

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider-Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie

Département : Architecture

Ref : .....



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

المرجع: .....

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

**Doctorat LMD : en Architecture**

Option : Habitat et Villes Durables

**L'impact de la morphologie des espaces publics sur le  
microclimat, pour un meilleur confort. Cas de la ville  
d'Annaba**

Présentée par :

**M<sup>lle</sup> BOUSSAIDI Karima**

**Sous la direction du Professeur : BENABBAS Moussadek**

Pr. BELGHAR Noureddine	Président	Professeur	Université de Biskra
Pr. BENABBAS Moussadek	Rapporteur	Professeur	Université de Biskra
Dr. DJAGHROURI Djamila	Examinatrice	MCA	Université de Biskra
Pr. LOUAFI Samira	Examinatrice	Professeur	Université de Constantine 3
Pr. HASIM Altan	Invité	Professeur	University PMU Arabia Saudi

Année Universitaire : 2022/2023

# Dédicace

*À la mémoire de mon cher frère,*

*À mes parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur soutien et leurs prières tout au long  
de mes études,*

*À ma sœur pour ses encouragements permanents, et son soutien moral*

*À toute ma famille*

# Remerciement

*Je remercie le Bon Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force et le courage nécessaires pour accomplir ce travail.*

*Je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours. Le chemin pour parvenir à cette réalisation a été ardu, mais grâce à votre soutien, j'ai pu surmonter les défis et réussir cette étape importante de ma vie académique.*

*Je souhaite remercier mon directeur de thèse, **Pr. Moussadek BENABBAS**, pour sa patience, son expertise et ses précieux conseils. Votre encadrement constant et votre soutien indéfectible ont été essentiels à la réussite de ce travail de recherche.*

*Je voudrais également exprimer ma gratitude envers **Pr. Djamila DJAGHROURI**, **Pr. Hasim ALTAN** et **Pr. Mohamed BENZEZOUR**, vos commentaires perspicaces et vos suggestions constructives ont grandement contribué à l'amélioration de ma thèse. Je suis reconnaissante d'avoir pu bénéficier de votre expertise et de vos précieux conseils lors des différentes étapes de mon travail de recherche.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury **Pr. BELGHAR Nouredine** et **Pr. LOUAFI Samira**, d'avoir gentiment accepté d'évaluer ce travail. Je leur adresse à tous les deux mes sincères remerciements et mon plus profond respect.*

*Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers ma famille. Leur amour, leur soutien inconditionnel et leur compréhension ont été une source de réconfort et de motivation pendant les moments difficiles. Je suis profondément reconnaissant de leur soutien.*

*Une fois de plus, je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ma thèse de doctorat. Votre soutien, vos conseils et votre présence ont été inestimables et ont fait de cette expérience une expérience enrichissante et mémorable.*

## Table des matières

Dédicace .....	I
Remerciement.....	II
Table des matières .....	III
Liste des figures .....	IV
Liste des tableaux .....	V
Introduction générale : .....	1
Problématique : .....	8
Hypothèses : .....	9
Objectifs de la recherche :.....	9
L'analyse conceptuelle :.....	10
Méthodologie et outils de recherche : .....	12
Structure de la thèse : .....	13
<b>Partie théorique .....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre I : Analyse des concepts de la recherche.....</b>	<b>18</b>
Introduction .....	19
I.1 Morphologie de l'espace public .....	20
I.1.1 Emergence de la Morphologie urbaine .....	20
I.1.2 Définition de la morphologie urbaine .....	21
I.1.3 Les approches de la forme urbaine .....	22
I.1.4 Morphologie urbaine et microclimat : .....	24
I.1.5 L'espace public.....	25
I.1.5.1 Définition de l'espace public.....	25
I.1.5.2 Les types de l'espace public.....	26
I.1.5.3 La place publique.....	27
I.1.5.4 La rue.....	29
I.1.5.5 Les parcs, jardin.....	29
I.2 Paramètres morphologiques .....	30
I.2.1.1 Paramètres morphologiques liés au tissu urbain.....	30
I.2.1.2 La sinuosité.....	30
I.2.1.3 La rugosité .....	31
I.2.1.4 La porosité .....	31
I.2.1.5 La densité.....	32

I.2.1.6	Contiguïté .....	33
I.2.2	Paramètres morphologiques liés à l'espace public .....	33
I.2.2.1	Le ratio H/L (le prospect) .....	33
I.2.2.2	Le facteur de vue du ciel (SVF).....	34
I.2.2.3	L'orientation.....	35
I.3	Microclimat urbain Ilot de chaleur urbain : .....	35
I.3.1	La climatologie urbaine .....	35
I.3.2	Les échelles du climat dans le milieu urbain .....	37
I.3.3	Le microclimat urbain.....	37
I.3.4	Facteurs influençant le microclimat.....	38
I.3.5	L'influence de l'urbanisation sur le microclimat .....	39
I.3.6	Le phénomène d'Ilot de chaleur urbain.....	40
I.3.6.1	La notion de l'îlot de chaleur urbain .....	40
I.3.6.2	Les origines de l'ICU .....	41
I.3.6.3	Les types de l'îlot de chaleur urbain (ICU) .....	42
I.3.6.4	Approches pour étudier l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU).....	42
I.4	Le confort thermique extérieur .....	43
I.4.1	Définition du confort thermique .....	43
I.4.2	Le confort thermique extérieur .....	44
I.4.3	Les facteurs qui influent sur le confort thermique extérieur.....	45
I.4.3.1	Influences directes .....	45
I.4.3.2	Influences indirectes .....	47
	Conclusion : .....	48
<b>Chapitre II : Etat de l'art et positionnement épistémologique .....</b>		<b>50</b>
	Introduction : .....	51
II.1	Les études du microclimat urbain.....	52
II.1.1	Approche et méthodes d'étude du microclimat.....	52
II.1.1.1	Méthode expérimentale : Observations et Mesures sur terrain .....	53
II.1.1.2	Méthodes basées sur la télédétection et les SIG .....	56
II.1.1.3	Méthodes basées sur la modélisation, la simulation numérique.....	58
II.1.2	Les publications les plus citées sur le microclimat : .....	61
II.2	Les études du confort thermique .....	63
II.2.1	Approches de confort thermique .....	63
II.2.1.1	L'approche rationnelle ou du bilan thermique .....	63

II.2.1.2	Approche adaptative .....	63
II.2.1.3	Les approches de collecte des données.....	64
II.2.2	Les méthodes d'évaluation du confort thermique extérieur.....	65
II.2.2.1	Méthodes d'évaluation à état stable .....	65
II.2.2.2	Les méthodes d'évaluation non-stationnaires .....	65
II.2.2.3	Évaluation du point de vue comportemental .....	66
II.2.3	Les indices du confort thermique .....	66
II.2.4	Les normes et standards du confort thermique adaptatif.....	68
II.2.5	Les études menées sur le confort thermique extérieur .....	69
II.3	La simulation numérique .....	71
II.3.1	Les applications de la CFD dans les conceptions urbaines et architecturales....	71
II.3.2	Les logiciels de simulation du microclimat et du confort thermique extérieur : 73	
II.3.2.1	Le modèle de température et d'humidité ADMS (ADMS-TH) .....	75
II.3.2.2	Modèle SkyHelios .....	75
II.3.2.3	ANSYS FLUENT .....	75
II.3.2.4	ENVI-Met .....	76
II.3.2.5	RayMan .....	76
II.3.2.6	SOLWEIG .....	76
II.3.2.7	TownScope .....	77
II.3.2.8	UMEP .....	77
II.4	Les recherches portant sur l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique extérieur .....	78
II.4.1	Etude de Ali-Toudert (2005) : « Confort thermique extérieur dans l'ancienne ville désertique de Beni-Isguen, en Algérie ».....	80
II.4.1.1	Méthode adoptée.....	80
II.4.1.2	Résultats.....	81
II.4.2	Etude de Shashua-Bar (2012) : « Options de conception de refroidissement passif pour améliorer le confort thermique dans les rues urbaines d'un climat méditerranéen (Athènes) par temps chaud en été » .....	82
II.4.2.1	Méthode adoptée.....	82
II.4.2.2	Résultats.....	82
II.4.3	Etude de Salata (2016): “ Confort thermique extérieur dans la région méditerranéenne. Une étude transversale à Rome, en Italie » .....	83
II.4.3.1	Méthode adoptée.....	83

II.4.3.2 Résultats.....	84
II.4.4 Etude de Chatzidimitriou (2017): « Conception des canyons de rue et potentiel d'amélioration pour les espaces urbains ouverts » .....	84
II.4.4.1 Méthode adoptée.....	85
II.4.4.2 Résultats.....	86
II.5 Choix de la méthode d'investigation .....	86
Conclusion : .....	87
<b>Partie pratique.....</b>	<b>89</b>
<b>Chapitre III : présentation et investigation du cas d'étude.....</b>	<b>90</b>
Introduction : .....	91
III.1 Présentation de la ville d'Annaba :.....	91
III.1.1 Situation : .....	92
III.1.2 Topographie et urbanisme de la ville .....	93
III.1.3 Histoire et urbanisme de la ville.....	94
III.2 Analyse climatique de la ville d'Annaba.....	100
III.2.1 La température de l'air .....	101
III.2.2 L'humidité relative .....	102
III.2.3 Les vents.....	104
III.2.4 Les précipitations .....	106
III.2.5 L'insolation .....	107
III.2.6 L'indice d'aridité.....	108
III.2.7 Détermination de l'isotherme.....	110
III.3 Choix et présentation du cas d'étude .....	110
III.3.1 La place du cours de la révolution .....	112
III.3.2 La placette de la vieille ville .....	113
III.3.3 La placette Alexis Lambert .....	113
III.3.4 La place du Cours d'El-Bouni.....	114
III.3.5 La placette d'El-Bouni .....	115
III.4 Mesure des paramètres climatiques .....	115
III.4.1 Protocole et campagnes de mesure .....	115
III.4.2 Instruments utilisés.....	116
III.4.3 Paramètres climatiques mesurés.....	117
III.5 Résultats des mesures in situ .....	118
III.5.1 Comparaison entre les points de mesure .....	118

III.5.1.1	Température de l'air .....	118
III.5.1.2	L'humidité relative .....	120
III.5.1.3	La vitesse de l'air.....	122
III.5.2	Comparaison entre les espaces étudiés et la station météorologique.....	124
III.5.2.1	Température de l'air .....	124
III.5.2.2	L'humidité relative .....	126
III.5.2.3	La vitesse du vent .....	127
Conclusion :	.....	128
<b>Chapitre IV : simulation numérique .....</b>		<b>130</b>
Introduction .....		131
IV.1	Présentation du modèle Envi-met.....	132
IV.1.1	Structure générale du logiciel.....	132
IV.1.2	Interface et mise en page du logiciel (Envi-met 5.0.2) .....	133
IV.2	Processus et méthode de simulation .....	135
IV.2.1	Données d'entrée : modèle 3D et fichier de configuration .....	136
IV.2.2	Fichiers de sortie .....	138
IV.3	Validation du modèle Envi-met.....	139
IV.3.1	Place du cours de la révolution.....	139
IV.3.2	Place Alexis Lambert .....	140
IV.3.3	Placette de Vieille Ville.....	141
IV.3.4	Place du Cours El-Bouni .....	142
IV.3.5	Placette El-Bouni.....	143
IV.3.6	Calcul du coefficient de corrélation $R^2$ .....	144
IV.4	Résultats de la simulation :.....	146
IV.4.1	Les paramètres climatiques .....	146
IV.4.1.1	Place du cours de la révolution :.....	146
IV.4.1.2	Placette Alexis Lambert.....	148
IV.4.1.3	Placette Vieille Ville.....	150
IV.4.1.4	Place du Cours El-Bouni .....	152
IV.4.1.5	Placette El-Bouni .....	154
IV.4.2	Les indices de confort thermique .....	156
IV.4.2.1	Place du cours de la révolution.....	156
IV.4.2.2	Place Alexis Lambert.....	158
IV.4.2.3	Place Vieille Ville.....	159

IV.4.2.4	Place du Cours El-Bouni .....	160
IV.4.2.5	Place El-Bouni.....	161
IV.5	Comparaison entre les placettes étudiées .....	162
IV.5.1	Les paramètres climatiques .....	163
IV.5.1.1	Température de l'air .....	163
IV.5.1.2	Vitesse de l'air .....	164
IV.5.1.3	Humidité relative .....	166
IV.5.1.4	Température moyenne radiante .....	167
IV.5.2	Les indices de confort .....	169
IV.5.2.1	PET .....	169
IV.5.2.2	SET .....	170
IV.5.2.3	UTCI.....	171
	Conclusion.....	173
	<b>Chapitre V : Scénarios d'amélioration.....</b>	<b>175</b>
	Introduction .....	176
V.1	Choix des paramètres morphologiques et présentation des scénarios .....	176
V.1.1	Hauteur du bâti .....	176
V.1.2	Densité du bâti.....	178
V.1.3	Orientation.....	179
V.1.4	Végétation .....	180
V.2	Impact de la hauteur du bâti .....	180
V.2.1	Impact de la hauteur du bâti sur les paramètres climatiques.....	180
V.2.1.1	Température de l'air .....	181
V.2.1.2	Humidité relative .....	182
V.2.1.3	Vitesse du vent.....	183
V.2.1.4	Température moyenne radiante .....	184
V.2.2	Impact de la hauteur du bâti sur les indices de confort thermique.....	186
V.2.2.1	PET (Température équivalente physiologique).....	186
V.2.2.2	SET (température effective standard).....	187
V.2.2.3	UTCI (L'indice universel du climat thermique) .....	189
V.3	Impact de la densité du bâti .....	190
V.3.1	Impact de la densité du bâti sur les paramètres climatiques .....	190
V.3.1.1	Température de l'air .....	191
V.3.1.2	Humidité relative .....	192

V.3.1.3	Vitesse de l'air .....	193
V.3.1.4	Température moyenne radiante .....	195
V.3.2	Impact de la densité du bâti sur les indices de confort thermique.....	196
V.3.2.1	PET (Température équivalente physiologique).....	197
V.3.2.2	SET (température effective standard).....	198
V.3.2.3	UTCI (L'indice universel du climat thermique) .....	199
V.4	Impact de l'orientation.....	201
V.4.1	Impact de l'orientation sur les paramètres climatiques .....	201
V.4.1.1	Température de l'air .....	202
V.4.1.2	Humidité relative .....	204
V.4.1.3	Vitesse de l'air .....	207
V.4.1.4	Température moyenne radiante .....	210
V.4.2	Impact de l'orientation sur les indices de confort thermique .....	212
V.4.2.1	PET (Température équivalente physiologique).....	213
V.4.2.2	SET (température effective standard).....	215
V.4.2.3	UTCI (L'indice universel du climat thermique) .....	217
V.5	Impact de la végétation.....	220
V.5.1	Le cours de la révolution :.....	220
V.5.2	Le cours el bouni .....	220
V.5.3	La placette de la vielle ville.....	220
V.5.4	La placette d'El-Bouni .....	221
V.5.5	La placette Alexis Lambert .....	221
	Conclusion : .....	221
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>225</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>233</b>
	<b>Résumé .....</b>	<b>300</b>

## Liste des figures

Figure I- 1: une synthèse de l'ensemble des concepts abordés dans cette recherche .....	12
Figure I- 2: méthodologie et outils de recherche .....	13
Figure I- 3: schéma synthétique de la structure globale de cette thèse.....	16
Figure I- 4: Facteurs modulateurs de l'espace urbain. Source : (Murat, 2013).....	28
Figure I- 5: Quelques typologies des espaces urbains de Krier. source : (Murat, 2013).....	28
Figure I- 6: Tissu urbain caractérisé par une rue orientée avec un angle $\gamma$ contre un flux de gradient de pression. Source: (Adolphe, 2001) .....	31
Figure I- 7: (a) Zones ouvertes dans une rue dans un plan vertical (b) Flux d'air dans une rue, dans un plan horizontal (c) Espaces latéraux ou proches négligés dans un plan horizontal. Source : (Adolphe, 2001).....	32
Figure I- 8: The diagram of indicators included in 'space-mate'" en français est : "Le diagramme des indicateurs inclus dans 'space-mate (Wei et al., 2016).....	32
Figure I- 9: Distribution schématique du rayonnement solaire incident dans différents scénarios de H/L (d'après Givoni, 1998, p.248) repéré dans (Fouad, 2007).....	34
Figure I- 10: Branche de l'urbanisme dans la taxonomie des études de climatologie urbaine. Source : (Shafaghat et al. 2016).....	36
Figure I- 11: Les facteurs globaux responsables du microclimat d'une région. Source : (Bherwani et al., 2020).....	39
Figure I- 12: Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée montrant le phénomène d'ICU (Pigeon et al., 2008) repéré dans (FAHED, 2018) .....	41
Figure I- 13: Approches et méthodes d'étude de l'îlot de chaleur urbain (ICU) ainsi que leurs limites. Source : (Aflaki et al., 2017) .....	43
Figure I- 14: Influences directes et indirectes sur le confort thermique extérieur. Source : (Lai et al. 2020) .....	45
Figure II- 1: Avancées majeures dans le domaine de la recherche sur le microclimat urbain. Source : (Bherwani et al., 2020).....	53
Figure II- 2: Extrait de l'évolution des études de mesure sur terrain dans le domaine du microclimat. Source : (Bherwani et al., 2020).....	54
Figure II- 3: Utilisation des capacités de télédétection pour la recherche sur le microclimat urbain. Source : (Bherwani et al., 2020).....	56
Figure II- 4: l'évolution de l'utilisation de la CFD pour la recherche sur le microclimat urbain. Source : (Bherwani et al., 2020).....	58
Figure II- 5: les indices du confort thermique extérieur. Source : (Coccolo et al., 2016).....	67

