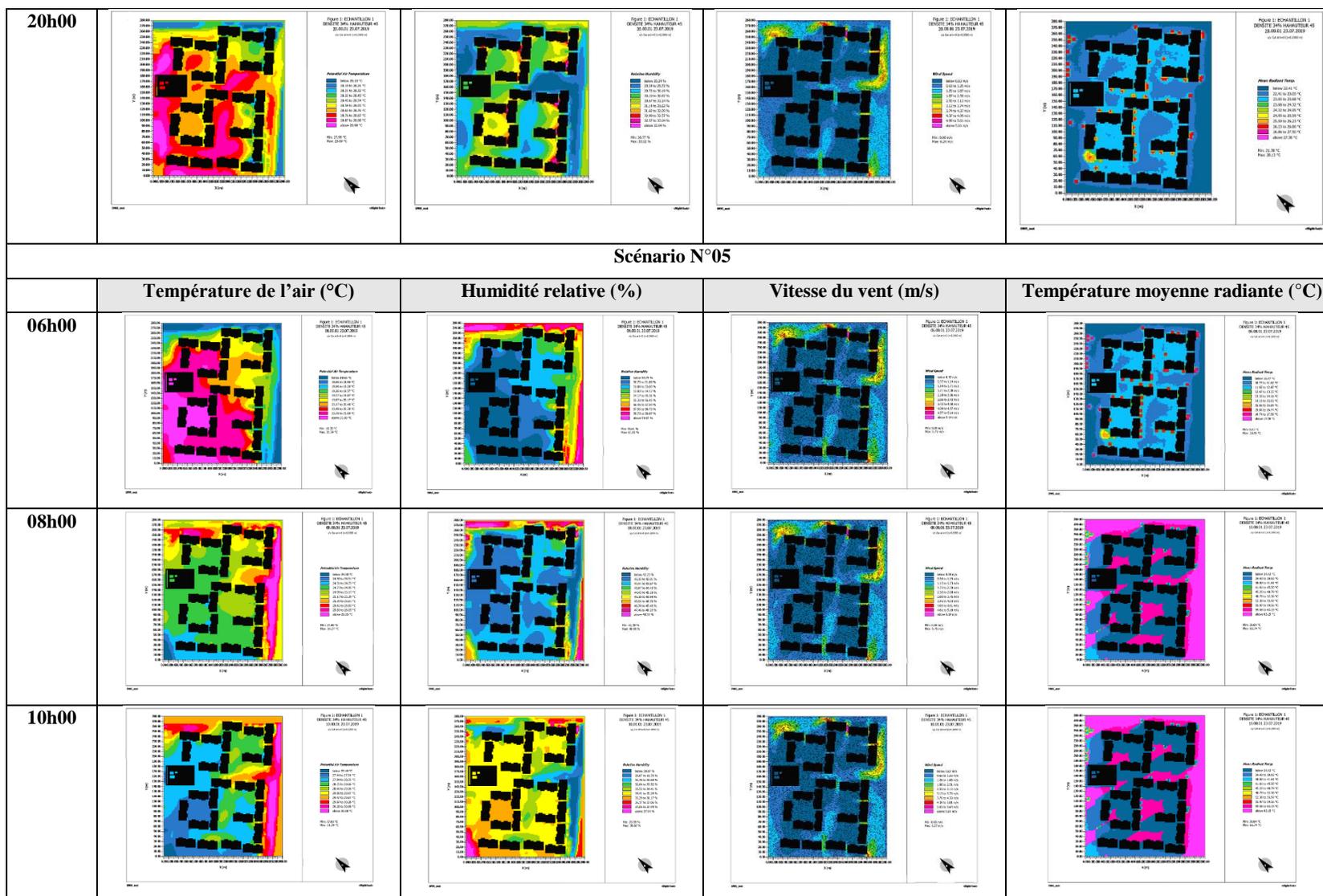


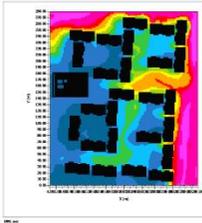
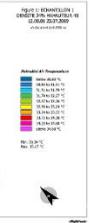
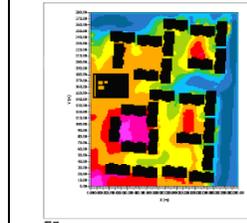
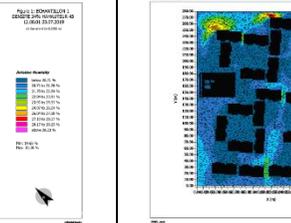
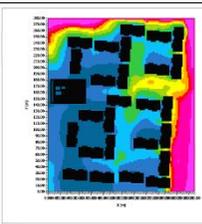
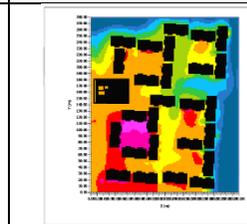
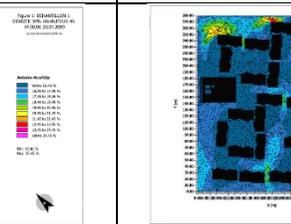
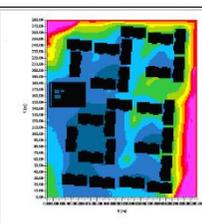
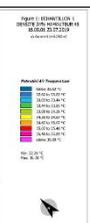
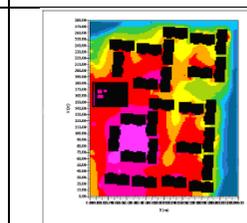
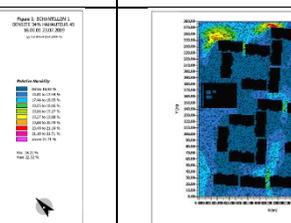
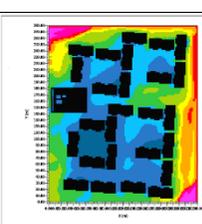
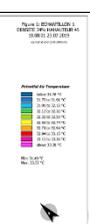
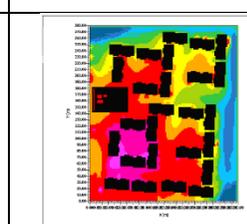
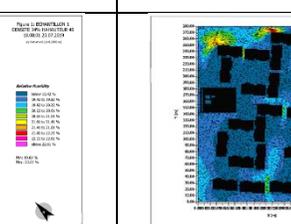