Figure II- 6: La répartition des études sur le confort thermique extérieur. Source : (Kumar & Sharma, 2020).....	70
Figure II- 7: Répartition des études microclimatique par continent. Source : (Kumar & Sharma, 2020) .....	70
Figure II- 8:Diagramme des plug-ins intégrant des simulations CFD pour les plateformes de conception. Source : (Hu et al., 2023). .....	73
Figure II- 9:La vieille ville de Beni-Isguen et son oasis dans la vallée du M'zab, Algérie. Source : (Ali-Toudert et al., 2005) .....	80
Figure II- 10:a. Points de surveillance dans le centre-ville de Thessalonique (lat. 40,5°N) et b. Facteurs de vue du ciel calculés avec envi_met. Source : (Chatzidimitriou & Yannas, 2017).....	85
Figure II- 11: synthèse de la méthodologie adoptée. Source : auteur.....	87
Figure III- 1: Situation et limites de la wilaya et la ville d'Annaba. Source : auteur.....	92
Figure III- 2: Topographie des communes d'Annaba et d'El Bouni. Source : (Zennir et al., 2020) traité par l'auteur. ....	93
Figure III- 3: Les périodes historiques la ville d'Annaba. Source : auteur.....	95
Figure III- 4: Les trois tissus constituant la ville d'Annaba. Source : PDAU, traité par l'auteur.....	96
Figure III- 5: Plan de Bûna à l'époque Ottomane. ....	97
Figure III- 6: a) le tissu haussmannien, b) quartier de la colonne, c) quartier du Beauséjour.....	98
Figure III- 7:L'évolution urbaine de la ville d'Annaba. Source : (Laouar et al., 2019).....	100
Figure III- 8:L'évolution urbaine de la ville d'Annaba. Source : (Laouar et al., 2019).....	100
Figure III- 9: Graphe de la variation de la température de l'air pendant de la période entre 2005 et 2018 .....	102
Figure III- 10: carte de la variation spatiale de la température de l'air moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba. Source : auteur.....	102
Figure III- 11: Graphe de la variation de l'humidité relative pendant de la période entre 2005 et 2018 .....	103
Figure III- 12: Carte de la variation spatiale de l'humidité moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba. Source : auteur.....	104
Figure III- 13: Graphe de la variation de la vitesse du vent pendant de la période entre 2005 et 2018 .....	105
Figure III- 14: Carte de la variation spatiale de la vitesse du vent moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba. Source : auteur.....	105
Figure III- 15: Rose de vents enregistrés à 15 h (A) et 3 h (B) à l'aéroport d'Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) ; source : (Dahech & Saihia, 2019).....	106

Figure III- 16: les précipitations mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018.....	107
Figure III- 17: Carte de la variation spatiale des précipitations moyennes annuelles de la wilaya d'Annaba. Source : auteur .....	107
Figure III- 18: l'Insolation mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018.....	108
Figure III- 19: L'indice d'aridité de la période entre 2005 et 2018.....	109
Figure III- 20: Isotherme de la ville d'Annaba. Source : Climate Consultant 6.0, adapté par l'Auteur .....	110
Figure III- 21: Situation des places choisies. Source : Google Earth.....	112
Figure III- 22: Les points de mesure dans les cinq places.....	116
Figure III- 23: appareil Testo 480 .....	116
Figure III- 24: Graphe présentant une comparaison entre les températures enregistrées au niveau des points de mesures d'El-Bouni : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019.....	119
Figure III- 25: Graphe présentant une comparaison entre les températures enregistrées au niveau des points de mesures du Centre-Ville : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019.....	120
Figure III- 26: Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative enregistrées au niveau des points de mesure d'El-Bouni : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019 .....	121
Figure III- 27: Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative enregistrées au niveau des points de mesure du centre-ville : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019 .....	122
Figure III- 28: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent enregistrées au niveau des points de mesure d'El-Bouni : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019 .....	122
Figure III- 29: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent enregistrées au niveau des points de mesure du centre-ville : a) Vitesse de l'air mesurée le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019.....	123
Figure III- 30: Graphe présentant une comparaison entre les Températures mesurées au niveau d'El-Bouni et les données de la station météorologique : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019 .....	125
Figure III- 31 : Graphe présentant une comparaison entre les Températures mesurées au niveau du centre-ville et les données de la station météorologique : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019.....	126
Figure III- 32: Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative mesurées au niveau d'El-Bouni et les données de la station météorologique : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019 .....	126
Figure III- 33 : Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative mesurée au niveau du centre-ville et les données de la station météorologique : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019.....	127

Figure III- 34: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent mesurée au niveau d'El-Bouni: a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019 .....	128
Figure III- 35: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent mesurée au niveau du centre-ville : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019 .....	128
Figure IV- 1: Vue d'ensemble du flux de données au sein de l'ENVI-met. Source : (Maleki et al., 2014). .....	133
Figure IV- 2: les composants du Headquarter d'Envi-met 5.0.2. Source : Logiciel Envimet, traité par l'auteur .....	134
Figure IV- 3: Diagramme du processus de simulation Envi-met .....	136
Figure IV- 4:L'interface du Logiciel Sketch-up avec le plugin ENVI-met INX. Source : Auteur .....	137
Figure IV- 5: exemple de données d'entrée dans le fichier de configuration. Source : Auteur .....	138
Figure IV- 6: Comparaison entre données mesurées et simulées dans le cours de la Révolution : a) Tair le 28 juillet 2019. b) HR le 28 juillet 2019. c) Tair le 01 Aout 2019. d) HR le 01 Aout 2019.....	140
Figure IV- 7: Comparaison entre données mesurées et simulées dans la placette Alexis Lambert : a) Tair le 28 juillet 2019. b) HR le 28 juillet 2019. c) Tair le 01 Aout 2019. d) HR le 01 Aout 2019.....	141
Figure IV- 8: Comparaison entre données mesurées et simulées dans la placette de la vieille ville: a) Tair le 28 juillet 2019. b) HR le 28 juillet 2019. c) Tair le 01 Aout 2019. d) HR le 01 Aout 2019....	142
Figure IV- 9: Comparaison entre données mesurées et simulées dans le cours El-Bouni: a) Tair le 29 juillet 2019. b) HR le 29 juillet 2019. c) Tair le 02 Aout 2019. d) HR le 02 Aout 2019.....	143
Figure IV- 10: Comparaison entre données mesurées et simulées dans la placette El-Bouni: a) Tair le 29 juillet 2019. b) HR le 29 juillet 2019. c) Tair le 02 Aout 2019. d) HR le 02 Aout 2019.....	144
Figure IV- 11: Carte des paramètres climatiques au niveau du cours de la révolution. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c)humidité relative, d) température moyenne radiante. ....	148
Figure IV- 12: Graphe de la variation des paramètres climatiques au niveau du cours de la révolution. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c)humidité relative, d) température moyenne radiante.....	148
Figure IV- 13: Carte des paramètres climatiques au niveau de la placette Alexis Lambert. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c)humidité relative, d) température moyenne radiante.....	150
Figure IV- 14: Graphe présentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette Alexis Lambert. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c)humidité relative, d) température moyenne radiante. ....	150
Figure IV- 15: Carte des paramètres climatiques au niveau de la placette de la vieille ville. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c)humidité relative, d) température moyenne radiante.....	152
Figure IV- 16: Graphe représentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette de la vieille ville. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c)humidité relative, d) température moyenne radiante. ....	152

Figure IV- 17: Cartes des paramètres climatiques au niveau du cours El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante. ....	154
Figure IV- 18: Graphe représentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau du cours El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, b) température moyenne radiante. ....	154
Figure IV- 19: Carte de la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante. ....	155
Figure IV- 20: Graphe représentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante. ....	156
Figure IV- 21: Carte des indices du confort thermique au niveau du cours de la révolution. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	157
Figure IV- 22: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au niveau du cours de la révolution. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	157
Figure IV- 23 : Cartes des indices du confort thermique au niveau de la placette Alexis Lambert. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	158
Figure IV- 24: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au niveau de la placette Alexis Lambert. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	159
Figure IV- 25: Carte des indices du confort thermique au niveau de la placette de la vieille ville. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	159
Figure IV- 26: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au de la placette de la vieille ville. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	160
Figure IV- 27: Carte des indices du confort thermique au niveau du cours El-Bouni. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	161
Figure IV- 28: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au niveau du cours El-Bouni. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	161
Figure IV- 29: Carte des indices du confort thermique au niveau de la placette El-Bouni. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	162
Figure IV- 30: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au de la placette El-Bouni. a) PET, b) SET, c) UTCI. ....	162
Figure IV- 31: Carte de la température de l'air pour les cinq placettes. ....	164
Figure IV- 32: Graphe représentant la variation de la température de l'air pour les cinq placettes ....	164
Figure IV- 33: Carte de la vitesse de l'air pour les cinq placettes. ....	165
Figure IV- 34: Graphe représentant la variation de la vitesse de l'air pour les cinq placettes. ....	165
Figure IV- 35: Carte de l'humidité relative pour les cinq placettes. ....	166

Figure IV- 36: Graphe représentant la variation de l'humidité de l'air pour les cinq placettes .....	167
Figure IV- 37 : Carte de la température de moyenne radiante pour les cinq placettes.....	168
Figure IV- 38: Graphe représentant la variation de la température de moyenne radiante pour les cinq placettes.....	168
Figure IV- 39: Carte du PET pour les cinq placettes.....	169
Figure IV- 40 : Graphe représentant la variation du PET pour les cinq placettes .....	170
Figure IV- 41 : Carte représentant le SET pour les cinq placettes .....	171
Figure IV- 42 : Graphe représentant la variation du SET pour les cinq placettes .....	171
Figure IV- 43 : Carte représentant l'UTCI pour les cinq placettes .....	172
Figure IV- 44 : Graphe représentant la variation de l'UTCI pour les cinq placettes.....	173
Figure V- 1: Carte de la Température d'air pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8 .....	182
Figure V- 2 : Graphe représentant les Températures enregistrées dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02 .....	182
Figure V- 3 : Cartes de l'Humidité relative pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8 .....	183
Figure V- 4 : Graphe de l'Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02 .....	183
Figure V- 5 : Carte de la Vitesse de l'air pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8 .....	184
Figure V- 6 : Graphe de la Vitesse de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02 .....	184
Figure V- 7 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8 .....	185
Figure V- 8 : Graphe de la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02 .....	185
Figure V- 9 : Carte du PET pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8.....	187
Figure V- 10 : Graphe du PET enregistré dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02 .....	187
Figure V- 11 : Carte du SET pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8.....	188
Figure V- 12 : Graphe du SET enregistré dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02 .....	188

Figure V- 13 : Carte de l'UTCI pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur $\times$ 2, d) hauteur $\times$ 4, e) hauteur $\times$ 6, f) hauteur $\times$ 8 .....	189
Figure V- 14 : Graphe de l'UTCI enregistré dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02. ....	189
Figure V- 15 : Carte de la Température d'air pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur .....	191
Figure V- 16 : Graphe de la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	192
Figure V- 17 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur .....	193
Figure V- 18 : Graphe de la variation de l'humidité relative pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	193
Figure V- 19 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur.....	194
Figure V- 20 : Graphe de la variation de la vitesse de l'air pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	194
Figure V- 21 : Carte de la température moyenne radiante pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur.....	195
Figure V- 22 : Graphe de la variation de la température moyenne radiante pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	196
Figure V- 23 : Carte du PET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur.....	197
Figure V- 24 : Graphe de la variation du PET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	198
Figure V- 25 : Carte du SET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur.....	199
Figure V- 26 : Graphe de la variation du SET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	199
Figure V- 27 : Carte de l'UTCI pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité $\times$ 2, c) densité $\times$ 3, d) densité + hauteur.....	200
Figure V- 28 : Graphe de la variation de l'UTCI pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02.....	200
Figure V- 29 : Carte de la Température d'air pour le scénario Orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO.....	203
Figure V- 30 : Graphe de la variation de la température de l'air pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04.....	203

Figure V- 31 : Carte de la Température d'air pour le scénario Orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	204
Figure V- 32 : Graphe de la variation de la température de l'air pour le scénario de l'orientation du cours de la Révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	204
Figure V- 33 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario Orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	205
Figure V- 34 : Graphe de la variation de l'humidité relative pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	206
Figure V- 35 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario Orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	206
Figure V- 36 : Graphe de la variation de l'humidité relative pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	207
Figure V- 37 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario Orientation du cours d'El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	208
Figure V- 38 : Graphe de la variation de la vitesse de l'air pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	208
Figure V- 39 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario Orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	209
Figure V- 40 : Graphe de la variation de la vitesse de l'air pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	209
Figure V- 41 : Carte de la température moyenne radiante pour le scénario orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	210
Figure V- 42 : Graphe de la variation de la température moyenne radiante pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04..	211
Figure V- 43 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO.....	211
Figure V- 44 : Graphe de la variation de la température moyenne radiante pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	212
Figure V- 45 : Cartes du PET pour le scénario orientation du cours d'El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO.....	213
Figure V- 46 : Graphe de la variation du PET pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	214
Figure V- 47 : Cartes du PET pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	214

Figure V- 48 : Graphe de la variation du PET pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04.....	215
Figure V- 49 : Carte du SET pour le scénario orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	216
Figure V- 50 : Graphe de la variation du SET pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04.....	216
Figure V- 51 : Carte du SET pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO.....	217
Figure V- 52 : Graphe de la variation du SET pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04.....	217
Figure V- 53 : Carte de l'UTCI pour le scénario orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO.....	218
Figure V- 54 : Graphe de la variation de l'UTCI pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04.....	218
Figure V- 55 : Carte de l'UTCI pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO .....	219
Figure V- 56 : Graphe de la variation de l'UTCI pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04 .....	219

## Liste des tableaux

Tableau I- 1: Une typologie transdisciplinaire des espaces ouverts urbains couvrant l'histoire ancienne et moderne. Source : (Stanley et al., 2012).....	26
Tableau II- 1: Avancées majeures dans la recherche sur le microclimat grâce à l'analyse et l'observation sur terrain Source : (Bherwani et al., 2020).....	55
Tableau II- 2:Principales réalisations de la recherche et du développement du microclimat grâce à des mesures de télédétection. Source : (Bherwani et al., 2020).....	57
Tableau II- 3: Avancées de la recherche dans le domaine de microclimat grâce à la modélisation et aux simulations. Source : (Bherwani et al., 2020) .....	59
Tableau II- 4: Les 20 publications les plus citées basées sur la littérature publiée sur le microclimat urbain. Source : (Li et al., 2022).....	62
Tableau II- 5: Informations de base sur différentes normes de confort thermique adaptatif. Source : (de Dear et al., 2020).....	69
Tableau II- 6: Les dix auteurs les plus influents classés selon la moyenne normalisée des citations dans le domaine des évaluations du confort thermique extérieur. Source : (Dissanayake & Weerasinghe, 2021).....	71
Tableau II- 7:méthodes utilisées pour identifier, évaluer l'éligibilité des modèles et décider de leur inclusion ou exclusion. Source : (Jänicke et al., 2021).....	74
Tableau II- 8:Matrice d'évaluation des modèles conviviaux. Source : (Jänicke et al., 2021) .....	75
Tableau II- 9: Résumé des études sur les différentes stratégies d'atténuation de la température en été à midi ou dans l'après-midi, à partir de la littérature examinée par (Lai et al., 2019).....	79
Tableau II- 10: Propriétés géométriques et matérielles de tous les points de mesure dans la ville de Beni-Isguen, vallée du M'zab. Source : (Ali-Toudert et al., 2005). .....	81
Tableau III- 1: Les valeurs moyennes de la température pendant de la période entre 2005 et 2018. Source : station météorologique de l'aéroport « Rabah Bitat » d'Annaba. ....	101
Tableau III- 2: Les valeurs moyennes de l'humidité relative pendant de la période entre 2005 et 2018. Source : station météorologique de l'aéroport « Rabah Bitat » d'Annaba. ....	103
Tableau III- 3: Les valeurs moyennes de la vitesse d vent pendant de la période entre 2005 et 2018. Source : station météorologique de l'aéroport « Rabah Bitat » d'Annaba. ....	104
Tableau III- 4: les précipitations mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018 .....	106
Tableau III- 5:l'Insolation mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018 .....	108
Tableau III- 6: L'indice d'aridité de la période entre 2005 et 2018 .....	109

Tableau IV- 1: les données d'entrée de la simulation. Source : Auteur .....	138
Tableau IV- 2: récapitulatif des graphes de régression linéaire pour chaque placette .....	145
Tableau V- 1: scénarios de la hauteur du bâti de la placette El-Bouni.....	177
Tableau V- 2: scénarios de la hauteur du bâti du cours El-Bouni .....	178
Tableau V- 3: scénarios de la hauteur du bâti de la placette de la vieille ville.....	178
Tableau V- 4: scénarios de la densité du bâti de la placette El-Bouni .....	179
Tableau V- 5: scénarios de la densité du bâti du cours El-Bouni.....	179
Tableau V- 6: récapitulation des scénarios de hauteur (paramètres microclimatiques placette El-Bouni) .....	181
Tableau V- 7: récapitulation des scénarios de hauteur (indices de confort placette El-Bouni).....	186
Tableau V- 8: récapitulation des scénarios de densité (paramètres climatiques placette El-Bouni) ...	190
Tableau V- 9: récapitulation des scénarios de densité (indices de confort placette El-Bouni) .....	196
Tableau V- 10: récapitulation des scénarios de l'orientation (paramètres microclimatique, cours El- Bouni).....	201
Tableau V- 11: récapitulation des scénarios de l'orientation (paramètres microclimatique, cours de la révolution) .....	202
Tableau V- 12: Récapitulation de l'orientation (indices de confort, cours El-Bouni).....	212
Tableau V- 13: Récapitulation des scénarios de l'orientation (indices de confort, cours centre-ville).....	212
Tableau V- 14: Récapitulation des scénarios de la végétation (cours de la Révolution).....	220
Tableau V- 15: Récapitulation des scénarios de la végétation (cours El-Bouni) .....	220
Tableau V- 16: Récapitulation des scénarios de la végétation (placette de la vieille ville) .....	221
Tableau V- 17: Récapitulation des scénarios de la végétation (placette El-Bouni) .....	221
Tableau V- 18: Récapitulation des scénarios de la végétation (placette Alexis Lambert) .....	221

## **Introduction générale :**

Selon le 6ème rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, une augmentation de la température moyenne mondiale de 1,4 à 1,8 °C à 4,0 °C d'ici 2100 est présumée, à cause du réchauffement climatique, (Lopes et al., 2022; Masson-Delmotte et al., 2021). Les conséquences de ce changement climatique seront notables en milieu urbain, où vit plus de 50 % de la population mondiale, posant ainsi des défis particuliers aux zones urbaines (Wilson et al., 2008). Selon les Nations Unies, les zones urbaines dans monde entier sont en augmentation, et il est prévu que plus de 70% de la population mondiale sera située dans des centres urbains d'ici 2050. Cette croissance entraîne une augmentation de la densité urbaine des bâtiments, en particulier dans les centres villes, influençant ainsi le microclimat urbain et le confort thermique au niveau des zones urbaines (Rupp et al., 2015).

Les milieux urbains présentent une menace de stress thermique plus élevée que les milieux ruraux, à cause du phénomène appelé « îlot de chaleur urbain (ICU) » (Elnabawi & Hamza, 2019). Ce phénomène se produit à cause du changement dans le paysage naturel, en introduisant des bâtiments et des infrastructures qui remplacent les terrains naturels et la couverture végétale. Ces changements font que les zones urbaines deviennent plus chaudes que leur environnement rural, formant un « îlot » de températures plus élevées (Lopes et al., 2022; Martin-Vide & Moreno-Garcia, 2020; Oke, 1976; Oke et al., 2017).

Dans ce contexte de changement climatique et de croissance urbaine, La question du confort thermique extérieur au niveau des espaces urbains ouverts attire de plus en plus l'attention des chercheurs. De ce fait, de nombreuses études ont été menées sur le confort thermique extérieur à travers le monde (Ahmed, 2003; Ali-Toudert & Mayer, 2006; Amindeldar et al., 2017; L. Chen & Ng, 2012; Höpfe, 2002; Lopes et al., 2022; Nikolopoulou & Lykoudis, 2006a; Spagnolo & de Dear, 2003; Tseliou et al., 2010). Certaines études se sont concentrées sur l'évaluation du niveau de confort thermique au niveau des espaces urbains extérieur (Nikolopoulou et al., 2001; Thorsson et al., 2007; Zacharias et al., 2001). D'autres ont essayé de comprendre l'impact des paramètres de la morphologie urbaine (tel que la hauteur de bâti la densité le rapport h/l) sur le microclimat urbain et sur le confort des usagers par exemple : (Barradas, 1991; Matzarakis et al., 1999; Mayer & Hoppe, 1987; Svensson et al., 2003; Thorsson et al., 2007).

Cette attention particulière portée au sujet du confort thermique au niveau de l'espace public extérieur, s'explique par le rôle important de l'espace public urbain dans l'amélioration de la qualité de vie dans les centres urbains. Selon Kiven Lynch, l'espace urbain est la partie la plus importante de la ville, où se produisent le plus grand nombre de contacts et d'interactions humaines (Majid, 2004). Les espaces extérieurs urbains thermiquement confortables notamment les rues, les places, des parcs, des terrains de jeux et d'autres zones communes, offrent aux résidents des endroits publics de qualité, et plus de personnes seraient attirées vers l'extérieur, participant ainsi à une vie sociale plus active et à l'habitabilité et la vitalité urbaine des villes (Nikolopoulou & Lykoudis, 2006b). Ainsi, le confort thermique extérieur est un aspect primordial des espaces public urbains pour un développement urbain durable (Coccolo et al., 2016; Kumar & Sharma, 2020).

Le confort thermique extérieur est un sujet complexe parce qu'il est influencé par divers facteurs (Lai et al., 2020). Il est difficile de comprendre tous ses aspects interdépendants (Rupp et al., 2015). Sa définition reste ambiguë et difficile à cerner. On trouve dans la littérature plusieurs définitions du confort thermique. Il est défini selon Givoni et al., 2003, comme « *l'absence de tout inconfort et insatisfaction ou lorsque les individus n'ont ni froid ni chaud* » (Givoni et al., 2003; Nikolopoulou & Steemers, 2003; Sadeghi & Bahadori, 2021). Il a été défini par Hensen, 1991, comme « *un état dans lequel il n'y a pas d'impulsions motrices pour corriger l'environnement par le comportement* » (Djongyang et al., 2010; Hensen, 1991). (ASHRAE1) a défini le confort thermique extérieur comme "l'état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique extérieur (ASHRAE, 2017a)" (Lai et al., 2020).

La sensation du confort thermique diffère d'une personne à une autre, cela est dû à des différences personnelles, culturelles, sociales et à d'autres facteurs individuels. Sur la base des définitions du confort thermique, on constate qu'il n'est pas une condition d'état, mais plutôt un état d'esprit (Djongyang et al., 2010). La définition du confort thermique souligne que le jugement de confort est un processus cognitif impliquant de nombreuses entrées influencées par des facteurs physiques, physiologiques, psychologiques et autres, tout en sachant que c'est un état d'esprit ou satisfaction (Djongyang et al., 2010; Z. Lin & Deng, 2008). En effet, la perception du confort thermique extérieur peut varier en fonction des conditions physiologiques

---

<sup>1</sup> L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

et psychologiques des usagers, de leur capacité d'adaptation et des attentes climatiques (de Dear, 2011; Nikolopoulou & Steemers, 2003; Sharifi & Boland, 2020)

En 1962, Macpherson a défini six facteurs affectant la sensation thermique : quatre variables physiques (température de l'air, vitesse de l'air, humidité relative, température radiante moyenne) et deux variables personnelles (isolation des vêtements et niveau d'activité, c'est-à-dire taux métabolique) (Djongyang et al., 2010; Z. Lin & Deng, 2008).

(Lai et al., 2020) ont proposé un cadre conceptuel qui inclut les différents facteurs qui influencent la sensation de confort thermique extérieur. Ils ont classé ces facteurs en deux catégories principales (facteurs directe et indirecte). Cette classification est basée sur une revue de la littérature contenant les études actuelles sur le confort thermique extérieur, ce qui fournira aux chercheurs une compréhension méthodique et complète du confort thermique extérieur. Afin d'évaluer si l'état de confort thermique des espaces extérieurs est atteint, les chercheurs ont développé des approches et des indices d'évaluation du confort thermique, en essayant d'intégrer les facteurs d'influence cités ci-dessus. En effet de nombreux référentiels sont disponibles dans la littérature. (Elnabawi & Hamza, 2019) proposent un cadre d'évaluation de la perception du confort thermique extérieur afin de mesurer et de modéliser efficacement le confort thermique extérieur. Ce cadre devrait travailler sur quatre niveaux : les aspects physiques, physiologiques, psychologiques et socio-comportementaux.

Les indices de confort thermique sont des indicateurs pour évaluer l'ambiance thermique. Plus de 160 indices de confort thermique ont été développés depuis le siècle dernier pour quantifier le confort thermique des personnes (Binarti et al., 2020; Cohen et al., 2013). Seuls 4 indices sur 160 sont largement utilisés pour les études de perception thermique extérieure. (Potchter et al., 2018) le PET (température équivalente physiologique), UTCI (indice climatique thermique universel), PMV (vote moyen prédit), et le SET\*(température effective standard) sont les indices les plus utilisés pour l'évaluation du confort thermique extérieur (Kumar & Sharma, 2020).

(Coccolo et al., 2016) ont passé en revue les indices de confort thermique couramment utilisés pour les environnements extérieurs afin de guider le chercheur dans le choix de l'option appropriée en fonction des besoins de sa recherche. Ils l'ont divisé en trois catégories: les indices thermiques, indices empiriques et indices basés sur des équations linéaires (Coccolo et al., 2016)

Il existe trois approches dans lesquelles les études du confort thermique extérieur ont été étudiées. Tout d'abord, des études du confort thermique extérieur ont été menées à l'aide de simulation numérique tel que : (Ali-Toudert & Mayer, 2006; Berkovic et al., 2012; H. Chen et al., 2004; Kumar & Sharma, 2020); deuxièmement, des études ont été menées à l'aide d'enquêtes subjectives et de mesures objectives; et troisièmement, l'évaluation du confort thermique extérieur pour les projets existants ou futurs (Kumar & Sharma, 2020)

Plusieurs études à travers le monde ont indiqué que les zones urbaines densément construites ont un impact sur le microclimat urbain et à la formation des conditions climatiques urbaines différentes à celles de la campagne, formant ce que l'on appelle l'îlot de chaleur urbain (ICU). L'expression « îlots de chaleur urbains » signifie la différence de température observée entre les milieux urbains et les zones rurales environnantes. Les observations ont démontré que les températures des centres urbains peuvent atteindre jusqu'à 12 °C de plus que les régions limitrophes (Grifoni et al., 2013).

L'espace urbain ouvert avec des morphologies différentes crée un impact significatif sur le microclimat et le confort thermique. Selon plusieurs études, ces facteurs sont le rapport d'aspect (H/W), l'orientation de la rue, le facteur de vue du ciel (SVF), la densité, la hauteur, la compacité, les matériaux et la couverture de surface (Abd Elraouf et al., 2022; Adolphe, 2001; Dissanayake et al., 2021; Mahmoud & Ghanem, 2019). En effet, une bonne compréhension de l'impact de la morphologie urbaine sur les paramètres microclimatiques fournit des informations importantes pour améliorer le confort thermique extérieur, (Dissanayake et al., 2021; Lee et al., 2016, 2020). Des modifications adaptées de la géométrie de la zone urbaine peuvent améliorer les conditions thermiques extérieures (Bröde et al., 2013).

En effet, Les espaces publics jouent un rôle fondamental dans la ville. Ils peuvent accueillir de nombreuses activités ; un lieu de rencontre et de détente, lieux de circulation et de communication...etc. ils participent au bon fonctionnement et à l'animation de la ville. Ainsi, la qualité de vie dans l'espace public urbain est très importante, et constitue un enjeu de développement durable.

Adolphe affirme que la variation importante de la morphologie urbaine a un effet direct sur le climat : la vitesse du vent, la température de l'air, l'échange du rayonnement solaire et la lumière naturelle. Cette variation influence les conditions du confort extérieur, modifie l'équilibre

thermique et éclairage artificiel des bâtiments, amplifie l'effet d'îlot de chaleur urbain et le confinement de la pollution atmosphérique (Adolphe, 2001).

Le confort thermique est une notion très complexe, car il dépend non seulement des paramètres climatiques et physiques, mais aussi des paramètres subjectifs liés à l'utilisateur de l'espace. Le confort thermique se définit par la condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique, il est estimé par une évaluation subjective (*ANSI/ASHRAE Standard 55-2010*, s. d.).

Ainsi, de nombreuses études ont été menées pour comprendre comment la morphologie urbaine peut être conçue pour réduire l'impact des îlots de chaleur urbains et améliorer le confort thermique extérieur dans les climats méditerranéens. Parmi ces études, nous citons :

L'étude de (Shashua-Bar et al., 2012) qui se concentre sur la façon dont la conception urbaine peut réduire la température de l'air et améliorer les conditions thermiques pour les piétons en été à Athènes, en Grèce. Les résultats montrent que les scénarios de conception avec une couverture végétale importante ont le plus grand impact sur la réduction de la température de l'air et l'amélioration des conditions thermiques pour les piétons.

L'étude de (Salata et al., 2016) traite le confort thermique extérieur dans la région méditerranéenne, en se basant sur une enquête de terrain transversale menée à Rome pendant une année entière. Les résultats montrent une plage de confort de PET de 21,1 à 29,2 °C et deux indices ont été déterminés pour prédire les qualités thermiques d'un environnement dans la région méditerranéenne.

Enfin, l'étude de (Chatzidimitriou & Yannas, 2017) propose des résultats empiriques et analytiques montrant les améliorations possibles de la conception urbaine pour le confort thermique extérieur, soulignant l'importance d'intégrer les paramètres climatiques de base dans la conception urbaine. Les études ont été menées à Thessalonique, en Grèce.

Dans le contexte du climat méditerranéen, caractérisé par un été chaud et sec et un hiver doux et humide, l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique extérieur est particulièrement important. Les îlots de chaleur urbains, qui se produisent lorsque les températures à l'intérieur des villes sont significativement plus élevées que celles dans les zones environnantes, peuvent avoir des effets négatifs sur la santé et le bien-être des habitants.

L'Algérie, en raison de sa grande taille et de sa diversité géographique, présente une variété de zones climatiques, allant des climats méditerranéens au nord aux climats aride au sud. Plusieurs études ont également été menées pour étudier l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat dans le contexte algérien. L'étude de (Ali-Toudert et al., 2005) est considérée comme l'une des études intéressantes et qui ont apporté une valeur ajoutée significative dans ce domaine de recherche. Elle explore l'efficacité des formes de conception traditionnelles dans la vieille ville désertique de Beni-Isguen, en Algérie. Les résultats montrent que les endroits couverts et les rues profondes avec des matériaux adaptés atténuent le stress thermique.

La présente recherche traite la question du confort thermique au niveau des espaces publics extérieur et sa relation avec les paramètres climatiques à savoir, la température de l'air, la vitesse du vent, la température moyenne radiante et l'humidité. Nous mettons le point sur l'impact de la morphologie de l'espace extérieur à travers l'étude des places publiques. Notre cas d'étude se situe dans la ville d'Annaba. Cinq places urbaines, située dans des tissus urbains de morphologies différentes ont été sélectionnées.

la ville d'Annaba, une ville côtière située au Nord-Est de l'Algérie, avec un littoral de plus de 16 km face à la mer Méditerranée. Elle couvre une superficie de 1 412 km<sup>2</sup>. L'agglomération d'Annaba, ouverte à l'est par une baie, limitée à l'ouest par le massif montagneux de l'Edough et ouverte au sud aux plaines agricoles. Annaba est considérée comme la quatrième ville la plus importante d'Algérie, après Alger, Oran et Constantine. Selon le Schéma National d'Aménagement du Territoire (SNAT), elle est considérée comme une métropole méditerranéenne d'avenir, en raison de sa forte croissance démographique et de sa dynamique économique importante.

Annaba est une ville portuaire avec une vocation industrielle marquée, qui a connu un développement rapide et une implantation industrielle massive. Ce développement a entraîné une extension considérable de son territoire, passant d'une ville de 15 km<sup>2</sup> en 1970 à une agglomération de plus de 20 km<sup>2</sup> selon le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) de 2008 (Kebir & Zeghiche, 2014). La population de la ville d'Annaba dépasse les 250 000 habitants et elle est le centre de gravité d'une région regroupant près de 610 000 habitants selon l'Office National des Statistiques (ONS) de 2008).

L'agglomération d'Annaba est marquée par trois types de reliefs : une partie montagneuse avec le massif de l'Edough, une partie de plaines vulnérables aux débordements des oueds, et une partie côtière avec un cordon dunaire littoral s'étendant du cap de garde à l'extrême Nord-Est

de la commune d'Annaba jusqu'à l'extrême Sud-Est de la commune d'El Bouni (Zennir et al., 2020).

Le relief est un facteur important qui influence l'urbanisation de la ville d'Annaba, où la majorité de la ville est implantée sur les zones de basse altitude à l'est et au sud-est de son territoire communal, tandis que les zones situées au sud restent non urbanisées en raison de leur caractère marécageux. Les facteurs historiques, notamment la vieille ville et la ville coloniale, ont également influencé l'urbanisation. En revanche, l'urbanisation d'El-Bouni est plus complexe en raison de la diversité du relief, avec une densité urbaine élevée dans les zones appropriées à l'urbanisation et une urbanisation limitée dans les zones surélevées en raison de la présence du massif de l'Edough (Zennir et al., 2020).