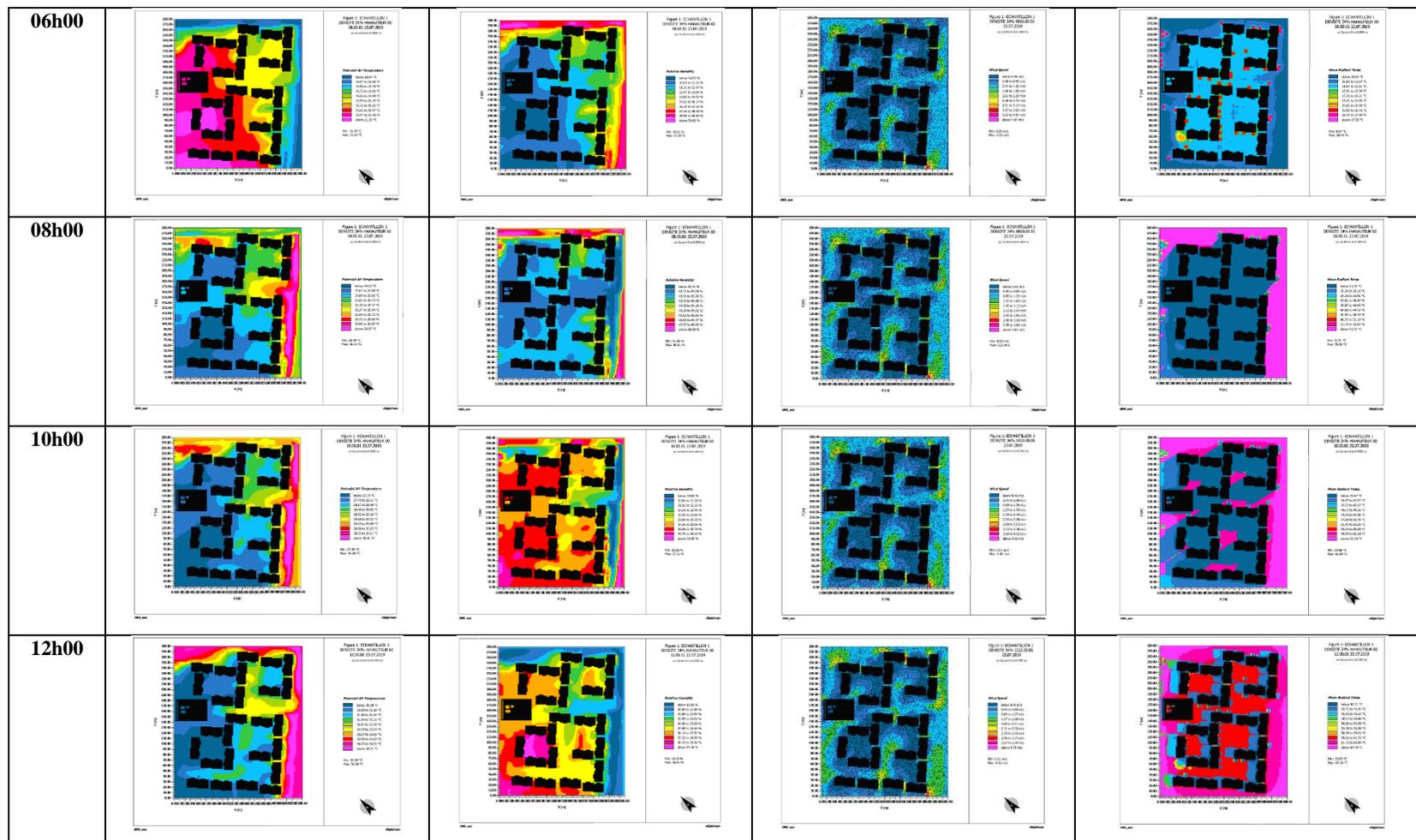


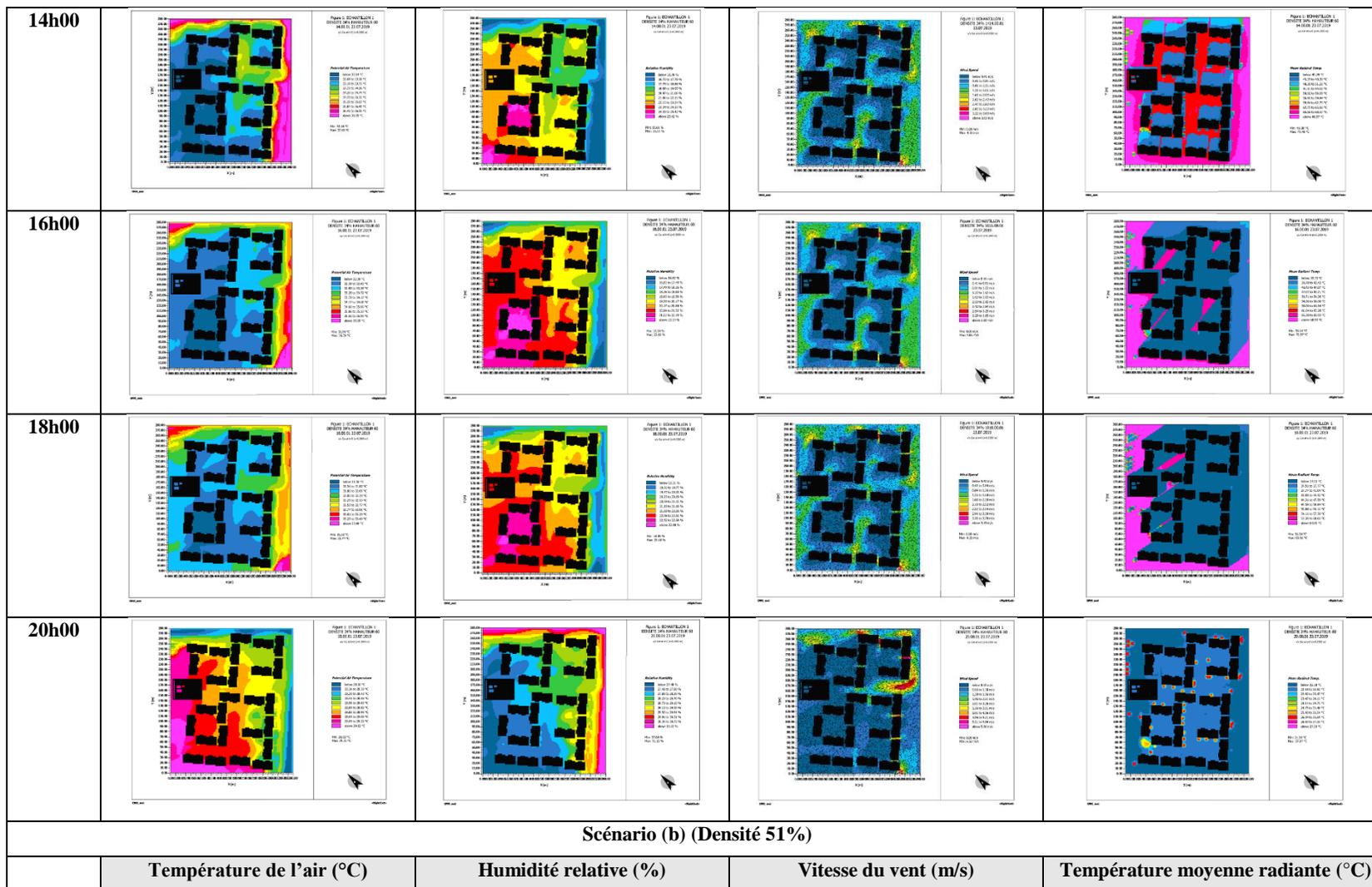


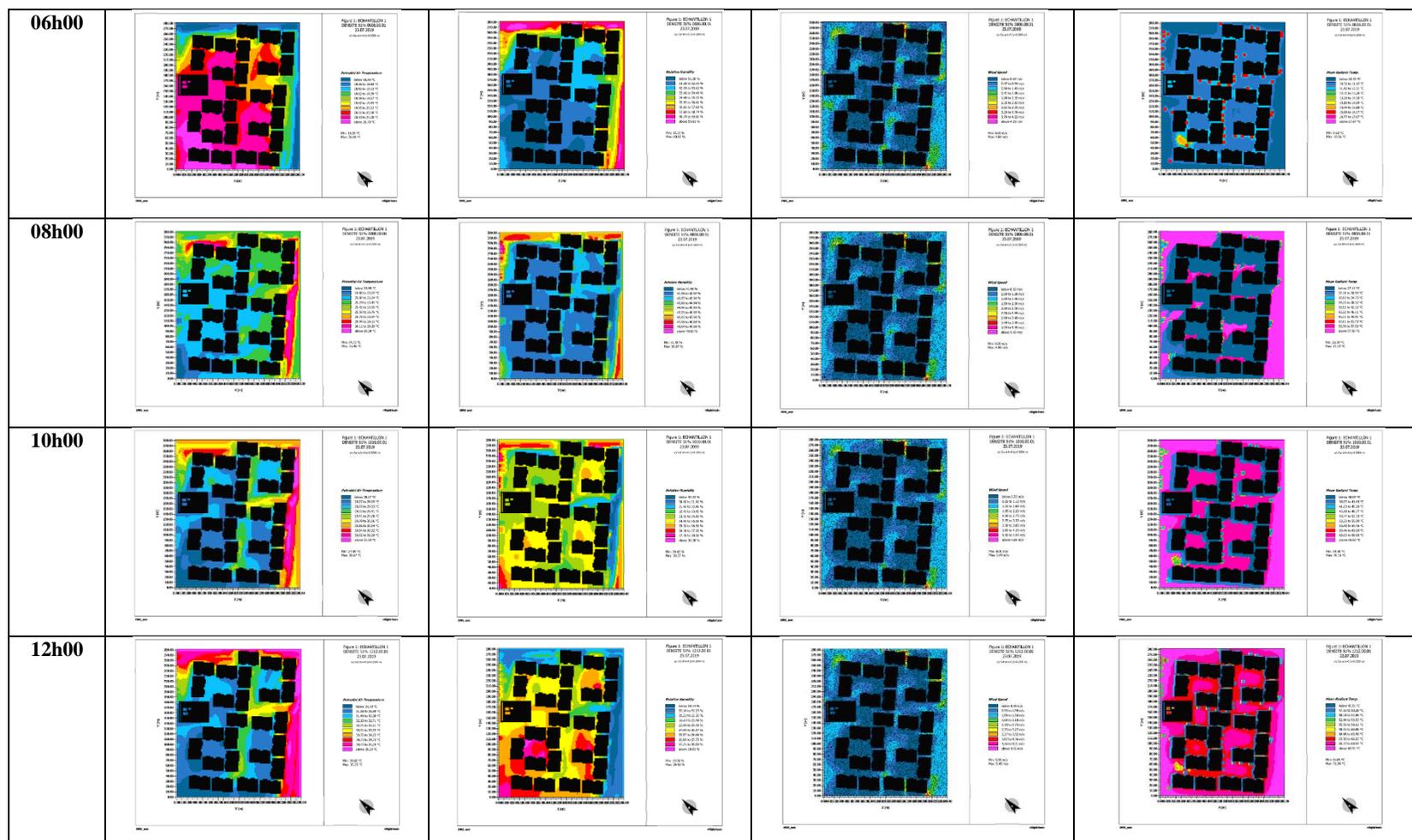


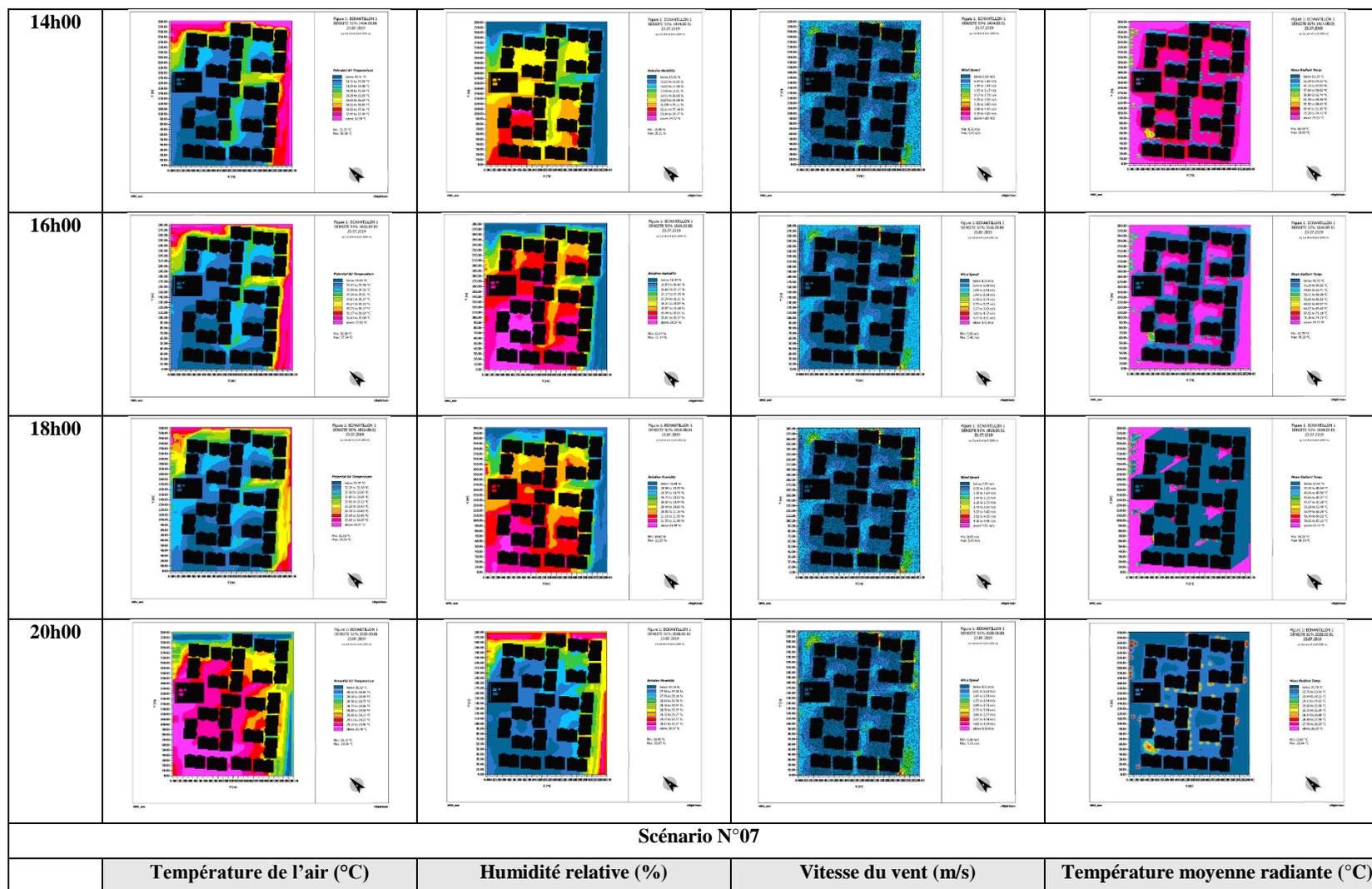


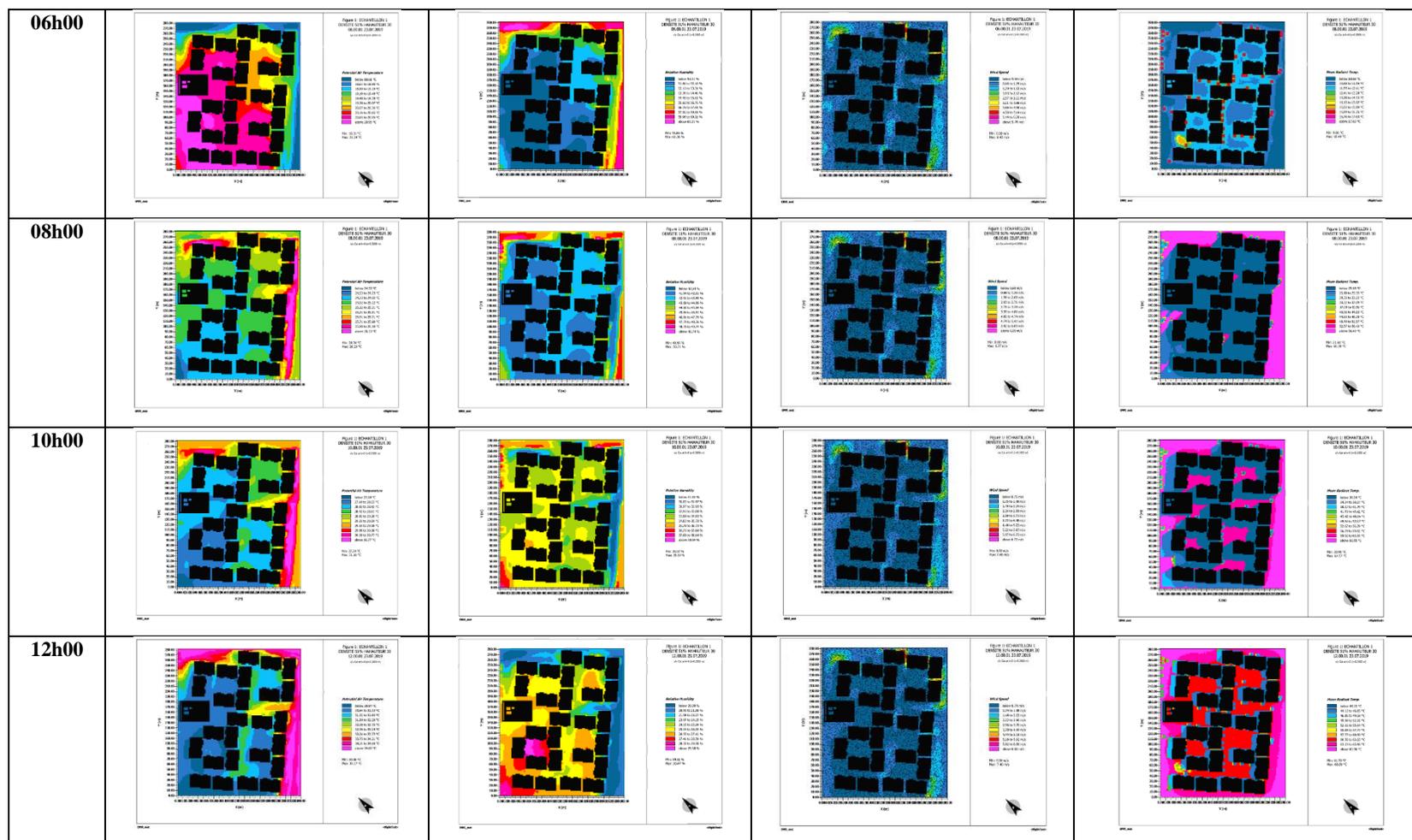
12h00				
14h00				
16h00				
18h00				
20h00				
Scénario N°06				
	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse du vent (m/s)	Température moyenne radiante (°C)

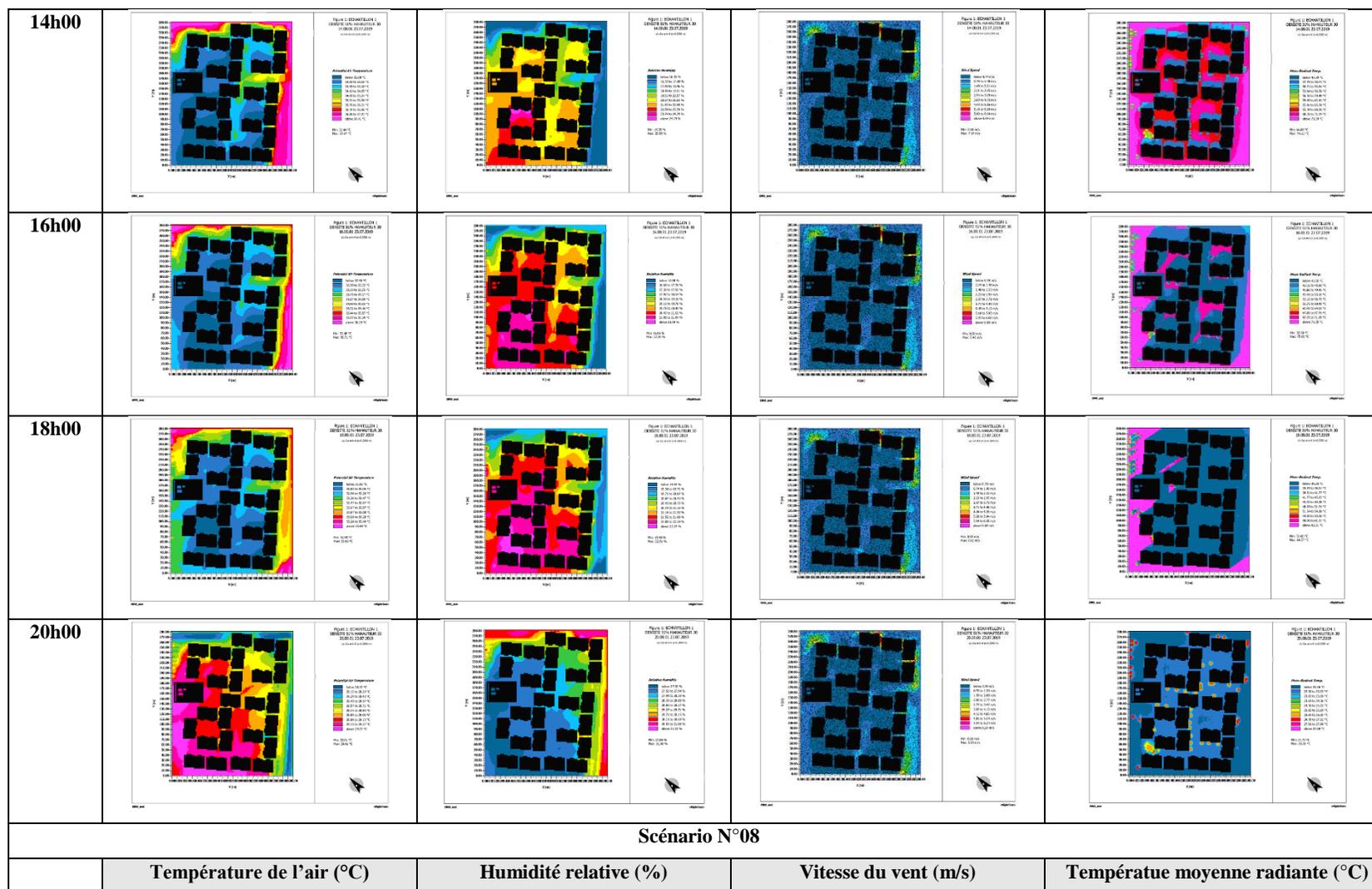


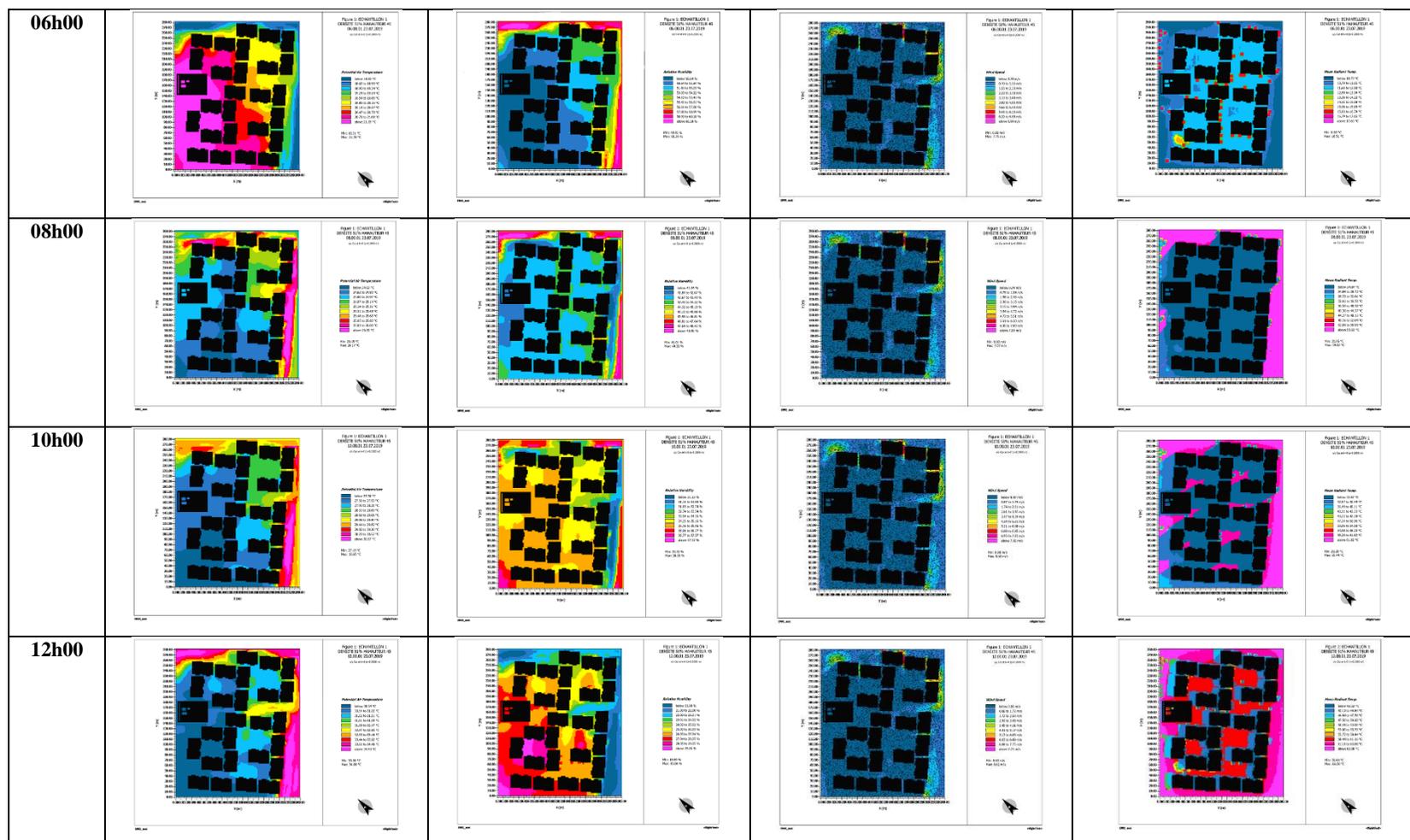


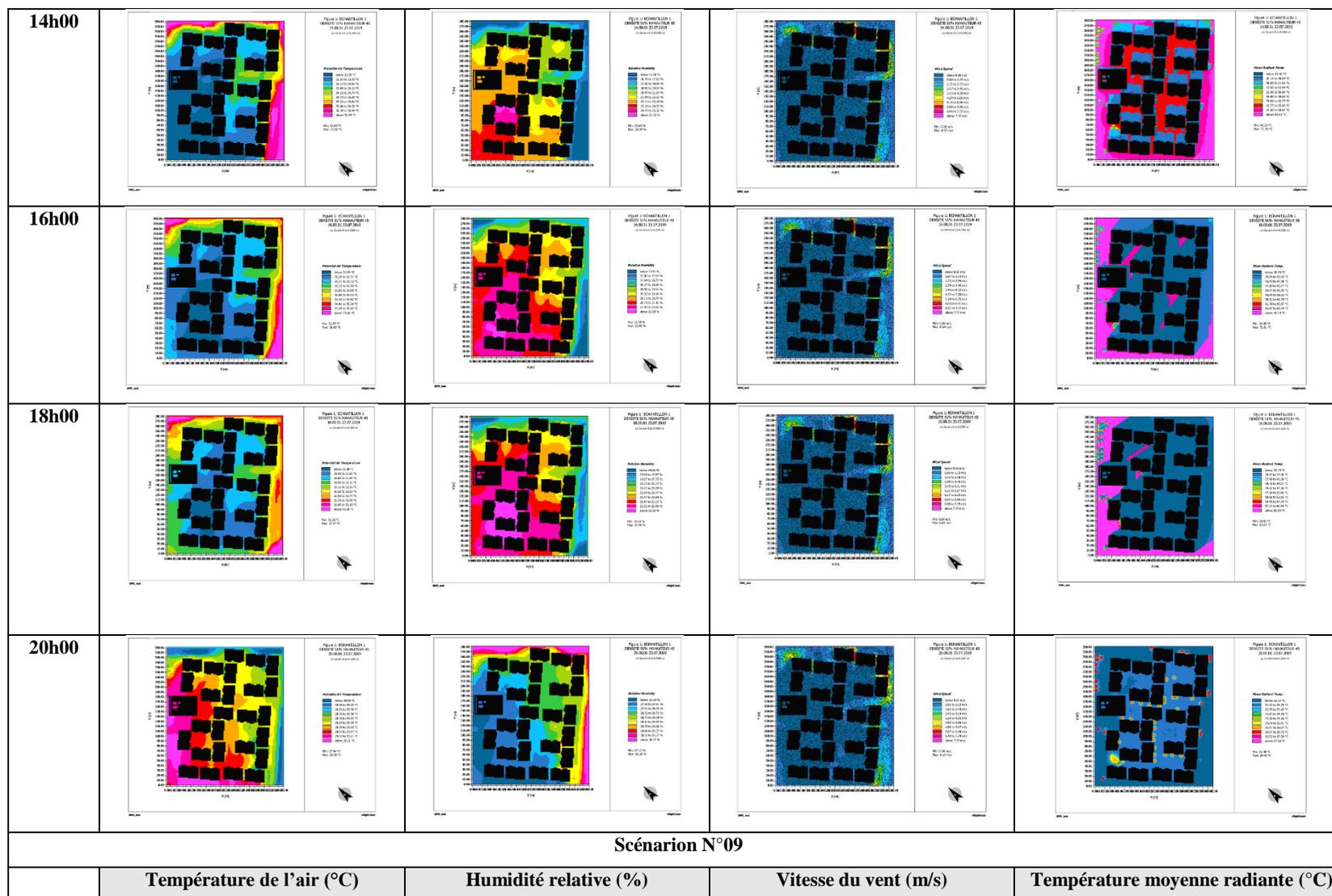


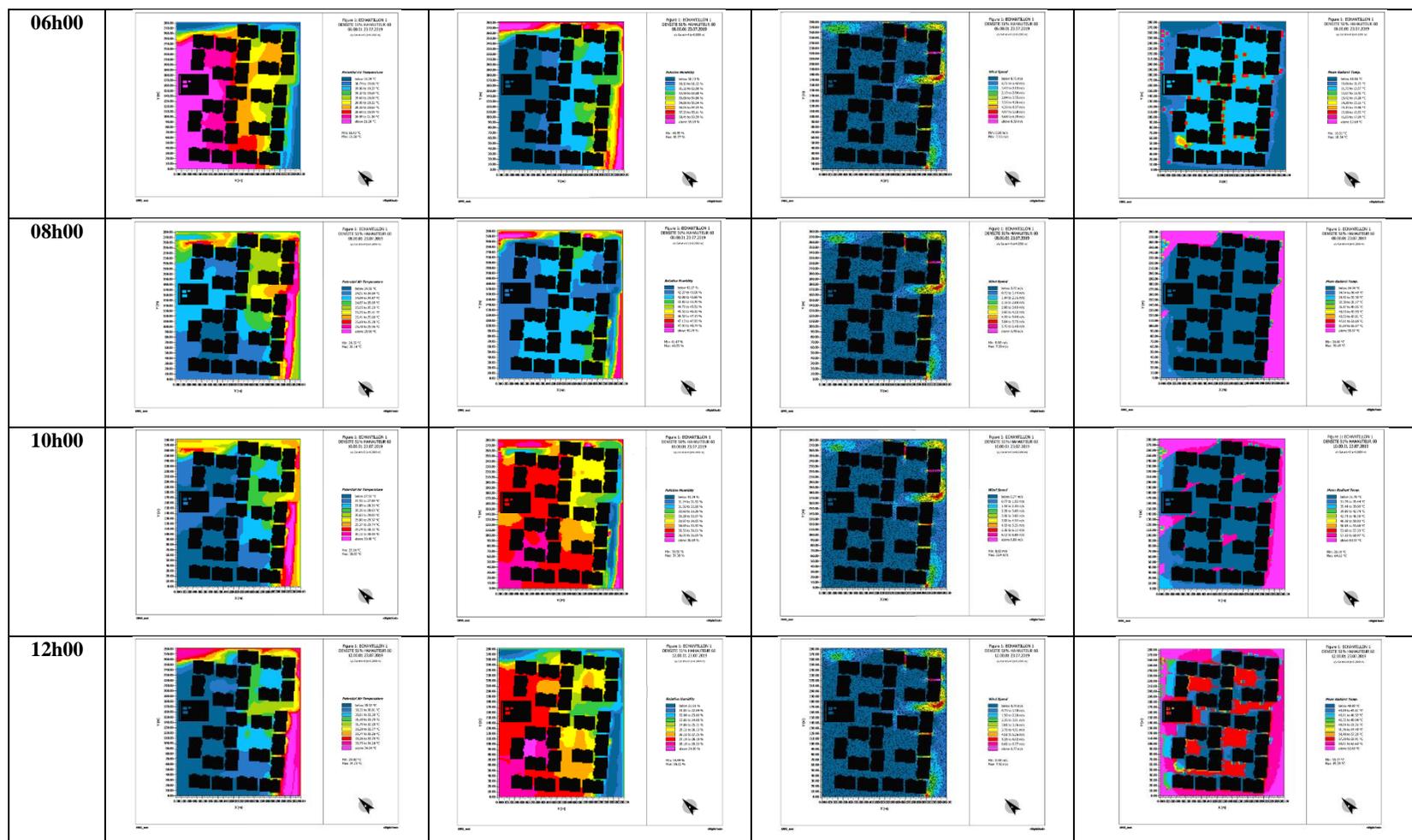


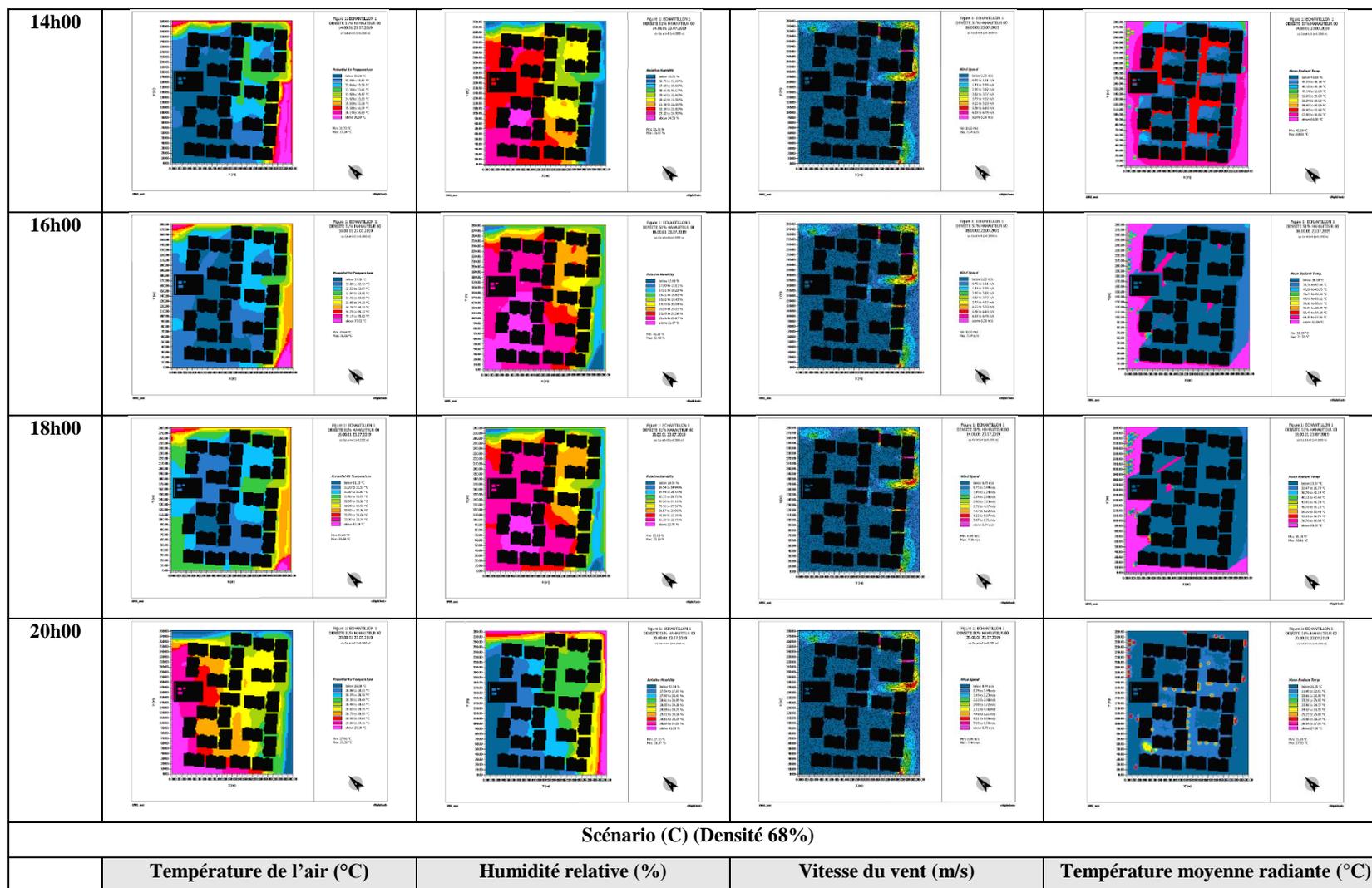


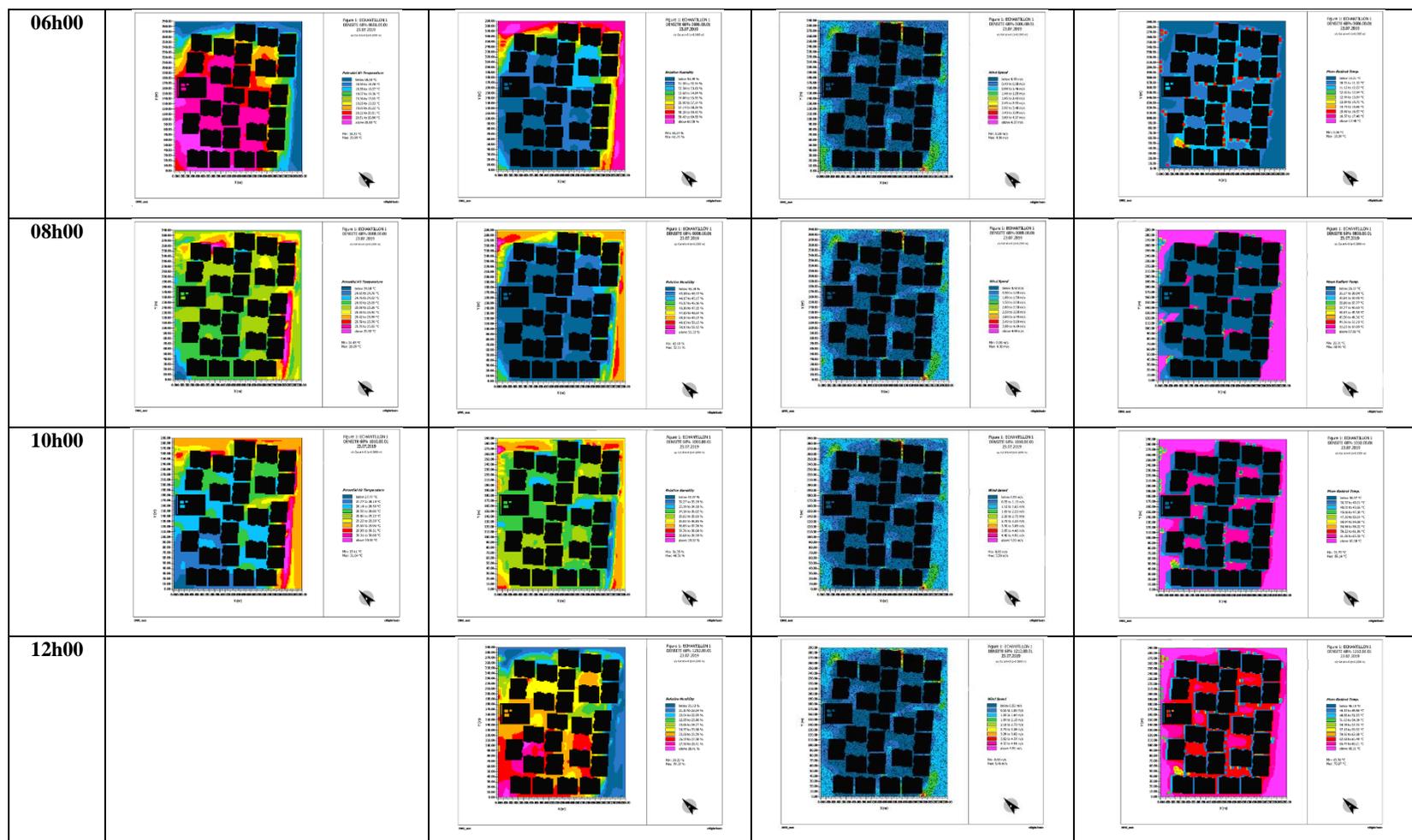


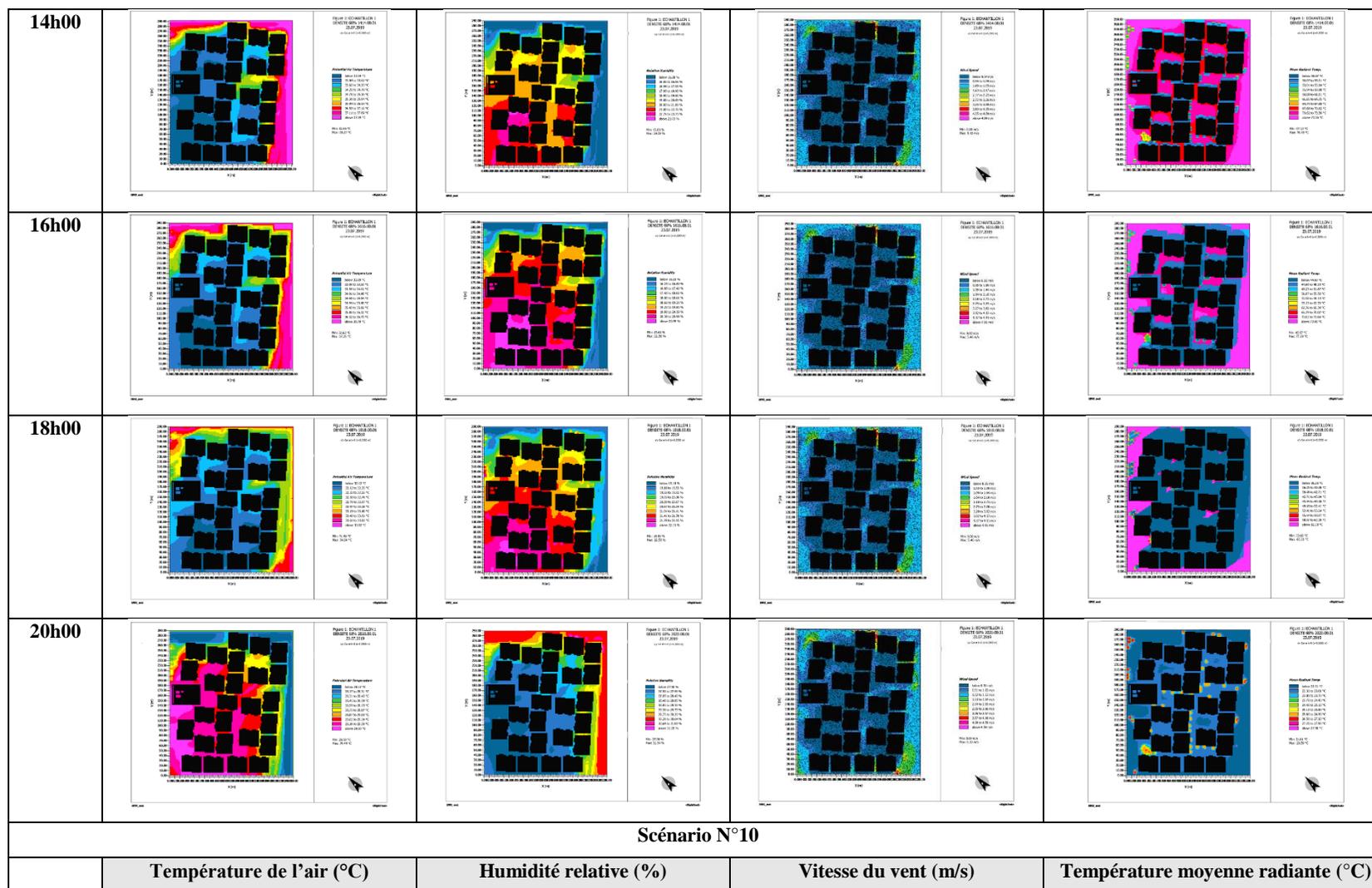


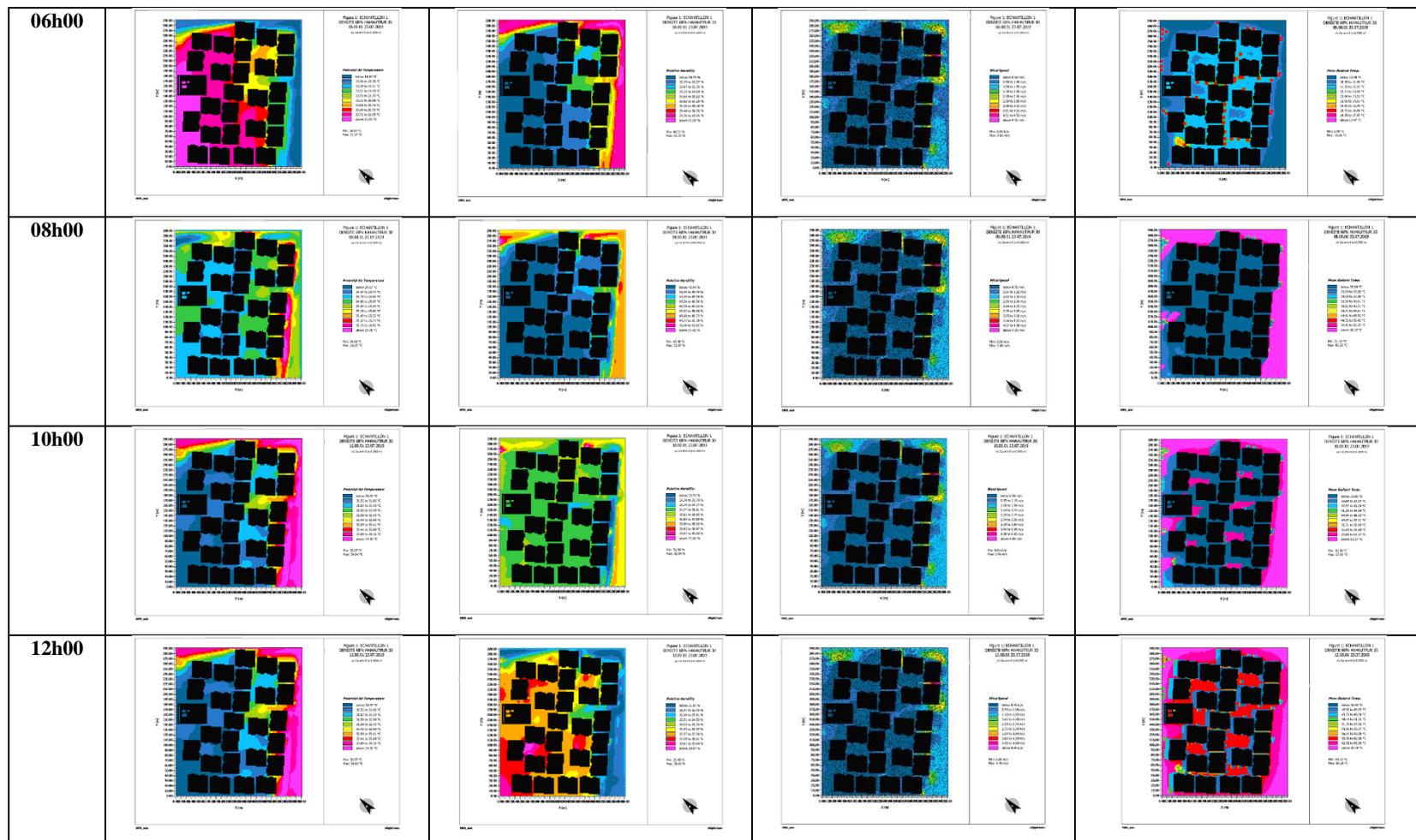


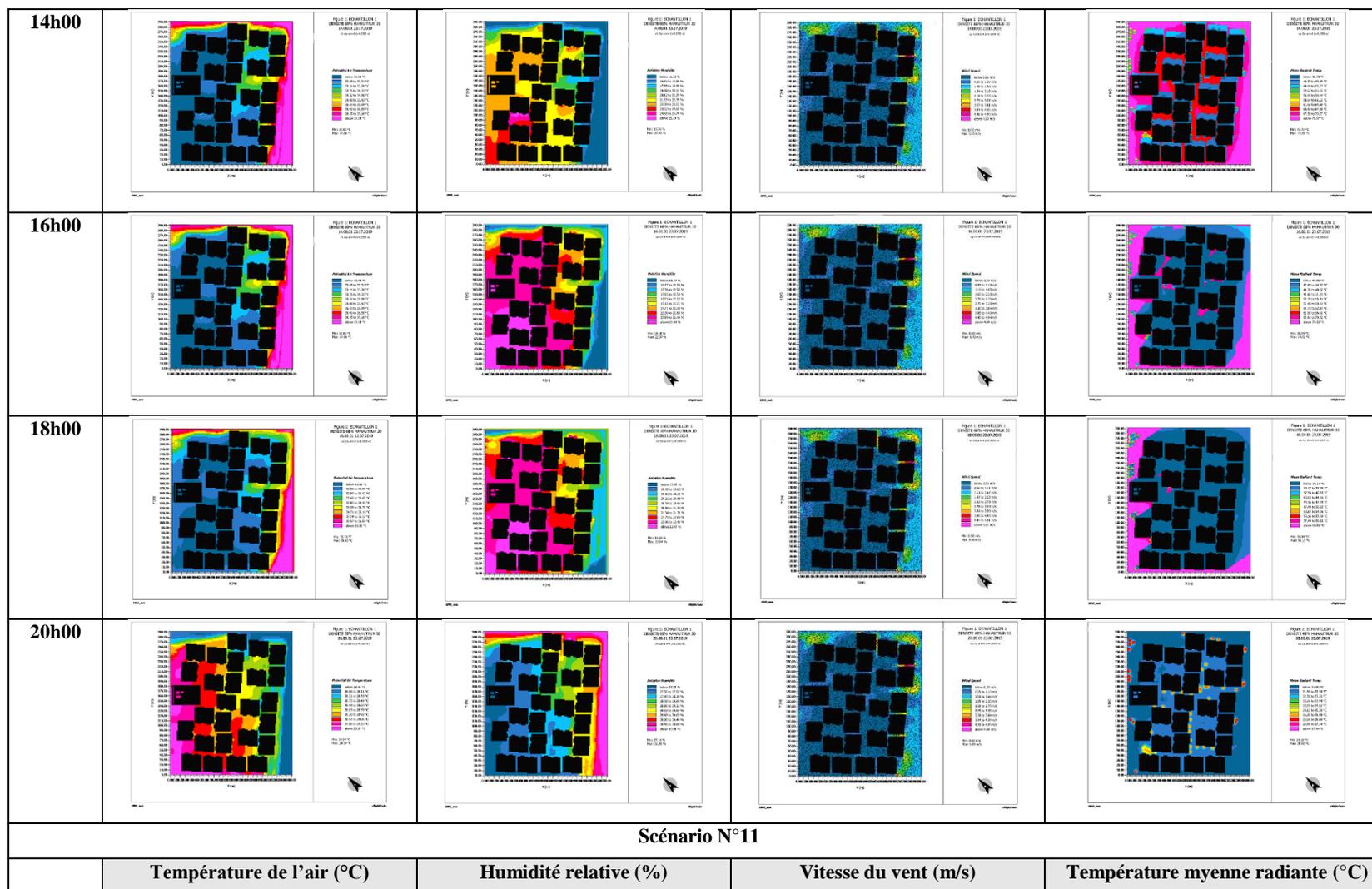


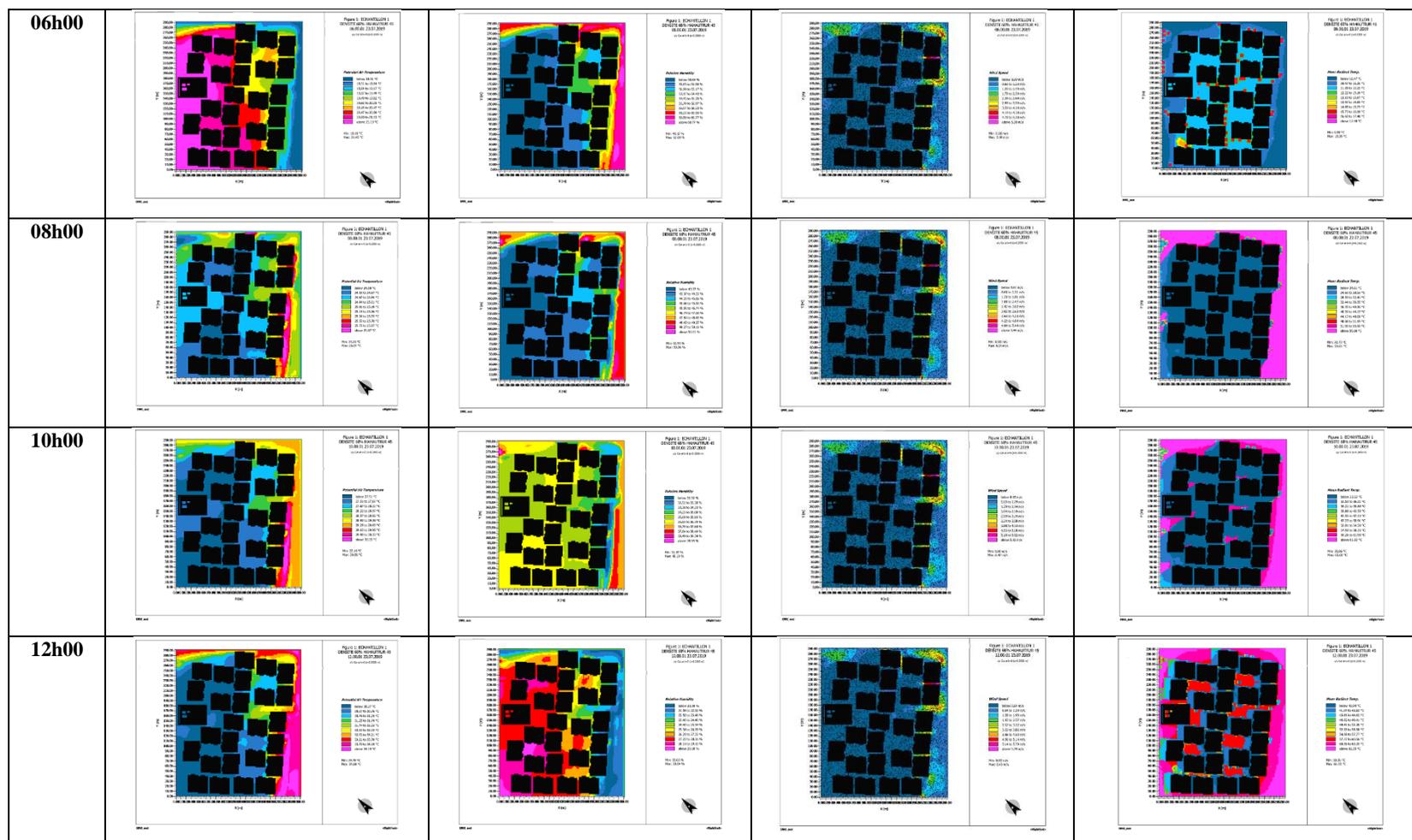


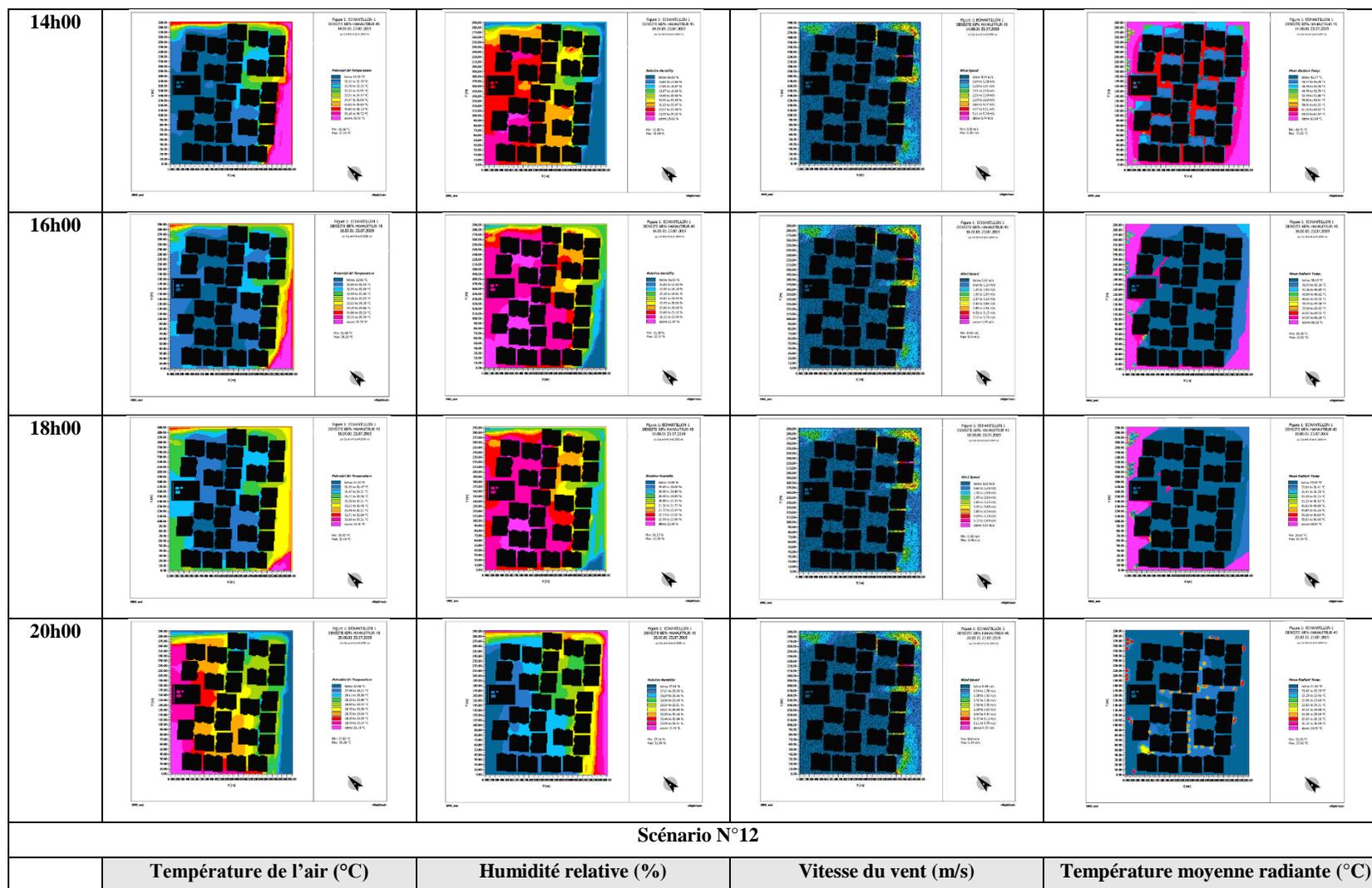


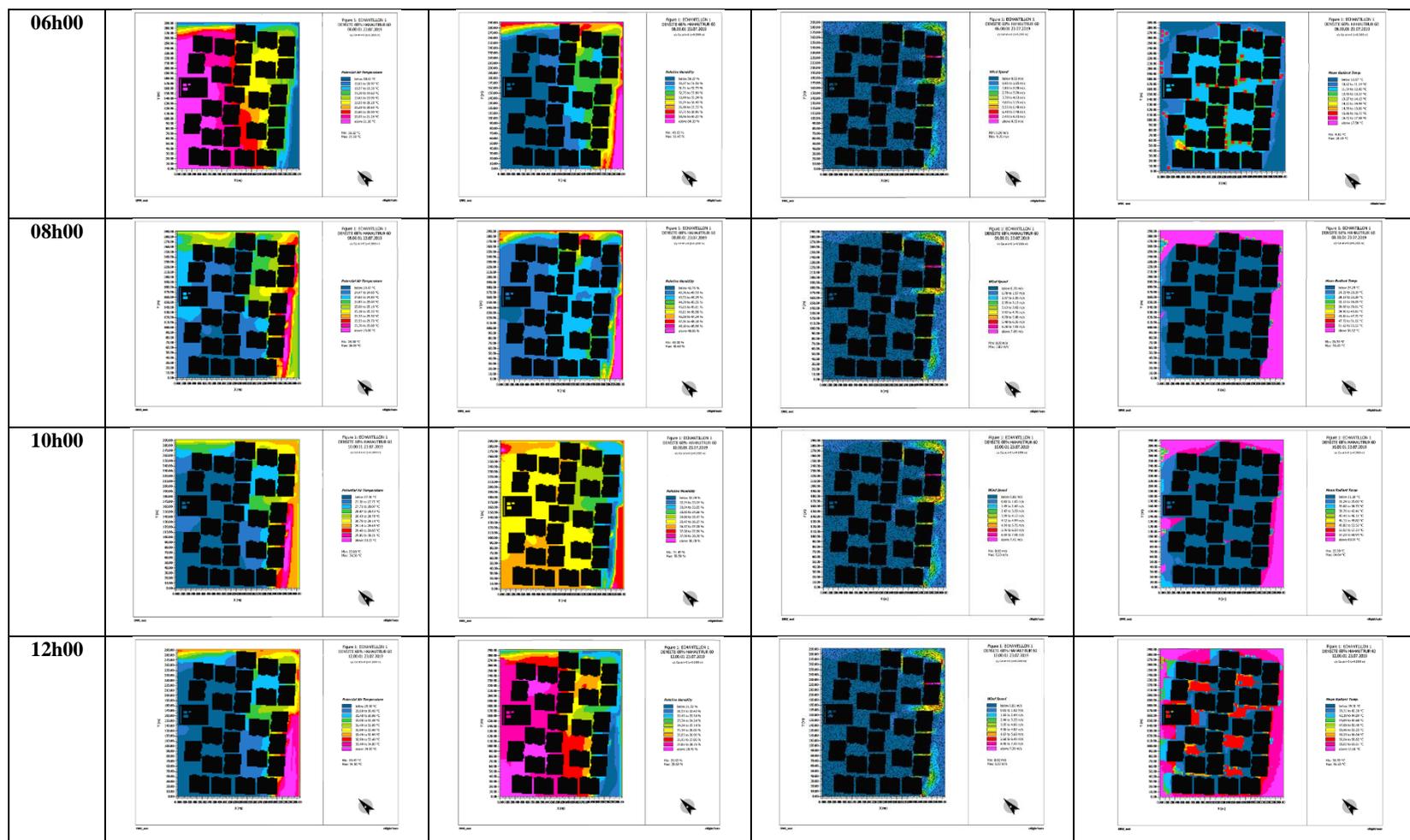












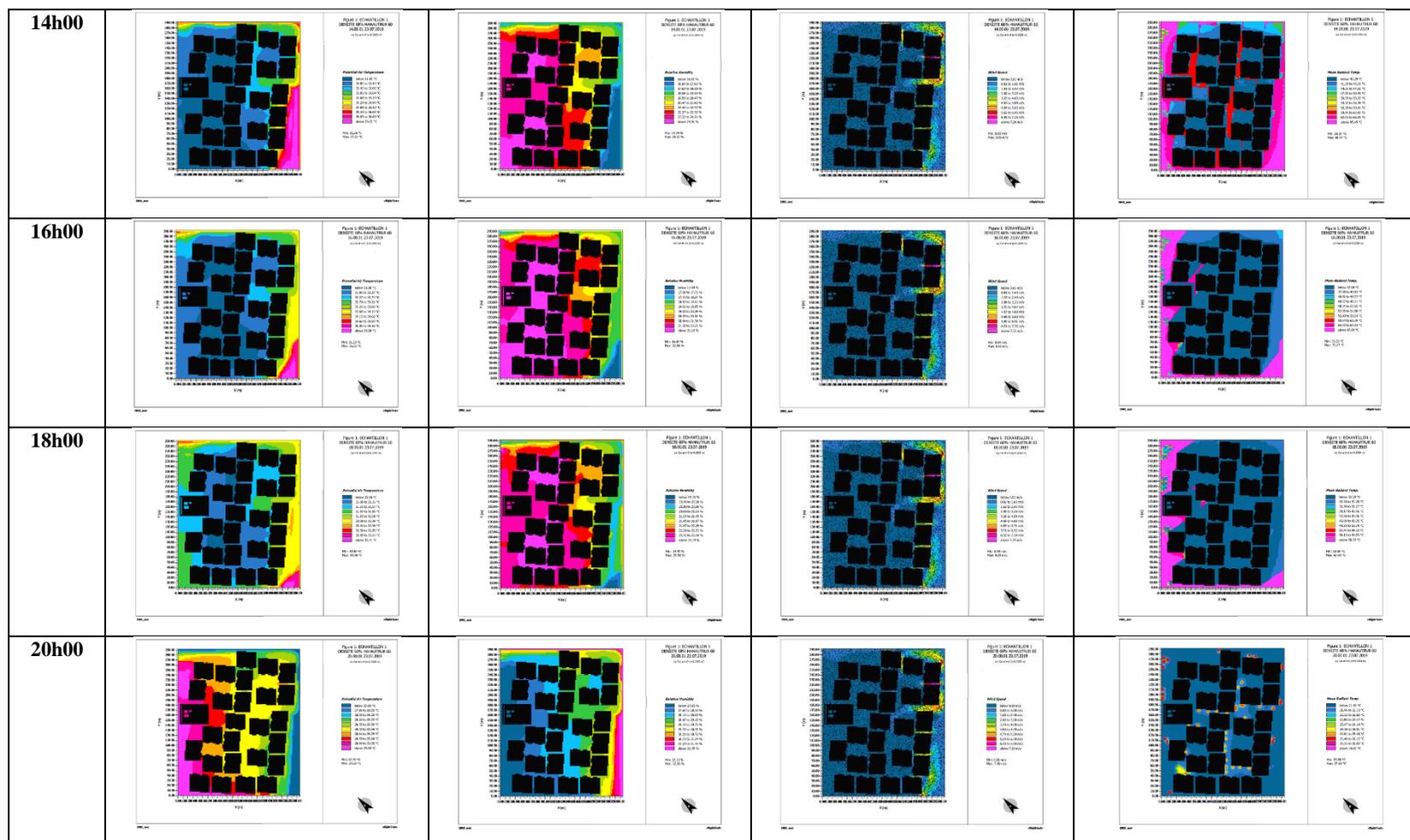