La ville a connu plusieurs occupations depuis la période préhistorique jusqu'à nos jours. La richesse historique de la ville a contribué à la diversité de sa forme urbaine, composée de trois tissus majeurs correspondant aux périodes médiévale, coloniale et postcoloniale. Le noyau initial est un tissu traditionnel compact, le tissu colonial est constitué d'une trame en damier avec une architecture de type haussmannien, et les extensions périphériques sont des ensembles d'habitat collectif obéissant à un maillage hiérarchisé (AOUCHAL, 2013; Kebir & Zeghiche, 2014).

La ville se trouve dans la zone « Csa » caractérisée par un climat méditerranéen la classification de Köppen, avec deux saisons distinctes : un été chaud et sec et un hiver doux et humide. La topographie locale et la proximité de la Méditerranée ont également un impact sur le climat de la ville. Les températures maximales sont enregistrées en août avec une moyenne maximale de 31,3°C, tandis que les températures minimales sont enregistrées en janvier avec une moyenne de 7,1°C (Dahech & Saihia, 2019).

Nous avons choisi cinq places publiques pour cette étude, qui sont : la place du Cours de la Révolution, la placette de la vieille ville, la placette Alexis Lambert, la place du Cours d'El-Bouni et la placette d'El-Bouni. Le choix de ces places s'est basé sur leur fréquentation, leur importance architecturale et urbaine, ainsi que leur diversité dans la morphologie urbaine. Ces places sont situées dans des tissus urbains différents, allant du médiéval au contemporain.

Le Cours de la révolution ; cette place se situe au cœur du centre-ville, à côté du port d'Annaba. C'est le lieu privilégié des habitants et des visiteurs de la ville. Il est délimité sur ces deux cotés par des bâtiments de style néoclassique, ornés de galeries avec des colonnades de marbres, avec une hauteur qui varie entre 18 et 12 m. La végétation constitue un élément identitaire du Cours.

La partie sud du cours comprend une seule espèce qui est l'arbre du Ficus tandis que la partie nord comprend plusieurs espèces.

La placette de la vieille ville ; situé au cœur de la vieille ville (la place d'arme), relié avec une rue perpendiculaire au cours de la révolution. Elle a occupé une fonction commerciale à l'époque Ottomane (place du marché). Elle avait une forme organique et irrégulière à cette époque. Ensuite, sa forme et sa fonction ont été transformée pour devenir une placette de forme orthogonale implanté d'arbre avec l'arrivée des français. La placette est délimitée par des bâtiments de l'époque coloniale, construites sur les traces de la ville ottomane après la démolition des bâtiments ottomanes.

La placette Alexis Lambert ; la placette est située à proximité du Cours de la Révolution, dans le même tissu coloniale. Elle est limitée par des immeubles haussmanniens d'une hauteur qui varie de 10 à 16 mètre. La placette possède des espaces non pavés d'une forme géométrique régulières et symétrique. Cet espace est planté d'arbres de Ficus très dense.

Le Cours d'El-Bouni ; cette place est située dans la ZHUN d'El-Bouni, qui est une zone d'habitat, planifiée et conçue (Fathi et al., 2020, p. 3) sous la forme de « ville nouvelle ». Elle est d'une forme linéaire avec des dimensions de (225 × 24) m<sup>2</sup>, orienté (nord-sud). Entouré par des blocs de bâtiments résidentiels isolés et situés en retrait par rapport à la route. La hauteur du bâti varie entre 10 et 16 m. Entouré par des routes bitumées d'une largeur d'environ 07 m. La place du cours est essentiellement pavée et aménagée en trois parties dont une partie conçue à la manière du Cours de la révolution.

La placette d'El-Bouni ; située à quelques mètres du Cours d'El-Bouni, dans un même tissu, moins dense, caractérisé par des espaces ouverts et des blocs de bâtiments résidentiels séparés, d'une hauteur qui varie de 07 à 23 m La place est de forme rectangulaire. Le sol de la placette possède des espaces non pavés. La végétation dans cette placette est presque absente.

### **Problématique :**

Hormis la complexité de la notion du confort thermique extérieur, et sa dépendance de plusieurs facteurs subjectifs et objectifs, on trouve que même les facteurs objectifs sont difficiles à cerner, car ils sont interdépendants les uns aux autres. Nous essayons dans cette recherche de comprendre la relation entre les paramètres morphologiques, le microclimat urbain, et le confort

thermique au niveau de l'espace public extérieur. Afin de rendre cette recherche plus claire et précise, nous posons les questions suivantes :

-comment parvenir à la bonne configuration spatiale de l'espace public, pour avoir les meilleurs effets microclimatiques et assurer le confort thermique extérieur, dans un climat méditerranéen côtier, pendant la période estivale ?

-Quels sont les paramètres morphologiques qui influencent le microclimat et le confort thermique à l'échelle de l'espace public ?

-Comment améliorer le microclimat et optimiser le confort thermique d'un espace public extérieur, en intervenant sur sa morphologie ?

### **Hypothèses :**

Plusieurs recherches étaient menées afin d'étudier l'impact des paramètres morphologiques sur le confort thermique extérieurs, mais leur majorité ont abordé chaque paramètres indépendamment. On trouve donc peu d'études qui traitent l'impact de la morphologie en combinant plusieurs paramètres. Ainsi, pour répondre aux questions posées dans la problématique, nous formulons les hypothèses suivantes :

-les paramètres microclimatiques et les indices de confort thermique dépendent, non seulement de la morphologie de l'espace, mais aussi de la morphologie du tissu urbain dans lequel est situé cet espace.

-L'amélioration du confort thermique à travers la modification d'un seul paramètre morphologique pourrait entraîner des résultats différents, voire opposés, en ce qui concerne son impact sur le microclimat, si cette modification est associée à un changement d'un autre paramètre morphologique. Par exemple, l'impact de l'augmentation de la hauteur du bâti sur le microclimat dépendrait de la présence et la densité de la végétation.

### **Objectifs de la recherche :**

Le confort thermique est très complexe et dépend de plusieurs facteurs directs et indirects. Dans ce travail, nous nous intéressons essentiellement aux facteurs liés à la morphologie urbaine. Nous avons choisi comme cas d'étude la place publique, de par son importance urbaine et sociale.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier l'impact de la morphologie de l'espace public sur le microclimat urbain et le confort thermique extérieur dans un climat méditerranéen côtier pendant la période estivale, afin de fournir aux décideurs et aux architectes et urbanistes des recommandations utiles favorisant la conception d'un espace urbain thermiquement confortable. En effet les objectifs ciblés dans cette étude sont les suivant :

1. comprendre la manière dont les paramètres morphologiques, à savoir: la hauteur du bâti, la densité surfacique du bâti, l'orientation, et la végétation, modifient le microclimat au niveau de l'espace public extérieur, et mesurer leur impact sur les indicateurs microclimatiques: température de l'air, humidité relative, vitesse de l'air, température moyenne radiante, et les indices de confort thermique : PET (Physiologically Equivalent Temperature), SET (Standard Effective Temperature), et UTCI (Universal Thermal Climate Index).
2. comparer entre les indicateurs microclimatiques et les indices de confort thermique des espaces extérieurs ayant des morphologies différentes et situés dans des tissus urbains variés, pour découvrir l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique.
3. vérifier la précision de la simulation numérique dans les calculs microclimatique, à travers la confrontation aux données mesurées sur terrain.
4. mesurer à travers la simulation numérique, l'impact de chaque paramètre morphologique étudié, sur les indicateurs climatiques et les indices de confort thermique.

### **L'analyse conceptuelle :**

Elle vise à décortiquer les concepts de recherche et extraire les paramètres et les indicateurs nécessaires pour la vérification de l'hypothèse. La Figure 1 présente une synthèse de l'ensemble des concepts abordés dans cette recherche.

### **Morphologie urbaine :**

*« Le terme "morphologie" trouve son origine dans les deux mots "morph" et "logy", qui signifient la logique de la reconnaissance des formes. Ces études ont été menées dans de*

*nombreux domaines pour étudier les caractéristiques physiques, la structure, les proportions et la déformation des objets et de leurs composants » (Fathi et al., 2020, p. 3).*

La morphologie urbaine est considérée comme un domaine scientifique très jeune par rapport aux autres disciplines (Batty, 2008), elle tire ses origines de la géographie (Whitehand, 2007). Le champ de la morphologie urbaine a été élargi au-delà de ses origines géographiques, en incluant les domaines de l'architecture et de l'urbanisme, notamment pendant le séminaire international sur la forme urbaine (ISUF)

Plusieurs paramètres morphologiques ont été étudiés dans les recherches de l'architecture et l'urbanisme bioclimatique, pour évaluer l'impact de la morphologie de l'espace urbain sur le microclimat et le confort thermique extérieurs. Dans cette étude, Nous avons choisi les paramètres suivant : Hauteur du bât, densité surfacique du bâti, rapport H/L, facteur de vue de ciel (SVF), orientation, et végétation.

Microclimat urbain :

La ville se distingue par leur forte densité de structures créées par l'homme contrairement aux zones rurales, ce qui entraîne la création de microclimat. Ce dernier se définit par une zone locale où le climat est différent de celui de l'environnement qui l'entoure (Ragheb et al., 2016).

Les facteurs qui modifient l'équilibre thermique dans la ville sont nombreux, tel que l'augmentation de la chaleur causée par les structures urbaines, l'absorption du rayonnement solaire par les matériaux à faible albédo, le manque de végétation, et la chaleur anthropogénique...etc. (Palme & Salvati, 2021).

Les paramètres les plus utilisés pour mesurer le microclimat et notamment l'environnement thermique les facteurs les plus utilisés sont : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température moyenne radiante.

Confort thermique extérieur :

Le confort thermique est une notion d'une grande complexité, et son évaluation demeure un domaine de recherche fondamental. Puisqu'il dépend de plusieurs facteurs subjectifs et objectifs.

La définition la plus utilisée du confort thermique est donnée par (ASHRAE Standard 55-2010, s. d.) " ... condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique "

L'ASHRAE défini le confort thermique extérieur comme "l'état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique extérieur (ASHRAE, 2017a)"

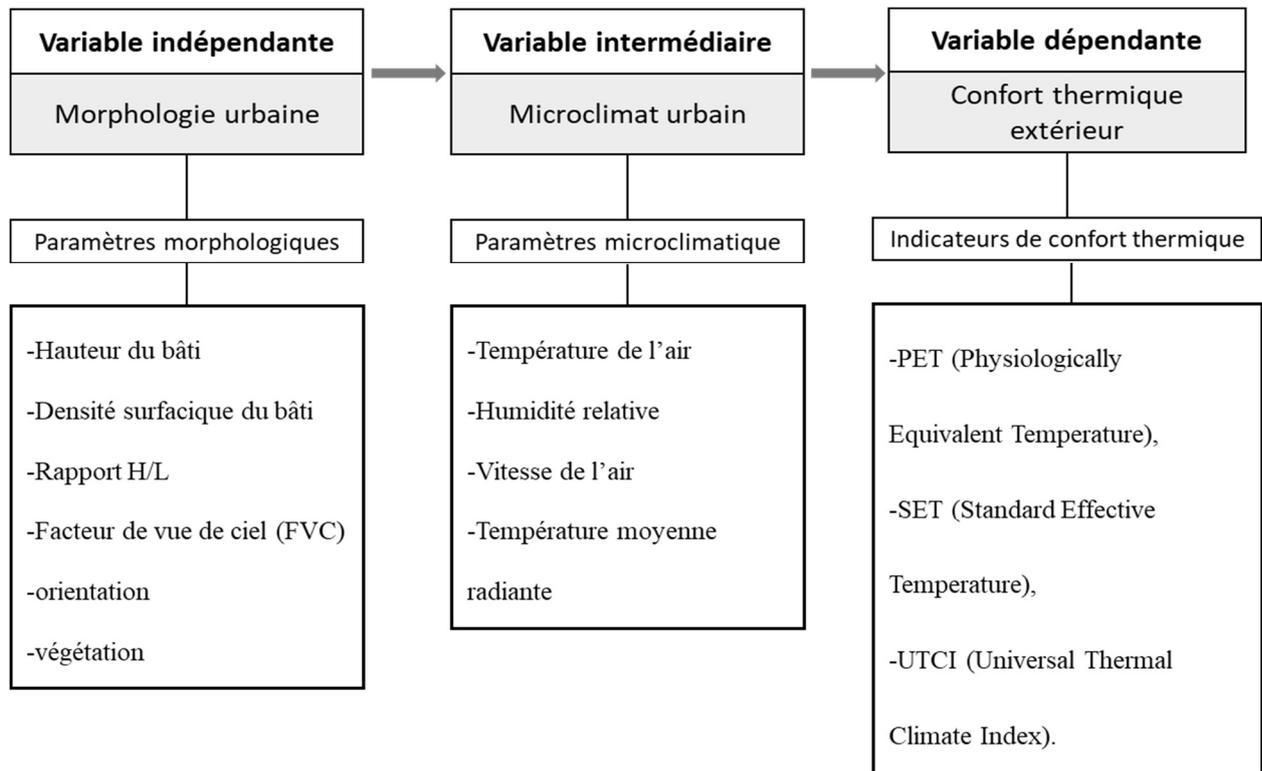


Figure I- 1: une synthèse de l'ensemble des concepts abordés dans cette recherche

### Méthodologie et outils de recherche :

Afin d'atteindre l'objectif de cette recherche, qui représentent l'évaluation de l'impact de des paramètres morphologiques de l'espace public extérieur sur le microclimat et le confort thermique, nous avons adopté une méthodologie basé sur une **approche quantitative** composée de deux méthodes, la première est **les mesures sur terrain** et la deuxième est **la simulation numérique**.

**Nous effectuons dans un premier temps une** analyse du contexte climatique du cas d'étude qui est la ville d'Annaba, pour déterminer la période de surchauffe. Ensuite des campagnes de mesures in situ était fixées pour la prise des paramètres climatiques affectant le confort thermique extérieur. L'outil utilisé dans cette étude est l'appareil 'Testo 480'.

**La méthode de simulation numérique, en utilisant le logiciel Envi-met V5.0.2.** La première phase de la simulation consiste à valider le modèle numérique (Envi-met) et vérifier son exactitude par la confrontation des données mesurées sur terrain avec les résultats de la simulation numérique afin d'établir des lignes de régression et calculer le coefficient de de corrélation linière.

La simulation numérique, nous permet aussi de comparer entre les espaces étudiés en fixant les mêmes Inputs concernant les conditions météorologiques et les mêmes matériaux du bâti et des revêtements. La deuxième étape représente la modélisation et la simulation des scénarios d'amélioration du confort pour évaluer l'impact des paramètres morphologiques sur le microclimat et le confort thermique extérieur.

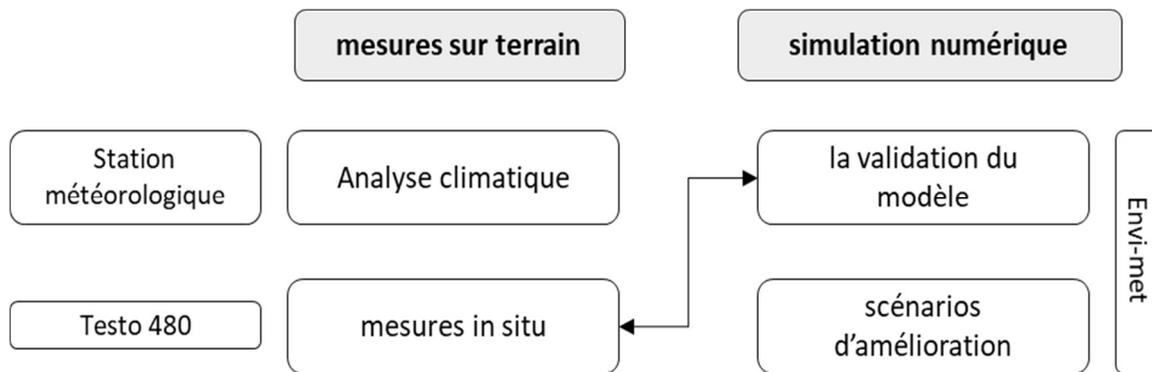


Figure I- 2: méthodologie et outils de recherche

### Structure de la thèse :

Cette thèse est composée de cinq chapitres répartis sur deux parties ; une partie théorique et une partie pratique. La figure 3 présente un schéma synthétique de la structure globale de cette thèse.

#### Partie I : cadre théorique

Cette partie commence par une introduction générale, la problématique, les hypothèses, et les objectifs de recherche. En outre elle englobe l'analyse des concepts de recherche et l'état de l'art des travaux menés sur le sujet d'étude. Nous avons effectué une recherche bibliographique

dans les livres, thèses et articles scientifique en utilisant les bases de données scientifique les plus utilisée tel que ; Scopus, Web of science, Springer et google scholar. Le cadre théorique contient principalement deux chapitres.

#### Chapitre I : Analyse des concepts de recherche

Dans ce chapitre nous essayons de définir les concepts de recherche qui sont : la morphologie urbaine, le microclimat urbain et le confort thermique. Il ne s'agit pas d'une simple définition mais une analyse de la relation qui se trouve entre ces trois notions.