Tableau 4.1: Résultats de l'effet de la densité surfacique et de la hauteur sur les paramètres microclimatiques. (Source : Auteure, 2021)

Annexe 05 :

5.1. Les Outputs de simulation à l'aide du logiciel ENVI-met 4.4.6

5.1.1. Les Outputs des indices thermiques pour les 16 scénarios

5.1.1.1. L'influence de la densité surfacique sur les indices de confort thermique (PMV, PET et UTCI) : Le cas de l'effet de la densité surfacique

Temps (h)	Cas de l'effet de la densité surfacique											
	Scénario cas de base 17%			Scénario (a) 34%			Scénario (b) 51%			Scénario (c) 68%		
	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)
06h00	-1.03	15,22	11,57	-1.06	15.40	11.23	-1.1	15.61	10.91	-1.06	15.03	11.89
08h00	1,50	35,09	26,79	1.39	34.03	26.27	1.32	33.98	25.65	1.26	33.09	25.48
10h00	2,91	41,90	32,91	2.80	41.34	32.28	2.66	39.99	31.71	2.53	40.12	31.51
12h00	3,93	46,33	37,38	3.82	46.05	36.72	3.70	44.81	36.42	3.66	44.76	36.55
14h00	4,72	51,08	41,21	4.63	50.41	40.91	4.54	49.40	40.57	4.38	48.44	39.96
16h00	4,43	50,50	40,09	4.31	49.55	39.42	4.20	48.23	38.95	4.06	47.88	38.89
18h00	3,36	43,44	35,2	3.27	42.44	34.69	3.20	41.60	34.39	3.10	41.16	33.96
20h00	1,16	25,53	24,36	1.10	25.47	24.24	1.08	25.15	23.72	1.03	25.02	23.77