#### Chapitre II : Etat de l'art et positionnement épistémologique.

Ce chapitre présente une synthèse de recherches menées sur la question du microclimat et le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs et leurs relations avec la morphologie urbaine. Nous exposons les approches adoptées et les résultats obtenus, dans l'objectif de définir la méthode appropriée à ce travail.

#### Partie II : Etude de cas

Cette partie est attribuée à l'analyse de cas d'étude choisi qui est la ville d'Annaba, et elle développe la méthodologie et les outils de recherche. En plus elle constitue l'analyse et l'interprétation des résultats de l'investigation et de la simulation numérique. Elle se compose de trois chapitres :

#### Chapitre III : présentation du cas d'étude et investigation

Ce chapitre est consacré à la présentation du cas d'étude et à l'investigation. Il contient l'analyse climatique de la ville d'Annaba, la méthodologie de l'investigation, et il explique le choix et la présentation des espaces publics étudiés. En outre, nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'investigation et les mesures in situ des différents paramètres climatiques, et nous comparons entre les résultats de chaque espace étudié.

#### Chapitre IV : simulation numérique

Ce chapitre aborde la simulation numérique. Parmi ses objectifs, la vérification de l'exactitude du Model Envi-met.05 par rapport aux données de terrain présentées dans le chapitre précédent, ensuite la comparaison entre les espaces publics choisis, à travers la simulation numérique.

Donc, il contient une Présentation du logiciel Envi-met, une explication du Processus et de la méthode de simulation.

#### Chapitre V : Scénarios d'amélioration

Ce chapitre s'appuie sur la proposition de plusieurs scénarios d'amélioration à travers la modification des paramètres morphologiques tels que l'orientation, la végétation, la hauteur et la densité du bâti. L'objectif est de mesurer l'impact de chaque paramètre sur les indicateurs microclimatiques et les indices de confort thermique. Les résultats sont représentés sous forme de cartes climatiques et des graphes associé à des discussions et des explications.

La thèse se termine par une conclusion générale synthétisant les résultats, les limites et les perspectives future de cette recherche, ainsi que des recommandations nécessaire pour les futures conceptions et aménagement.

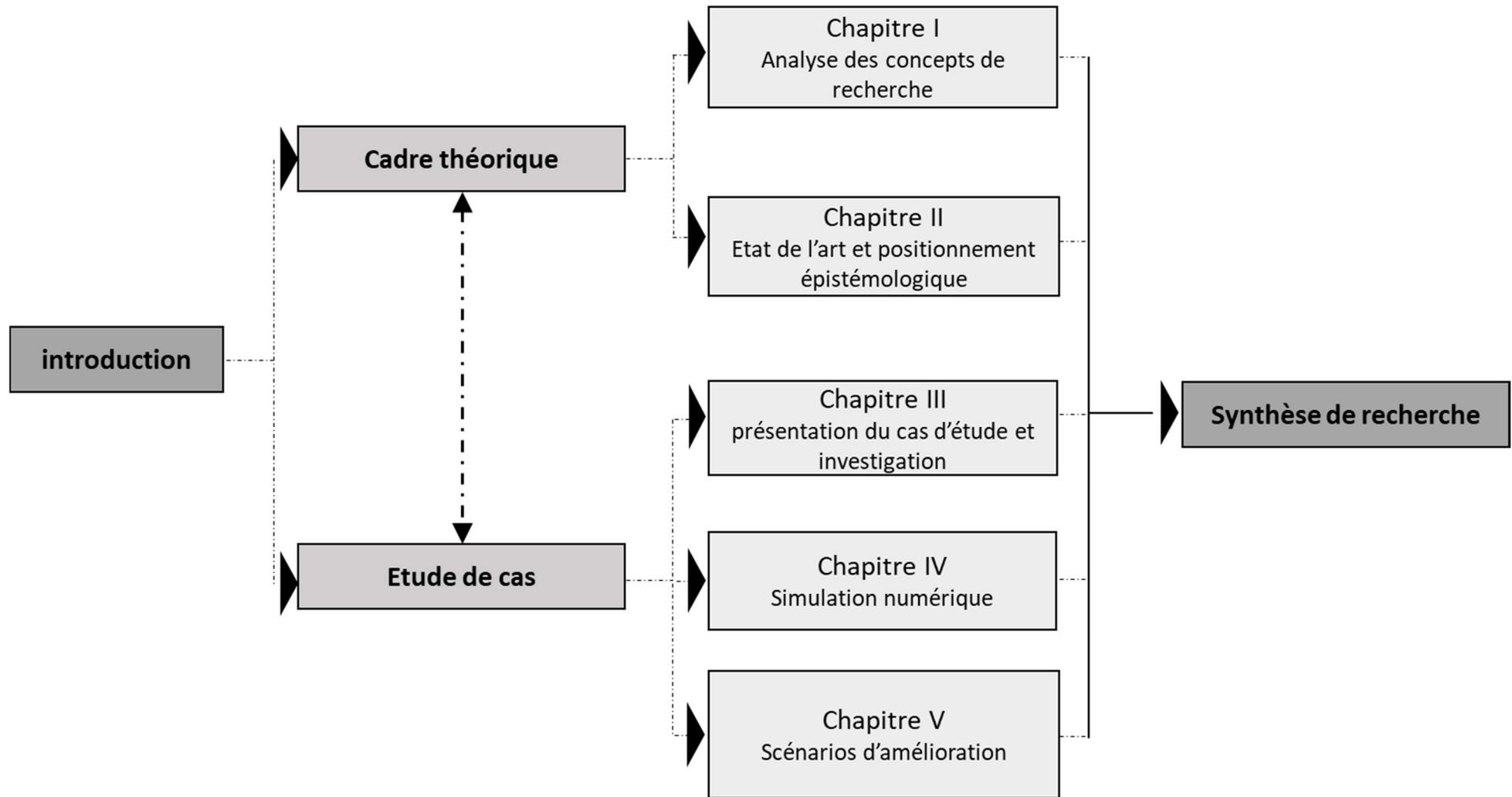


Figure I- 3: schéma synthétique de la structure globale de cette thèse

# **Partie théorique**

# **Chapitre I : Analyse des concepts de la recherche**

## Introduction

Morphologie urbaine, microclimat urbain et confort thermique, trois notions largement évoquées dans la littérature scientifique particulièrement dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme. La morphologie urbaine est une notion complexe. Albert Levy ne limite pas la morphologie urbaine à la forme urbaine, il lie l'étude de la morphologie urbaine à l'histoire urbaine. De ce fait pour étudier la morphologie d'une ville il faut étudier ses mutations à travers l'histoire (Levy, 2005). Elle est considérée comme un facteur principal qui participe à la modification du climat urbain et qui affecte le confort thermique des habitants.

Le microclimat urbain concerne les espaces à une petite échelle comme un jardin, une rue, une place ou même un quartier...etc. Le microclimat au niveau de l'espace urbain est modifié par sa morphologie, ainsi que par la densité et le volume des constructions qui l'entourent, la présence de la végétation et l'eau,... etc. Chaque site est donc caractérisé par son microclimat. Plusieurs recherches ont montré la relation étroite qui se trouve entre la morphologie urbaine et le microclimat dans le milieu urbain. Par exemple Adolphe affirme que la variation importante de la morphologie urbaine a un effet direct sur le climat : la vitesse du vent, la température de l'air, l'échange du rayonnement solaire et la lumière naturelle. Cette variation influence les conditions du confort extérieur, modifie l'équilibre thermique dans le milieu urbain, amplifie l'effet d'îlot de chaleur urbain et le confinement de la pollution atmosphérique (Adolphe, 2001).

Dans ce chapitre, nous essayons de définir les concepts de recherche. Il ne s'agit pas uniquement de fournir des définitions basiques, mais aussi d'analyser les relations qui existent entre ces concepts. Dans un premier temps, nous évoquons le concept de la morphologie urbaine, son émergence ses différentes approches, et sa relation avec le microclimat urbain, tout en mettant l'accent sur la morphologie de l'espace public. Ensuite nous définissons le microclimat dans le contexte urbain et son rapport avec le phénomène d'îlot de chaleur urbain. On finit par le confort thermique, et les facteurs qui influencent le confort thermique extérieur.

## **I.1 Morphologie de l'espace public**

Il y a peu d'études qui abordent l'espace public extérieur sous l'angle morphologique. Cependant, lors de plusieurs conférences de l'ISUF<sup>2</sup> (Séminaire International sur la Forme Urbaine), l'espace ouvert et les sujets connexes ont été choisis comme thèmes spécifiques. Les approches morphologiques restent encore Insuffisamment représentées et très rarement mentionnées dans les études sur les espaces publics extérieurs. Dans cette section, Nous évoquons le concept de la morphologie de l'espace public. La morphologie urbaine est tout d'abord abordée en tant que domaine scientifique et dans le contexte de la théorie urbaine et sa relation avec le microclimat urbain. Ensuite, le concept de l'espace public est examiné, sa définition est discutée et ses différents types sont décrits. Enfin, les paramètres morphologiques liés au tissu urbain et à l'espace public sont discutés.

### **I.1.1 Emergence de la Morphologie urbaine**

Selon (Whitehand, 2007) la morphologie urbaine, tire ses origines de la géographie, elle a été utilisée pour différencier, expliquer et décrire les paysages urbains. Cette discipline a eu une influence significative sur le développement de la géographie. Otto Schlüter, un géographe allemand reconnu comme étant le fondateur de la morphologie urbaine, percevait la ville comme faisant partie intégrante du paysage dans son ensemble (Whitehand, 2007). Les images visuelles de la morphologie urbaine, qu'il s'agisse de représentations graphiques ou de cartes, ont eu une influence significative dans l'analyse des formes urbaines (Sima & Zhang, 2009; Sun, 2013). Le séminaire international sur la forme urbaine (ISUF) élargit le champ de la morphologie urbaine au-delà de ses origines géographiques, en incluant notamment les domaines de l'architecture et de l'urbanisme. « *Trois écoles de morphologie urbaine, en Angleterre, en Italie et en France, se réunissent, à la suite des travaux précurseurs de deux morphologues, M.R.G. Conzen et Saverio Muratori. Le regroupement de ces écoles constitue la base d'un domaine interdisciplinaire et l'occasion d'établir des fondements théoriques*

---

<sup>2</sup> L'ISUF est l'organisation internationale de la forme urbaine pour les chercheurs et les praticiens. Inaugurée en 1994, elle réunit des morphologues urbains du monde entier. Elle cherche à faire progresser la recherche et la pratique dans les domaines liés à l'environnement bâti. Les membres sont issus de plusieurs disciplines, dont l'architecture, la géographie, l'histoire, la sociologie et l'urbanisme. L'ISUF organise des conférences, publie le journal *Urban Morphology* et fournit un cadre international pour la communication entre les membres.

*communs pour le nombre croissant de morphologies urbaines dans de nombreuses parties du monde* » (Moudon, 2022, p. 3).

Au cours des années, plusieurs essais ont été entrepris pour consolider les différentes approches de la morphologie urbaine. Dans le premier numéro de la revue "Morphologie Urbaine", Anne Vernez Moudon a proposé l'une des premières tentatives d'unification des approches de la morphologie urbaine dans l'histoire de l'ISUF (Séminaire International sur la Forme Urbaine). Elle a déterminé trois principes essentiels qui constituent la base de l'analyse morphologique (Moudon, 2022; Scheer, 2015) :

-définition de la morphologie urbaine par trois éléments physiques : les bâtiments (plein) et leurs espaces ouverts (vide), les parcelles et les rues

-La forme urbaine peut être appréhendée à différents niveaux de résolution. On en reconnaît généralement quatre, correspondant au bâtiment/au lot, à la rue/au bloc, à la ville et à la région.

-une définition historique de la morphologie urbaine, justifié par la transformation et un le remplacement continu de ses éléments (Moudon, 2022; Scheer, 2015).

La morphologie urbaine est considérée comme un domaine scientifique très jeune par rapport aux autres disciplines, notamment la sociologie urbaine, l'économie urbaine, à la géographie urbaine ...etc. (Batty, 2008) dans son article intitulé "The size, scale and shape of cities" (La taille, l'échelle et la forme des villes), affirme que la compréhension de la croissance urbaine des villes demande initialement une analyse morphologique afin d'élaborer des plans d'urbanisme plus judicieux. Ce raisonnement a été soutenu aussi par (Hillier, 2007), en proposant une approche théorique de la morphologie urbaine basée sur l'architecture et la lecture analytique des configurations spatiales (Stähle, 2008).

### **I.1.2 Définition de la morphologie urbaine**

« Le terme "morphologie" trouve son origine dans les deux mots "morph" et "logy", qui signifient la logique de la reconnaissance des formes. Ces études ont été menées dans de nombreux domaines pour étudier les caractéristiques physiques, la structure, les proportions et la déformation des objets et de leurs composants » (Fathi et al., 2020, p. 3). La naissance de ce terme était par un poète allemand. Ensuite employé dans divers domaines scientifiques, notamment en biologie, pour étudier l'aspect, formel et structurel externe des êtres vivants, et

comparer entre leurs éléments différents (Fathi et al., 2020). En 1991, Larkham et Jones ainsi que Malfroy en 1986, ont proposé un glossaire multilingue afin de clarifier les différences de méthodes et de théories provenant des nombreux experts issus de différents milieux disciplinaires, linguistiques et culturels qui travaillent sur ce sujet. Toutefois, ces divergences peuvent également être expliquées par des différences philosophiques entre les chercheurs (Gauthier & Gilliland, 2005; Larkham Peter J & Jones, 1991).

Selon les approches morphologiques existantes, différentes définitions de la morphologie urbaine ont été proposées. Pierre Gauthier et Jason Gilliland ont défini la morphologie urbaine en ces termes simples : "c'est l'étude des formes urbaines" (Gauthier & Gilliland, 2005, p. 41). La morphologie urbaine étudie les processus de création des idées et des tendances qui influencent la forme des villes. Elle se concentre sur les impacts tangibles des forces sociales, économiques et environnementales. Les bâtiments, les jardins, les rues, les parcs et les statues sont des éléments essentiels des analyses morphologiques car ils reflètent l'empreinte des tendances et des activités humaines sur la ville. La ville est considérée comme un processus et une interaction entre les hommes et leur environnement, et son aspect physique est la base la plus appropriée pour délimiter l'image globale de son caractère. Les tendances, activités et réactions humaines sont considérées comme moins tangibles et moins durables que l'aspect physique de la ville (Castro et al., 2019; Fathi et al., 2020; J. Xu, 2019).

Autre définition de la morphologie urbaine par L'ethnographe Lévi-Strauss (1954, pp. 137-8) qui a décrit la ville comme "la plus complexe des inventions humaines ... au confluent de la nature et de l'artefact". Les morphologues urbains analysent l'évolution des villes en identifiant et en disséquant leurs différentes composantes. Ils se concentrent sur les résultats tangibles des forces sociales et économiques qui façonnent nos villes, en étudiant comment les idées et les intentions prennent forme sur le terrain. Les bâtiments, les jardins, les rues, les parcs et les monuments sont des éléments clés de leur analyse (Moudon, 2022).

### **I.1.3 Les approches de la forme urbaine**

L'objectif capital de la morphologie urbaine est de rendre la compréhension de l'évolution de la forme urbaine plus accessible, afin de pouvoir lire la ville. La définition de la forme urbaine est conçue à partir d'une hypothèse, d'une représentation et d'un point de vue (Athamena, 2012). (Levy, 2005) affirme que le concept de forme urbaine est complexe et peut être compris de diverses manières en fonction des perspectives de chaque urbaniste et de la définition retenue.

Pour identifier les différentes approches de la forme urbaine, Lévy (2005) a combiné ces perspectives et a identifié cinq registres distincts qui sont présentés ci-dessous. (Athamena, 2012; Levy, 2005) :

- L'approche de la forme urbaine comme forme des paysages urbains se concentre sur l'aspect visuel et esthétique de l'espace urbain, en examinant des éléments tels que la texture, la couleur, les matériaux, les styles, les volumes et les gabarits des bâtiments et des espaces publics. Cette approche a été étudiée par plusieurs auteurs, dont (BACON, 1965; CULLEN, 1961; Sitte et al., 1996), et a été appliquée à des villes spécifiques, comme Versailles, par des auteurs tels que Panerai. Le paysage urbain est étudié pour comprendre ses significations esthétiques, stylistiques, culturelles et historiques, ainsi que les perceptions individuelles et sociales qui y sont associées (Athamena, 2012; Levy, 2005)
- L'approche de la forme urbaine comme forme sociale se concentre sur l'occupation de l'espace urbain par différents groupes sociaux, démographiques, ethniques ou religieux. Cette approche a été étudiée par plusieurs auteurs, et complétée par une analyse fonctionnelle de l'utilisation des terres, proposée par des géographes morphologues tels que Conzen (Athamena, 2012; Levy, 2005).
- L'approche de la forme urbaine comme forme des tissus urbains. Elle se concentre sur les éléments qui composent l'espace urbain, tels que le parcellaire, les îlots, les routes, les espaces libres et le bâti. Cette approche vise à examiner la relation entre la typologie des bâtiments et la forme urbaine (Aymonino, 1977), ce qui a été perdu avec la ville moderne. Cette analyse est également liée à l'historique de la ville, la culture urbanistique, et aux pratiques urbaines (Athamena, 2012; Levy, 2005).
- L'approche de la forme urbaine comme forme des tracés. La forme géométrique de la ville (organique, en damier ou radioconcentrique) constitue la base de cette approche. Pour comprendre la forme et la signification des tracés urbains, plusieurs auteurs ont proposé des approches et des catégorisations, telles que la composition urbaine explorée par Pinon et Lévy, ou encore la distinction entre composition régulière et composition pittoresque introduite par Unwin (Athamena, 2012; Levy, 2005).
- L'approche de la forme urbaine en tant que forme bioclimatique. Elle implique la considération de l'aspect environnemental de la forme urbaine, y compris le microclimat urbain, en prenant en compte le paramètre géographique, les types de tissus urbains, l'orientation, le site, etc. Cette approche résulte des recherches en climatologie urbaine, en écologie urbaine et en "ambiances urbaines", et a suscité un débat important sur les formes

urbaines futures, en relation avec les défis du développement durable et de la consommation d'énergie. La prise en compte de ces facteurs peut entraîner une révision radicale de l'architecture et de l'urbanisme, tout en ayant une incidence sur le confort et le bien-être perçus dans un espace ou une ambiance donnée, qui sont souvent influencés par les codes culturels (Athamena, 2012; Levy, 2005).

#### **I.1.4 Morphologie urbaine et microclimat :**

La morphologie urbaine est caractérisée principalement par la forme des bâtiments, les surfaces les espaces artificiels et verts. Elle joue un rôle clé dans la régulation du microclimat urbain, en influençant sur le rayonnement solaire et le mouvement de l'air. Pour évaluer son impact sur le microclimat, on peut étudier l'ombrage de la ville, la ventilation urbaine et la réflectivité thermique urbaine. Les paramètres de planification et de conception urbaine sont utilisés pour étudier et évaluer cet impact (Erell et al., 2012; P. Lin et al., 2017).

Le paramètre le plus répandu pour analyser l'occupation des sols est la densité du bâti. Mais l'utilisation exclusive de la densité urbaine pour évaluer l'environnement physique d'une zone urbaine n'est pas suffisante, car on peut avoir des différentes configurations de bâtiments avec la même valeur de densité. Par conséquent, pour évaluer l'environnement physique d'une zone urbaine de manière précise, il est nécessaire de combiner la densité urbaine avec d'autres paramètres qui caractérisent la géométrie des bâtiments dans les dimensions horizontales et verticales (P. Lin et al., 2017).(Giridharan et al., 2007)

La forme des bâtiments a un impact sur la chaleur dans les zones urbaines. Le ratio hauteur/surface au sol peut influencer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) [48]. Une augmentation de 10 % de ce ratio peut réduire l'ICU nocturne de 0,3 % (Giridharan et al., 2007). La modification dans la morphologie du bâti peut améliorer l'environnement et le microclimat dans la ville. Des indicateurs morphologiques tels que la densité, la rugosité, la porosité, la sinuosité, l'occlusivité, la compacité, la contiguïté, l'admission solaire et la minéralisation ont également été identifiés comme importants pour le climat urbain (Adolphe, 2001). Plusieurs approches raffinées peuvent définir la géométrie urbaine et pourraient aider à identifier une corrélation claire et directe entre les indicateurs géométriques urbains et le climat urbain(P. Lin et al., 2017).

### **I.1.5 L'espace public**

On peut définir l'espace public comme un lieu ouvert et accessible au public, qui permet la réalisation d'activités sociales essentielles à la création d'une communauté (Carr, 1992). *« L'espace ouvert est souvent abordé sous la rubrique de l'espace public parce que de nombreux espaces ouverts modernes sont librement accessibles, mais l'espace public comprend également certains espaces couverts, tels que les institutions civiques ou les édifices religieux »*. (Stanley et al. 2012, p. 1091). Nous nous intéressons particulièrement, dans ce travail, aux espaces publics ouverts. Nous présentons tout d'abord une définition de l'espace public ouvert, puis nous exposons les différents types d'espaces publics ouverts, en détaillant enfin la place publique, la rue et le jardin.

#### **I.1.5.1 Définition de l'espace public**

Le terme "espace public" est complexe et diversement compris selon les disciplines qui l'abordent. (Colquhoun, 1991) affirme que l'espace urbain fait l'objet de deux approches différentes ; la première d'un point de vue architectural, la seconde d'un point de vue de géographe ou de sociologue. Les différents termes utilisés tels que "public", "ouvert", "espace" et "urbain" ont chacun leur propre importance, en fonction des priorités et des angles de chaque discipline. Malgré les efforts pour trouver une définition commune, les significations et les définitions varient selon les disciplines. Par exemple, les sociologues abordent l'espace public ouvert urbain sous l'angle social. Les psychologues se concentrent sur les personnes, tandis que les architectes s'intéressent à la forme physique de l'espace (Golicnik, 2005).

En effet, l'espace public est une notion complexe et peut avoir différentes définitions. (Krier, 2006) considère les espaces publics comme tout espace situant entre les bâtiments dans les villes. Cette définition a été complétée par (Hertzberger & Rike, 2009) en indiquant que les espaces publics sont des espaces urbains accessibles en tout temps et dont l'entretien est partagé collectivement. (Ornstein, 2006) définit l'espace public comme des zones extérieures non construites accessibles à tous et à usage collectif (Cortese et al., 2013).

Le concept d'espace public est une notion à la fois simple et complexe qui dépend de sa définition physique dans l'environnement urbain et de sa signification sociale et symbolique. D'un point de vue physique, les espaces publics sont caractérisés par différents éléments morphologiques tels que l'orientation, la hauteur et la largeur des bâtiments environnants, la

densité du bâti, la présence de végétation, de points d'eau, de mobilier urbain, d'art urbain et d'éclairage. En outre, la composition spatiale de ces espaces comprend également des paramètres tels que l'ordre, l'équilibre, l'échelle, la proportion, le rythme, le contraste, l'harmonie et la symétrie (Alves, 2003; Cortesão et al., 2013).

### I.1.5.2 Les types de l'espace public

(Stanley et al. 2012, p. 1093) Abordent la typologie des espaces ouverts dans les études urbaines modernes. Ils ont donné l'exemple de (Al-Hagla, 2008), qui distingue les espaces ouverts selon leur forme physique en "espaces verts" (terres végétalisées) et "espaces gris" (surfaces dures pavées ou en terre battue). Cette distinction est faite en fonction des tendances actuelles en urbanisme, en fonction des différentes disciplines, telles que la sociologie et les sciences politiques. Enfin, la typologie proposée par (Carmona, 2010a, 2010b) tente de réconcilier ces différentes perspectives en proposant une classification unique axée sur les questions de gestion et de privatisation. La typologie proposée dans le travail de (Stanley et al., 2012) délimite sept grands types d'espaces ouverts (Tableau I- 1). En outre, Les types reconnus d'espaces publics urbains comprennent principalement les rues, les places, les Parcs et les jardins.

Tableau I- 1: Une typologie transdisciplinaire des espaces ouverts urbains couvrant l'histoire ancienne et moderne. Source : (Stanley et al., 2012)

		Scale		
		City	Intermediate	Residence
Form	<b>Transport Facilities</b>	Harbors, Airport and Train Station Parking	Transit Stations, City Gate Areas	Driveways, Parking Areas
	<b>Streets</b>	Central Boulevards	Street Space	Pedestrian Alleys, Paths
	<b>Plazas</b>	Large Formal Plazas	Smaller Neighborhood Plazas	Interior Courtyards
	<b>Recreational Space</b>	Stadiums, Greenbelts, Beaches	Sports Facilities, Playgrounds	Houseyard Playspace
	<b>Incidental Space</b>	Natural Features and Semi-Wild Areas	Empty Lots, Transit Borders	Marginalized Space Between Buildings
	<b>Parks and Gardens</b>	Major Formal Park and Garden Space	Institutional Gardens, Small Parks, Cemeteries	Household Gardens
	<b>Food Production</b>	Orchards, Agricultural Fields	Grazing Commons, Community Gardens	Kitchen Gardens, Small Horticulture

	Grey space
	Green space
	Grey/Green space

### I.1.5.3 La place publique

Les places sont des espaces ouverts ouverts au public aménagés et bordés par des bâtiments, son sol est généralement revêtu en béton, et conçus pour accueillir diverses activités civiques. Les grandes places ont une longue histoire d'être planifiées par les autorités gouvernementales ou religieuses dans différents contextes urbains. Elles sont caractérisées par leur position centrale, leur grande taille et leur lien avec des édifices civiques ou religieux, et jouent un rôle politique et symbolique crucial. Les places ont une multitude d'utilisations, telles que les événements culturels, les rassemblements militaires, le commerce local et les interactions sociales (Stanley et al., 2012). Les places publiques sont considérées comme les espaces publics les plus importants dans la ville. Elles participent à la création de l'image identitaire des villes et la culture des communautés (Murat, 2013). Les places publiques peuvent prendre différentes formes en fonction de leur environnement et de leur fonctionnalité. Les architectes tels que Camillo Sitte et Léon Krier ont proposé des critères esthétiques idéaux pour la création de places urbaines, mais selon des approches différentes. Tandis que Zucker a proposé une typologie de cinq formes de places urbaines.(Hsu, 1993), quant à lui, a critiqué l'approche de Krier pour son manque de considération pour le contexte social et historique des places publiques (Murat, 2013).

Zucker propose cinq types de places urbaines, cette classification est faite selon la forme de la place (Carmona, 2010) ; Place « fermée » de forme géométrique régulière, qui n'est interrompue que par les rues qui y mènent. La place « dominée », orientée vers un bâtiment ou un groupe de bâtiments. La place « nucléaire », possède un élément central qui maintient la cohésion de l'ensemble. Les places « groupées » constituées d'un ensemble de places individuelles reliées organiquement et/ou esthétiquement. Finalement, la place « amorphe » chaotique et irrégulière par rapport aux autres types (Murat, 2013, p. 522). Sitte souligne également que "le sens de l'enfermement" constitue l'élément principal de la conception de la place. De plus, la clôture et le regroupement sont parmi les principes de Gestalt. La fermeture d'une place se fait en disposant des constructions autour d'une zone centrale (Carmona, 2010c; Murat, 2013)

L'enfermement des places publiques a été bien discuté dans l'œuvre de Rob Krier. Il a développé une typologie des places urbaines en se basant sur la géométrie élémentaire [24]. Krier a introduit les concepts géométriques tels que l'angle, de segment, d'addition, comme facteurs de modulation de l'espace (Figure I- 4). L'association de ces paramètres de modulation avec les formes basiques de l'espace urbain peut aboutir à des formes régulières ou irrégulières

d'espace urbain selon Krier (Zeka, 2011). La figure I- 5 montre les typologies de places urbaines élaborées par Krier. Cependant, cette approche a été critiquée par Hsu dans le sens où qu'il ne prend pas en compte le contexte social et historique des places publiques (Murat, 2013).

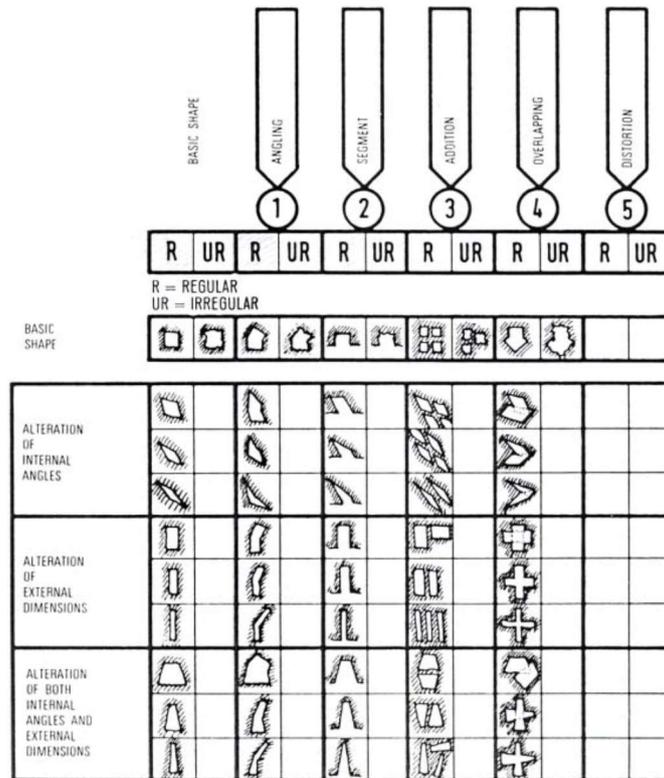


Figure I- 4: Facteurs modulateurs de l'espace urbain. Source : (Murat, 2013)

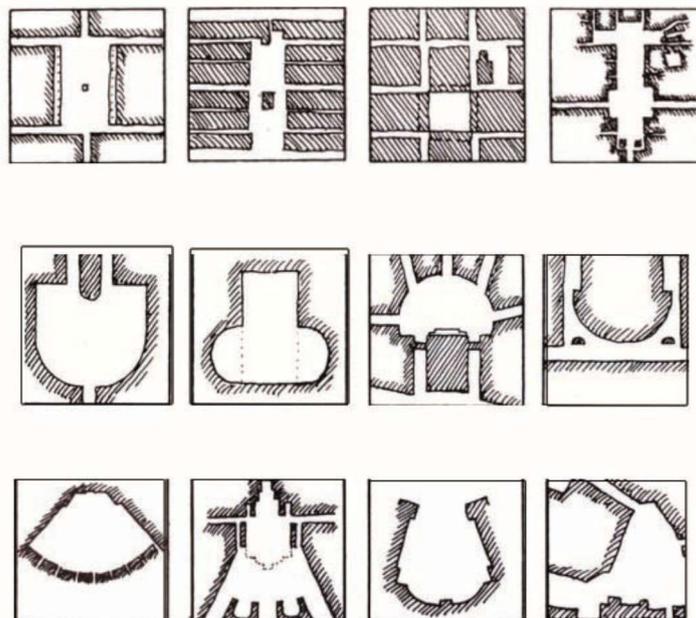


Figure I- 5: Quelques typologies des espaces urbains de Krier. source : (Murat, 2013)

Le choix de l'emplacement et de la taille d'une place publique est essentiel pour sa conception urbaine réussie. Les places sont généralement situées à des intersections importantes pour les piétons et les transports, symbolisant les rencontres humaines et encourageant la contemplation urbaine. Pour atteindre cet objectif, elles doivent être facilement accessibles et situées dans des endroits centraux, à proximité des édifices gouvernementaux et religieux. La taille est également cruciale pour le succès de la place publique. Lynch suggère que la taille idéale pour une place urbaine réussie est de 12 à 24 mètres de chaque côté, tandis qu'Alexander recommande un maximum de 22 mètres pour les petites places. Gehl préconise quant à lui une dimension de 30 à 35 mètres pour une taille optimale, permettant aux gens de se reconnaître à travers l'espace (Zeka, 2011). Il est important de prendre en compte la perception visuelle, en considérant l'échelle et la densité des bâtiments environnants. Les bords de la place jouent également un rôle crucial dans la définition de l'espace. Si les bords sont mal définis, l'espace ne sera jamais vivant (Murat, 2013).

#### **I.1.5.4 La rue**

Les rues se différencient des routes par leur nature fermée, leur vitesse réduite et leur fonctionnalité polyvalente, basée sur des critères tels que le flux de circulation, l'utilisation du sol et les principaux objets de service. Les rues sont principalement conçues pour les activités humaines et la marche, et la vitesse maximale autorisée pour les véhicules à moteur est généralement de 30 km/h. Pour être considérée comme une rue, une voie doit être bordée de bâtiments de chaque côté, avoir un rapport hauteur/largeur supérieur à 0,5 et ne pas comporter plus de quatre voies pour les véhicules à moteur (N. Xu et al., 2019). Les villes babyloniennes ont connues trois types de rues : (1) "rue large", (2) "rue étroite", et (3) "impasse" (Baker, 2009, p. 95). Les rues jouent un rôle central dans de nombreux aspects de la vie sociale et économique, tels que les activités de loisirs, et le commerce. Elles servent également de voies de circulation pour les piétons et les véhicules, aussi bien dans les villes anciennes que dans les villes modernes (Stanley et al., 2012).

#### **I.1.5.5 Les parcs, jardin**

*« Les parcs et les jardins, sont des espaces partiellement aménagées comportant principalement de la verdure. Historiquement, leur fonction était liée à la production alimentaire, mais aujourd'hui, ils sont utilisés pour des activités sociales, récréatives, esthétiques et d'exposition »* (Stanley et al., 2012, p. 1097). Les tailles des parcs et des jardins

varient généralement, les premiers étant souvent plus vastes et nécessitant moins d'entretien végétal. Toutefois, l'usage des termes "parc" et "jardin" peut varier selon les pays. Certains de ces espaces verts sont créés pour des usages culturels spécifiques et peuvent être hautement spécialisés, tandis que d'autres sont des zones polyvalentes (Stanley et al., 2012).