Tableau 5.1 : Résultats de l'effet de la densité surfacique sur les indices de confort thermique. (Source : Auteure, 2021)

5.1.1.2.L'influence de la hauteur des constructions sur les indices de confort thermique : Le cas de l'effet combiné de la hauteur en fonction de la densité surfacique

Temps (h)	Cas de l'effet combiné de la densité et la hauteur											
	Cas de densité 17%											
	Scénario cas de base : Hauteur initiale 15 m			Scénario N°01 : Hauteur 30 m			Scénario N°02 : Hauteur 45 m			Scénario N°03 : Hauteur 60 m		
	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)
06h00	-0.98	15.22	11.58	-1.04	15.44	10.66	-1.03	15.32	10.49	-1.01	15.49	10.79
08h00	1.47	35.09	26.71	1.33	33.29	25.60	1.25	30.78	25.02	1.23	32.75	24.97
10h00	2.92	41.90	32.91	2.70	40.75	31.68	2.55	39.14	30.89	2.50	38.36	30.74
12h00	3.93	46.33	37.38	3.72	45.45	36.47	3.62	43.88	35.90	3.54	43.92	35.54
14h00	4.72	51.08	41.22	4.48	49.43	40.16	4.30	48.36	39.18	4.17	47.47	38.53
16h00	4.44	50.50	40.09	4.14	47.97	38.71	3.90	46.17	37.28	3.77	45.34	36.89
18h00	3.36	43.44	35.20	3.16	41.74	34.10	3.03	40.91	33.31	2.98	40.88	33.17
20h00	1.11	25.53	24.37	1.07	25.21	23.93	1.04	25.07	23.52	1.02	25.07	23.06