## **I.2 Paramètres morphologiques**

Cette section propose de définir les indicateurs morphologiques à l'échelle du tissu urbain et à l'échelle de l'espace public. Selon (Nikolopoulou, 2004), la morphologie urbaine se réfère à la forme tridimensionnelle résultant d'un ensemble de bâtiments et d'espaces interstitiels. Les paramètres morphologiques urbains servent d'outils pour décrire et mesurer qualitativement ou quantitativement certaines caractéristiques de cette configuration tridimensionnelle (telles que la forme, la porosité, la compacité). Cela permet de catégoriser et de comparer partiellement la forme urbaine avec d'autres sites selon une échelle urbaine convergente, en utilisant des paramètres spécifiques (Al-Sudani, AH, 2018). En effet, Un grand nombre de paramètres morphologiques urbains ont été élaborés pour étudier la forme urbaine. Chacun de ces paramètres offre un aperçu de certains aspects qualitatifs tels que la forme des bâtiments et la disposition des rues (Al-Sudani, AH, 2018; Morganti et al., 2017).

### **I.2.1.1 Paramètres morphologiques liés au tissu urbain**

De multiples recherches ont été menées pour établir et améliorer les paramètres morphologiques relatifs au microclimat. Adolphe a examiné comment la configuration urbaine affecte le climat extérieur en identifiant plusieurs paramètres morphologiques basés sur un modèle spatial simplifié à l'échelle du quartier et de la ville. Parmi les indicateurs morphologiques étudiés se trouvent la densité, la rugosité, la porosité, la sinuosité, l'occlusivité, la compacité, la contiguïté, l'admission solaire et la minéralisation. Quelques-uns de ces indicateurs seront brièvement définis ci-dessous (Adolphe, 2001) :

#### **I.2.1.2 La sinuosité**

La sinuosité urbaine est un paramètre important dans les études de la climatologie urbaine car elle peut influencer la vitesse et la direction des vents. Lorsque les espaces ouverts, notamment les rues, sont orientées dans une direction différente de celle des vents, cela modifie l'écoulement de l'air. Adolphe explique que la sinuosité est calculée en fonction de l'angle formé

entre l'orientation de la rue et la direction des vents car l'accélération de l'air dépend essentiellement de cet angle (Figure I-6) (Adolphe, 2001)

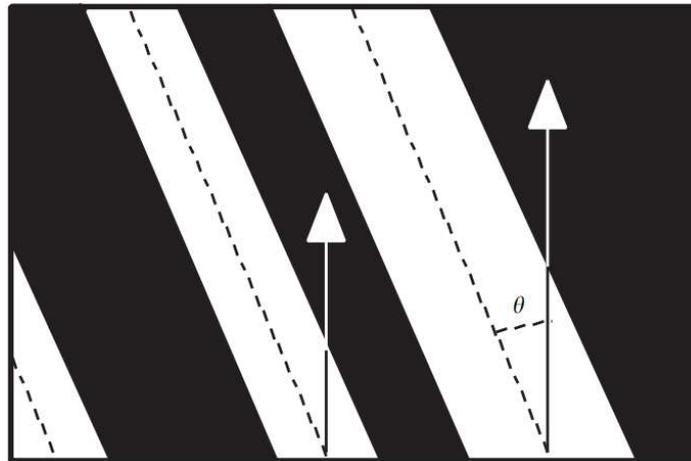


Figure I- 6: Tissu urbain caractérisé par une rue orientée avec un angle  $\theta$  contre un flux de gradient de pression.  
Source: (Adolphe, 2001)

### I.2.1.3 La rugosité

La rugosité urbaine est couramment utilisée en climatologie urbaine. Elle désigne la texture de la surface urbaine, y compris les bâtiments, les routes, les trottoirs, les arbres, les espaces verts et autres structures. La rugosité urbaine est un facteur important qui modifie le profil du vent et participe à la formation des microclimats urbains. Les surfaces urbaines rugueuses peuvent ralentir le mouvement de l'air, créer des turbulences et modifier la température et l'humidité de l'air dans les zones urbaines. En climatologie urbaine, la rugosité urbaine est souvent mesurée et caractérisée à l'aide d'indices tels que la hauteur moyenne des bâtiments et la densité de couverture végétale (Adolphe, 2001).

### I.2.1.4 La porosité

Le concept de porosité urbaine est relatif au rapport entre espaces vides de la ville et à leur avec le volume de la canopée urbaine. Ces espaces vides urbains peuvent être des espaces publics (rues, places, parcs, boulevards, etc.), des espaces privés (cours, patios, jardins privés, etc.), ou des espaces résiduels entre les bâtiments isolés. La porosité d'un milieu urbain influe sur la vitesse du vent en créant une variation du gradient de pression. Cette variation est mesurée en fonction de deux paramètres : la porosité et la sinuosité. Pour évaluer la porosité d'un tissu urbain, Adolphe a mis l'accent sur trois points (présenté dans la figure I-7) : d'abord il a considéré que l'écoulement de gradient de pression est parallèle à l'axe de la rue, la porosité est

donc dans un plan perpendiculaire à cette direction. Ensuite, il a négligé l'effet des espaces extérieurs fermés et des rues perpendiculaires à l'écoulement de gradient de pression. Aussi, il a considéré que les profils des rues sont rarement circulaires; et que le profil de la vitesse du vent est parabolique et maximale au niveau de l'axe de la rue (Adolphe, 2001).

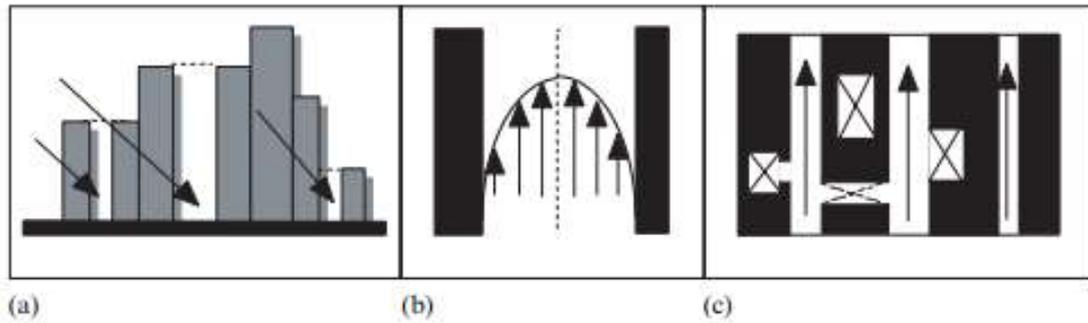


Figure I- 7: (a) Zones ouvertes dans une rue dans un plan vertical (b) Flux d'air dans une rue, dans un plan horizontal (c) Espaces latéraux ou proches négligés dans un plan horizontal. Source : (Adolphe, 2001)

### I.2.1.5 La densité

La densité urbaine peut affecter le microclimat, mais l'utilisation de la densité seule peut être limitée car différentes configurations de bâtiments peuvent avoir la même densité (Sun, 2013). Pour caractériser la géométrie urbaine, (Pont & Haupt, 2005) ont établi l'outil "Space-mate" (Figure I-8) qui permet de décrire un environnement urbain à l'aide d'un ensemble de variables de densité telles que FSI, GSI, OSR et L. autres paramètre aussi tel que Le FSI, également appelé FAR, exprime l'intensité d'une zone construite, et qui peut démontrer comment la géométrie d'un site peut être différenciée des autres (Wei et al., 2016).

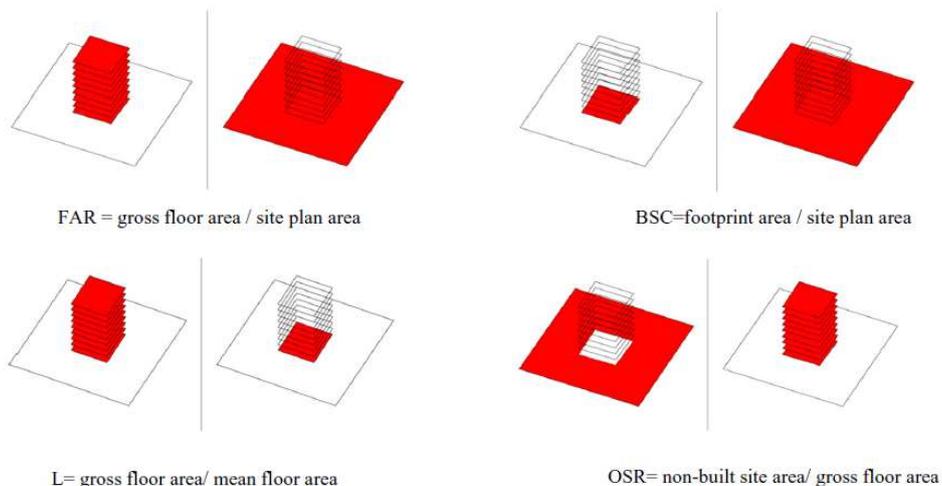


Figure I- 8: The diagram of indicators included in 'space-mate'" en français est : "Le diagramme des indicateurs inclus dans 'space-mate (Wei et al., 2016)

### **I.2.1.6 Contiguïté**

La contiguïté dans l'urbanisme est un concept lié à la proximité des bâtiments les uns aux autres. En d'autres termes. Cette proximité permet de réduire les pertes de chaleur et de réduire la consommation d'énergie en utilisant les bâtiments voisins pour réduire la perte et la transmission de chaleur par les murs extérieurs. Le paramètre de contiguïté permet de mesurer la proximité entre les bâtiments. On peut calculer ce paramètre en utilisant le rapport entre la surface de l'enveloppe adjacente et la surface totale du bâtiment, ou en utilisant uniquement la surface verticale de l'enveloppe extérieure (Adolphe, 2001). La contiguïté est généralement très importante dans les centres historiques denses tels que les médinas et les vieilles villes.

## **I.2.2 Paramètres morphologiques liés à l'espace public**

A l'échelle de l'espace public, les paramètres morphologiques les plus étudiés sont le facteur de vue du ciel, le rapport H/L et l'orientation des rues, en particulier pour les rues canyons. Le terme "canyon urbain" a été inventé par (Oke, 1981) pour décrire la géométrie des rues formant une vallée étroite et profonde entre deux rangées de grands bâtiments. Il a défini trois paramètres pour mesurer cette géométrie, à savoir la hauteur moyenne des bâtiments qui bordent la rue, la largeur et la longueur de la rue (P. Lin et al., 2017). Le facteur de vue du ciel (SVF) est aussi considéré comme l'indicateur tridimensionnel le plus couramment utilisé depuis des décennies. De plus, la géométrie des rue canyons et sa relation avec le climat de la ville peut être étudié à travers des indicateurs géométriques tels que le rapport d'aspect (H/L), le rapport longueur/largeur et la densité des bâtiments. Le rapport d'aspect et l'orientation des rues sont utilisés pour évaluer de rayonnement solaire qui atteint le canyon urbain, ainsi que le flux et le stockage de l'énergie radiante l'écoulement du vent, ce qui affecte l'environnement thermique dans le canyon urbain (P. Lin et al., 2017).

### **I.2.2.1 Le ratio H/L (le prospect)**

Ratio ou rapport H/L est utilisé pour évaluer la proportion entre la hauteur moyenne et la plus petite largeur de l'espace, en prenant en compte la largeur la plus petite entre les bâtiments dans un polygone non homogène. Ce ratio permet de mesurer la distance minimale entre les façades qui peuvent être exposées ou non aux rayons du soleil et quantifie ainsi la proportion des surfaces verticales et horizontales impliquées dans les échanges d'énergie de l'espace (Fouad, 2007). La figure I-9 schématise la distribution du rayonnement solaire incident dans différent

scénario de H/L. de même le rapport H/L peut avoir un impact sur la direction et la vitesse du vent en ralentissant ou en créant des tourbillons au niveau du sol (Fouad, 2007). En outre, il convient de noter que chaque ville a des conditions climatiques qui lui sont propres, et ce qui signifie qu'il n'existe pas un rapport d'aspect standard optimal pour toutes les villes. Toutefois, des recherches menées par (Oke, 1988) ont montré que pour les villes situées dans les latitudes moyennes, un rapport d'aspect idéal se situe entre 0,4 et 0,6. Cette plage de valeurs peut avoir un impact positif sur le microclimat de la ville en aidant à réguler la température en été et en hiver, en favorisant un flux d'air adéquat pour assurer le confort thermique des habitants et en contribuant à la dispersion des polluants. C'est pourquoi il est important de tenir compte du contexte climatique local lors de la conception des bâtiments urbains (P. Lin et al., 2017).

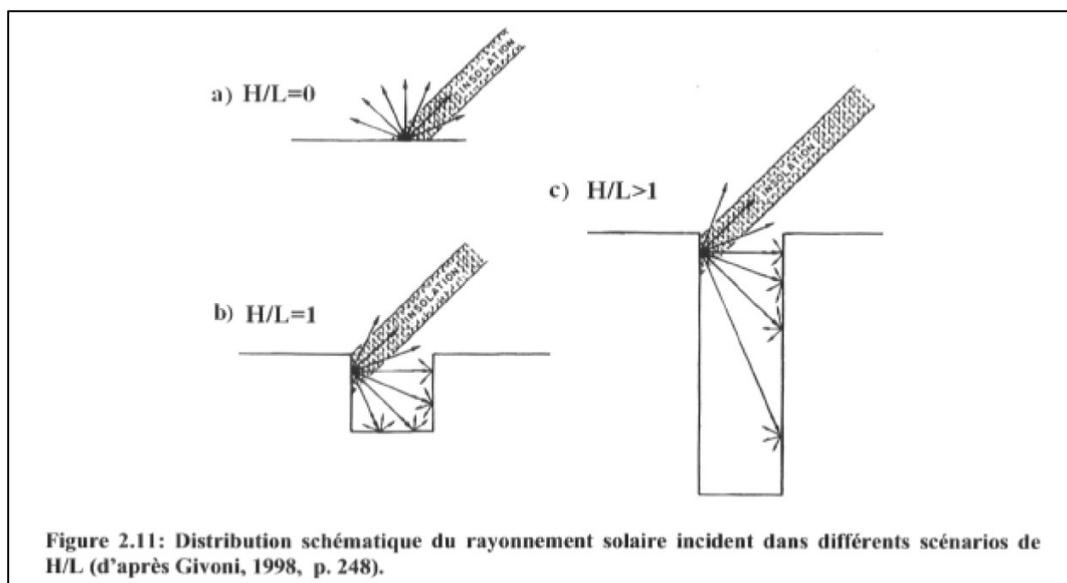


Figure I- 9: Distribution schématique du rayonnement solaire incident dans différents scénarios de H/L (d'après Givoni, 1998, p.248) repéré dans (Fouad, 2007)

### I.2.2.2 Le facteur de vue du ciel (SVF)

Le Facteur de Vue du Ciel (SVF) est un indicateur clé pour caractériser la configuration des villes. Il se calcule en comparant le rayonnement reçu ou émis par une surface plane avec celui émis ou reçu par l'environnement hémisphérique entier (Watson & Johnson, 1987; Wei et al., 2016). Autrement dit, le SVF représente la partie de la voûte céleste observable à partir d'un point de mesure au niveau du sol, variant d'une vue complètement ouverte sur le ciel (SVF =1) à une vue entièrement masquée par le ciel (SVF =0) (Al-Sudani, AH, 2018; Nikolopoulou, 2004). Les enquêtes menées sur le terrain ont indiqué qu'il y a une corrélation négative significative entre le SVF et l'effet d'îlot de chaleur urbain (Unger, 2009; Wei et al., 2016). Cet indicateur est fréquemment employé dans les recherches environnementales urbaines pour

évaluer le rayonnement solaire et le confort thermique (Al-Sudani, AH, 2018; Krüger et al., 2011; Rehman & Uzair, 2017).

Le calcul du SVF peut se faire de différente façon. la photographie hémisphérique, qui projette une représentation 3D de l'environnement réel sur une image 2D pour identifier les zones du ciel qui sont visibles ou cachées par des éléments tels que des constructions, des arbres et d'autres caractéristiques du paysage. La méthode analytique ou géométrique, implique l'examen du flux de rayonnement qui atteint le ciel visible depuis une surface donnée (Al-Sudani, AH, 2018; Johnson & Watson, 1984). Il y a eu également des avancées significatives dans les modèles numériques, et des logiciels et des plugins ont été développés pour aider à traiter les images et calculer le SVF (Al-Sudani, AH, 2018).

### **I.2.2.3 L'orientation**

La disposition des rues par rapport au nord a un impact significatif sur le confort thermique extérieur des usagers en modifiant le mouvement du vent et l'accès au rayonnement solaire. Les rues parallèles ou inclinées légèrement par rapport à la direction du vent favorisent généralement une ventilation naturelle. Les rues orientées est-ouest offrent un peu d'ombre et elles sont davantage exposées au rayonnement solaire en été, notamment le matin et l'après-midi. Selon Ali-Toudert et Mayer (2006), les rues orientées est-ouest sont exposées au rayonnement solaire direct pendant une période plus longue que les rues orientées dans d'autres directions (Salmanian & Khosravi, 2022). En somme, l'orientation des rues est un élément crucial à prendre en compte pour améliorer le confort thermique des espaces extérieurs (Hegazy & Qurnfulah, 2020).