Tableau 5.2 : Résultats de l'effet combiné de l'augmentation de la hauteur et la densité surfacique (Cas de densité 17%) sur les indices de confort thermiques. (Source : Auteure, 2021)

Temps (h)	Cas de l'effet combiné de la densité et la hauteur											
	Cas de densité 34%											
	Scénario (a) Hauteur initiale 15 m			Scénario N°04 : Hauteur 30 m			Scénario N°05 : Hauteur 45 m			Scénario N°06 : Hauteur 60 m		
	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)
06h00	-1.06	15.40	11.23	-1.05	15.43	11.19	-1.03	15.49	10.28	-1.01	14.43	9.47
08h00	1.39	34.03	26.27	1.26	31.47	25.23	1.21	32.64	24.11	1.21	31.12	24.01
10h00	2.80	41.34	32.28	2.57	40.20	31.25	2.39	37.85	29.38	2.38	36.80	29.64
12h00	3.82	46.05	36.72	3.61	44.31	35.93	3.47	43.05	35.02	3.39	43.03	34.77
14h00	4.63	50.41	40.91	4.33	48.05	39.41	4.11	46.56	38.26	4.00	47.21	37.70
16h00	4.31	49.55	39.42	4.02	48.02	38.17	3.76	44.98	36.50	3.67	45.18	36.14
18h00	3.27	42.44	34.69	3.08	41.59	33.70	2.95	39.36	32.23	2.91	40.75	32.47
20h00	1.10	25.47	24.24	1.05	25.04	23.51	1.03	24.98	22.35	1.03	24.89	22.14

Tableau 5.3 : Résultats de l'effet combiné de la hauteur et la densité surfacique (Cas de densité 34%) sur les indices de confort thermique. (Source : Auteure, 2021)

Temps (h)	Cas de l'effet combiné de la densité et la hauteur											
	Cas de densité 51%											
	Scénario (b) : Hauteur initiale 15 m			Scénario N°07 : Hauteur 30 m			Scénario N°08 : Hauteur 45 m			Scénario N°09 : Hauteur 60 m		
	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)
06h00	-1.10	15.61	10.91	-1.04	15.42	8.62	-1.04	15.38	6.67	-0.95	15.58	8.88
08h00	1.32	33.98	25.65	1.24	30.34	24.57	1.21	30.17	22.57	1.16	32.06	21.77
10h00	2.66	39.99	31.71	2.43	38.19	30.17	2.29	36.64	27.60	2.23	35.99	27.15
12h00	3.70	44.81	36.42	3.52	42.66	35.33	3.26	40.99	32.97	3.15	41.38	32.47
14h00	4.54	49.40	40.57	4.21	46.80	39.26	3.95	44.74	36.67	3.77	44.24	35.74
16h00	4.20	48.23	38.95	3.89	45.78	37.60	3.63	43.75	34.99	3.52	43.70	34.15
18h00	3.20	41.60	34.39	3.02	39.95	32.45	2.90	39.20	31.26	2.84	40.01	30.94
20h00	1.08	25.15	23.72	1.03	24.91	21.57	1.02	24.80	20.93	1.05	24.87	21.25

Tableau 5.4 : Résultats de l'effet combiné de la hauteur et la densité surfacique (Cas de densité 51%) sur les indices de confort thermique. (Source : Auteure, 2021)

Temps (h)	Cas de l'effet combiné de la densité et la hauteur											
	Cas de densité 68%											
	Scénario (c) : Hauteur initiale 15 m			Scénario N°10 : Hauteur 30 m			Scénario N°11 : Hauteur 45 m			Scénario N°12 : Hauteur 60 m		
	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)
06h00	-1.06	15.03	11.89	-1.05	15.17	10.87	-1.04	15.39	9.74	-0.97	15.80	7.35
08h00	1.26	33.09	25.48	1.19	33.15	24.40	1.14	32.73	23.31	1.11	33.56	21.16
10h00	2.53	40.12	31.51	2.37	37.38	30.36	2.28	36.22	28.76	2.16	36.45	26.38
12h00	3.66	44.76	36.55	3.44	42.84	35.11	3.23	41.46	33.81	3.02	39.33	31.14
14h00	4.38	48.44	39.96	4.14	47.12	38.50	3.88	45.21	37.25	3.63	42.57	34.67
16h00	4.06	47.88	38.89	3.73	45.16	36.58	3.55	44.22	35.42	3.43	42.49	33.44
18h00	3.10	41.16	33.96	2.90	39.70	32.89	2.80	39.70	31.62	2.75	39.04	30.10
20h00	1.03	25.02	23.77	0.99	24.78	22.83	0.99	24.66	22.02	1.01	24.74	20.71

Tableau 5.5 : Résultats de l'effet combiné de la hauteur et la densité surfacique (Cas de densité 68%) sur les indices de confort thermique. (Source : Auteure, 2021)

Résumé

Le confort thermique est un concept important dans la conception de l'environnement bâti, qui se réfère à la capacité d'un espace à fournir des conditions thermiques optimales pour les usagers. Lorsqu'il s'agit d'espaces extérieurs, le confort thermique est tout aussi important que pour l'intérieur, car les espaces urbains présentent des lieux de rencontre et de détente pour les citoyens.

En ville, les ambiances thermiques extérieures sont influencées par de nombreux facteurs climatiques tels que la température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité relative et la vitesse du vent. Ces paramètres microclimatiques sont affectés à leur tour par la morphologie urbaine des tissus urbains, qui joue un rôle déterminant dans la génération des microclimats urbains.

Aujourd'hui, les villes sont de plus en plus urbanisées, et les problèmes liés au climat tels que la surchauffe urbaine sont devenus une réalité à ne pas négliger. De ce fait, notre étude s'est intéressée à la façon dont les formes urbaines, par leurs géométries et leurs densités, affectent les conditions de confort dans les espaces publics dans le contexte d'un climat chaud et sec qui caractérise la ville de Batna et par suite, vise à concevoir des espaces urbains ayant un confort thermique acceptable.

La présente étude s'inscrit dans un cadre environnemental, en s'intéressant aux effets de la morphologie urbaine par l'indicateur de densité surfacique et de hauteur des constructions sur la régulation du microclimat urbain au sein de notre cas d'étude, ainsi, l'optimisation de la forme urbaine bâtie au sein de notre cas d'étude a fait référence à une densification horizontale comme première étape, et ensuite à une densification verticale, afin d'étudier l'effet de chaque configuration spatiale et d'en tirer, à la fin, des recommandations pour concevoir de meilleures configurations urbaines à confort thermique plus convivial.

Dans l'objectif d'améliorer les conditions de confort thermique en milieu urbain, nous avons effectué des simulations par le biais du logiciel numérique ENVI-met 4.4.6 qui permet de prédire les plages de confort thermique au travers des indices thermiques (PMV, PET et UTCI), à travers 16 scénarios d'aménagement urbain, intégrant l'effet horizontal et vertical du cadre bâti. Les résultats de simulation ont abouti à des conclusions significatives sur la densification des tissus urbains, et leurs influences positives sur les ambiances thermiques extérieures.

Mots clés : Morphologie urbaine, densification urbaine, microclimat, confort thermique, simulation numérique (ENVI-met).

Abstract

Thermal comfort is an important concept in the design of the built environment, which refers to the ability of a space to provide optimal thermal conditions for users. When it comes to outdoor spaces, thermal comfort is just as important as it is for indoor spaces, as urban spaces are places where citizens can meet and relax.

In the city, outdoor thermal environments are influenced by many climatic factors such as air temperature, mean radiant temperature, relative humidity and wind speed. These microclimatic parameters are in turn affected by the urban morphology, which plays a determining role in the generation of urban microclimates.

Today, cities are increasingly urbanized, and climate-related problems such as urban overheating have become a reality that cannot be ignored.

From this state, our study undertook how urban forms, through their geometries and densities, affect the conditions of comfort in public spaces, in Batna city, known with its hot and dry climate and aims to design urban spaces with an acceptable thermal comfort

The present study is part of an environmental framework, focusing on the effects of urban morphology through the indicators of surface density and building height on the regulation of the urban microclimate within our case study.

In order to improve the thermal comfort conditions in urban areas, we carried out simulations using the numerical software ENVI-met 4.4.6, which allows the prediction of thermal comfort ranges through thermal indices (PMV, PET and UTCI) in 16 urban development scenarios, integrating the horizontal and vertical effect of the built environment. The simulation results led to significant conclusions on the densification of urban fabrics, which has become an essential strategy for designers to consider when designing new urban spaces.

Keywords: Urban morphology, urban densification, microclimate, thermal comfort, numerical simulation (ENVI-met).

الراحة الحرارية مفهوم مهم في تصميم البيئة المبنية، والتي تشير إلى قدرة المساحة على توفير الظروف الحرارية المثلى للمستخدمين. عندما يتعلق الأمر بالمساحات الخارجية، فإن الراحة الحرارية لا تقل أهمية عن المساحات الداخلية، حيث أن المساحات الحضرية هي أماكن يمكن للمواطنين الالتقاء والاسترخاء فيها. في المدينة، تتأثر البيئات الحرارية الخارجية بالعديد من العوامل المناخية مثل درجة حرارة الهواء ومتوسط درجة الحرارة المشعة والرطوبة النسبية وسرعة الرياح. تتأثر هذه العوامل المناخية الدقيقة بدورها بالتشكل الحضري للنسيج الحضري، والذي يلعب دورًا حاسمًا في توليد المناخ المحلي الحضري. اليوم، أصبحت المدن متحضرة بشكل متزايد، وأصبحت المشاكل المتعلقة بالمناخ مثل ارتفاع درجة حرارة المدن حقيقة لا يمكن تجاهلها.

من هذه الحالة، اهتمت دراستنا بكيفية تأثير الأشكال الحضرية، من خلال هندستها وكثافتها، على ظروف الراحة في الأماكن العامة بمدينة باتنة ذات مناخ حار وجاف كما تهدف إلى تصميم مساحات حضرية بمستويات معينة من الراحة الحرارية. الدراسة الحالية هي جزء من إطار بيئي، يركز على آثار التشكل الحضري من خلال مؤشر كثافة السطح المبني وارتفاع البناء على تنظيم المناخ المحلي الحضري في دراسة الحالة الخاصة بنا.

من أجل تحسين ظروف الراحة الحرارية في المناطق الحضرية، أجرينا عمليات محاكاة باستخدام البرنامج الرقمي-ENVI met 4.4.6، والذي يسمح بالتنبؤ بنطاقات الراحة الحرارية من خلال المؤشرات الحرارية (PMV) و (PET) و (UTCI) في 16 سيناريوهات التنمية الحضرية، دمج التأثير الأفقي والرأسي للبيئة المبنية. أدت نتائج المحاكاة إلى استنتاجات مهمة حول تكثيف الانسجة الحضرية، والتي أصبحت استراتيجية أساسية للمصممين للاخذ بعين الاعتبار في تصميم مساحات حضرية.

الكلمات الرئيسية: التشكل الحضري، التكثيف الحضري، المناخ المحلي، الراحة الحرارية، المحاكاة الرقمية

(ENVI-met).