## **I.3 Microclimat urbain Ilot de chaleur urbain :**

### **I.3.1 La climatologie urbaine**

La climatologie urbaine est un domaine d'étude qui remonte à l'Antiquité et qui s'est développé au fil des siècles avec l'arrivée d'instruments de mesure. Les recherches ont d'abord porté sur l'îlot de chaleur urbain à grande échelle, mais ont ensuite évolué vers des échelles plus petites et ont impliqué différentes disciplines telles que la climatologie, la géographie, l'architecture et l'urbanisme. Les architectes ont commencé à prendre en compte l'impact du climat sur les bâtiments et leur environnement extérieur. Aujourd'hui, la climatologie urbaine est considérée

comme un enjeu important pour la pratique de l'aménagement urbain et de l'architecture (Colombert, 2008).

Shafaghat a analysé la littérature existante sur la climatologie urbaine pour établir sa classification. Il soutient que la climatologie urbaine fait partie des études sur le développement urbain durable, qui elles-mêmes s'inscrivent dans un cadre plus large de développement de l'environnement bâti. Selon cette revue de littérature, la climatologie urbaine se décompose en trois sous-branches : l'urbanisme, l'aménagement du territoire et la conception urbaine (figure I-10). La croissance urbaine, le microclimat urbain et le confort humain font partie des sujets d'intérêt de la recherche en urbanisme. Les connaissances sur la climatologie urbaine se sont développées avec des sujets tels que l'analyse géo-spatiale, largement utilisée pour améliorer la conception et la planification urbaine (Shafaghat et al., 2016).

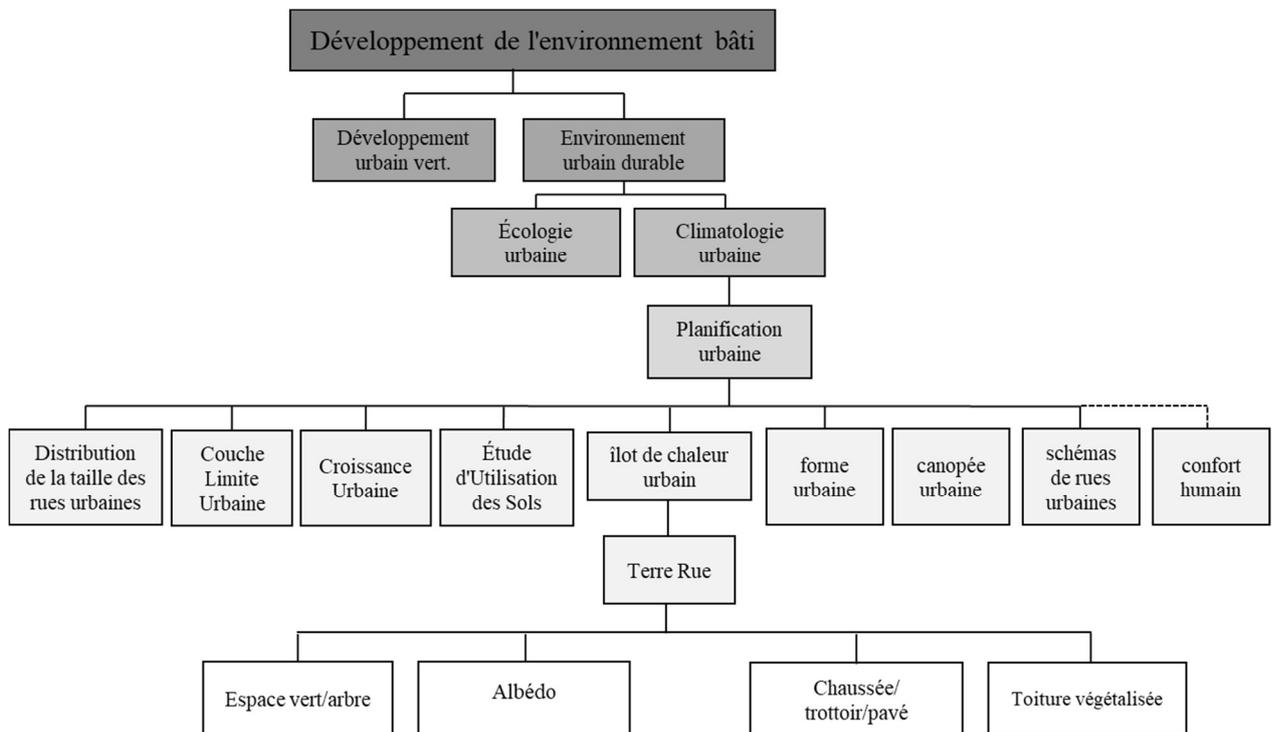


Figure I- 10: Branche de l'urbanisme dans la taxonomie des études de climatologie urbaine. Source : (Shafaghat et al. 2016)

### **I.3.2 Les échelles du climat dans le milieu urbain**

L'espace urbain peut avoir un impact significatif sur le climat de la ville en créant des échelles climatiques distinctes. Ainsi, les phénomènes qui se produisent dans chaque échelle ne sont pas nécessairement similaires ou n'ont pas les mêmes effets. Chaque échelle spatiale possède ses propres interactions atmosphériques et climatiques distinctes (Fouad, 2007).

Selon Guyot (1997) cité par (BOUSSOUALIM, 2002) et (Fouad, 2007), il existe trois échelles climatiques : la sous-couche limite de rugosité, qui correspond à l'échelle microclimatique, la couche limite urbaine, qui correspond à l'échelle méso-climatique, et la couche externe, qui correspond à la macro-échelle. La micro-échelle désigne des zones spécifiques dans l'espace public où se produisent des interactions entre les conditions climatiques et les éléments physiques de la morphologie urbaine. À une échelle plus large (méso-échelle), ces interactions concernent des phénomènes plus importants comme l'îlot de chaleur urbains, alors que l'échelle macro-échelle englobe des événements climatiques de grande ampleur, tels que les tempêtes. Il est crucial de comprendre les interactions entre ces différentes échelles climatiques afin de mieux appréhender la manière dont les phénomènes climatiques se manifestent à différentes échelles spatiales et de déterminer comment ils peuvent être atténués pour améliorer le confort thermique dans les zones urbaines (Fouad, 2007).

### **I.3.3 Le microclimat urbain**

Les conditions météorologiques sur une large échelle spatiale et à long terme déterminent le climat d'une région donnée, y compris les précipitations, la température et le vent. Les zones urbaines se distinguent des zones rurales par leur forte densité de structures créées par l'homme, ce qui entraîne la création de microclimats, c'est-à-dire des zones locales où le climat est différent de celui de l'environnement qui l'entoure. La taille de ces microclimats dépend de plusieurs facteurs, tels que la densité de la ville, le nombre de personnes, l'occupation des sols, la configuration et la structure des rues. L'îlot de chaleur urbain est un exemple de microclimat qui se produit dans les villes à haute densité (Ragheb et al., 2016).

Il existe plusieurs facteurs qui participent à la modification de l'équilibre thermique dans le milieu urbain, à savoir l'augmentation de la chaleur sensible causée par les structures urbaines, l'absorption du rayonnement solaire par les matériaux à faible albédo, la dégradation de la végétation urbaine, l'émission accrue de rayonnement infrarouge et une chaleur

anthropogénique accrue causé par les activités industrielles. Les études sur les îlots de chaleur urbains sont menées dans toutes les villes et dans des contextes climatiques différents. Ce phénomène est plus prononcé dans les villes où la température est plus élevée, mais il peut également se produire dans des villes des hautes latitudes. Pour mesurer et quantifier l'effet d'îlot de chaleur urbain, il existe deux approches principales. La première consiste à utiliser les données de température de surface pour analyser les tendances et les mesures d'atténuation à l'échelle urbaine. La seconde approche consiste à mesurer la température de l'air à l'intérieur des villes pour mieux comprendre le confort thermique urbain, en tenant compte des variations microclimatiques et de la demande d'énergie des bâtiments urbains (Palme & Salvati, 2021).

#### **I.3.4 Facteurs influençant le microclimat.**

Plusieurs recherches ont abordé la question des microclimats urbains et différents paramètres régissant les microclimats urbains ont été étudiés à l'aide de diverses méthodologies. Initialement, les facteurs naturels étaient les seuls à être étudiés pour comprendre les phénomènes liés aux microclimats urbains, mais au fil du temps, et avec l'évolution de la recherche, d'autres facteurs directs et indirects ainsi que des paramètres liés à l'environnement bâti ont été ajoutés. La figure I-11 présente un aperçu de l'ensemble des facteurs à prendre en compte dans les études des microclimats urbains (Bherwani et al., 2020). Les facteurs naturels tels que la vitesse et la direction du vent, l'humidité et les précipitations font partie des processus de formation des microclimats. D'autres facteurs indirects, tels que la pollution atmosphérique, contribuent également à la modification des paramètres climatiques. De plus, l'environnement bâti modifie le microclimat à travers des paramètres morphologiques tels que la hauteur des bâtiments, la densité, le SVF (fraction de la surface végétale) et le rapport H/L (hauteur sur largeur) (Bherwani et al., 2020).

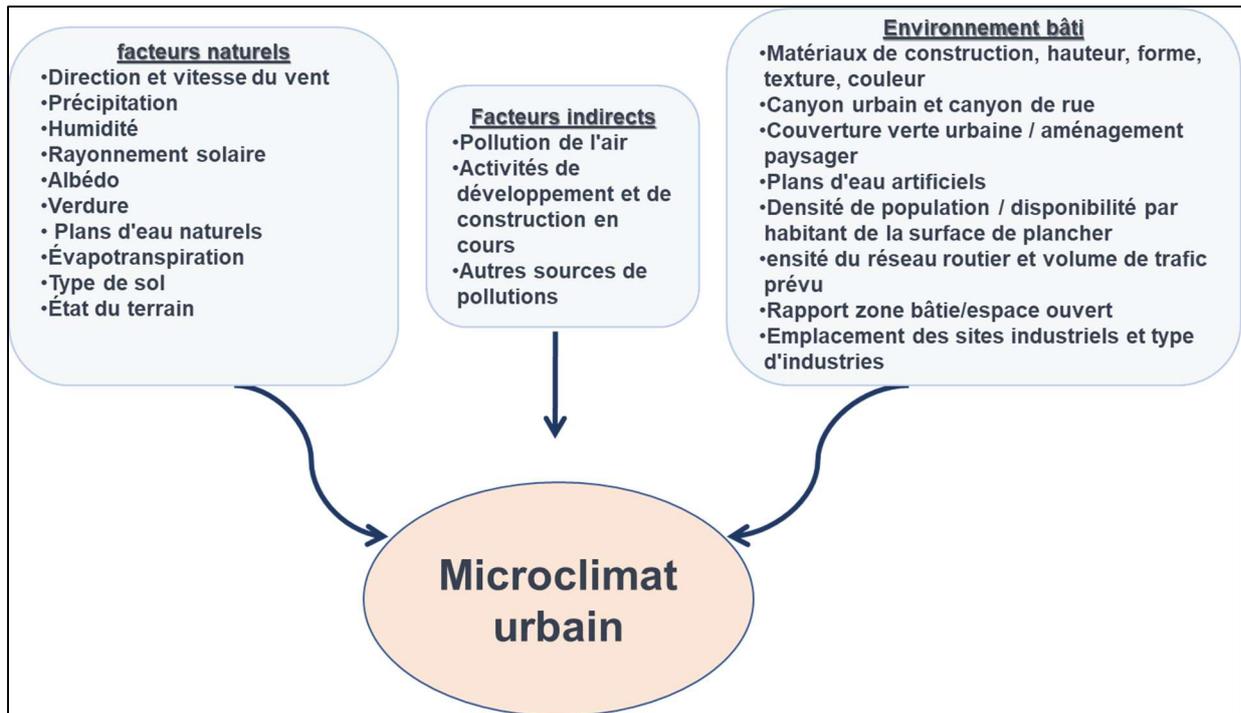


Figure I- 11: Les facteurs globaux responsables du microclimat d'une région. Source : (Bherwani et al., 2020)

L'urbanisation affecte significativement les précipitations dans les villes en modifiant la rugosité de la surface, la canopée urbaine, les sources de noyaux de condensation des nuages et les processus de convergence et de mélange. Une augmentation de 9% du taux de précipitations dans les villes d'Asie de l'Est d'ici à 2050 est prévue par le GIEC<sup>3</sup>, due en partie à l'urbanisation croissante. L'urbanisation peut également entraîner un îlot de sécheresse urbain, des obstacles à l'écoulement du vent et des variations dans l'albédo de la surface. Les effets de l'urbanisation sur l'albédo de la Terre sont variés et dépendent de la croissance urbaine. L'humidité est également un paramètre important du microclimat qui est affecté par l'urbanisation (Bherwani et al., 2020).

### I.3.5 L'influence de l'urbanisation sur le microclimat

L'urbanisation conduit à des microclimats spécifiques aux environnements urbains, distincts des régions rurales avoisinantes, en termes de température, la direction et la vitesse du vent, le transfert de chaleur et les schémas de précipitations. Ces microclimats ont des impacts néfastes sur l'environnement, l'économie et la société. Par exemple, les hausses de température augmentent la demande d'énergie pour la climatisation et amplifient les niveaux de gaz photo-

<sup>3</sup> Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

oxydants et de CO<sub>2</sub>. L'usage de systèmes de climatisation requiert beaucoup d'énergie et engendre des coûts considérables, en particulier pendant les pics de demande. La pollution atmosphérique urbaine est associée à des maladies cardiovasculaires et respiratoires, affectant la santé des citoyens, en particulier les groupes vulnérables tels que les enfants et les personnes âgées (Davies et al., 2008). Les approches de conception urbaine bioclimatique et d'architecture passive peuvent réduire la consommation d'énergie et améliorer la durabilité des espaces urbains construits. Plusieurs variables urbaines, telles que la présence de végétation, l'altitude et le rapport hauteur/surface de plancher, sont identifiées comme des éléments cruciaux pour atténuer les effets du climat urbain. Les modèles mathématiques, tels que le bilan énergétique et les approches numériques dynamiques, sont les plus fiables pour élaborer des solutions à grande échelle (Tumini et al., 2016).

En outre, de nombreuses recherches ont été menées dans diverses villes de différents contextes climatiques, pour étudier comment la variation de la forme urbaine modifie le microclimat, à travers la mesure de différents paramètres tels que la température de l'air, la température radiante moyenne, la vitesse de l'air, etc. Les résultats indiquent que l'augmentation de la densité urbaine peut diminuer l'effet d'îlot de chaleur en été, améliorer le confort thermique des habitants, et réduire les besoins de refroidissement pendant la journée. D'autres recherches indiquent que la configuration des rues a une influence significative sur le microclimat urbain et que son amélioration participe à la réduction de la chaleur. Les arbres aussi constituent un élément important qui peut contribuer à une baisse significative de la température radiante moyenne (Kamal et al., 2021).

### **I.3.6 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain**

#### **I.3.6.1 La notion de l'îlot de chaleur urbain**

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est intimement lié au développement des villes et à leur expansion, comme indiqué par plusieurs études. Il est généralement utilisé pour caractériser les espaces urbains où la température d'air est plus élevée que leurs zones environnantes rurales et non urbanisées » (Mansi et al., 2022). La Figure I-12 illustre ce phénomène montrant une différence de température entre les zones rurales et le centre-ville (FAHED, 2018).

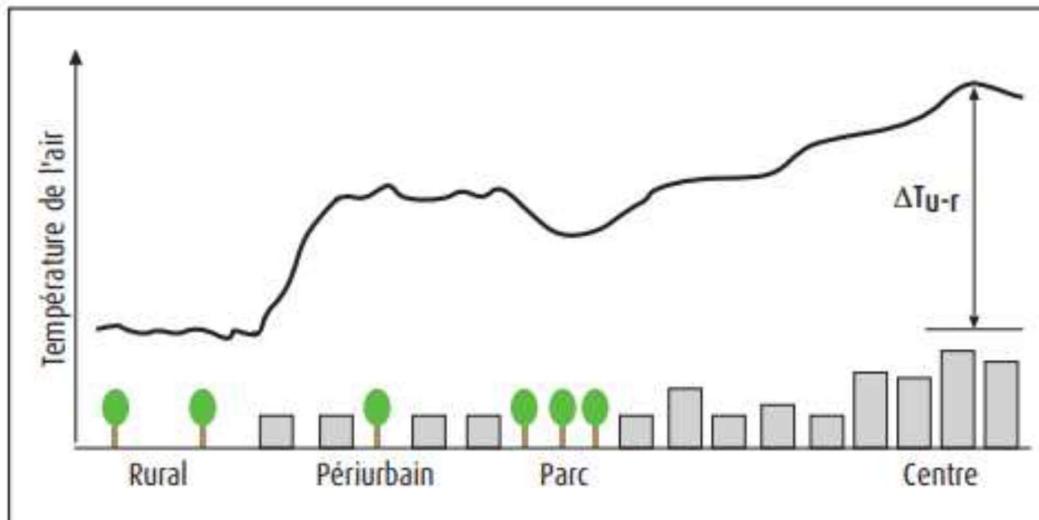


Figure I- 12: Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée montrant le phénomène d'ICU (Pigeon et al., 2008) repéré dans (FAHED, 2018)

Les caractéristiques de l'ICU et ses impacts sur les villes ont été déterminés par Luc Howard, Chandler et Tim Oke (Chandler & Gregory, 1976; Oke, 1974). L'îlot de chaleur urbain, se produit surtout la nuit dans les zones urbaines avec des surfaces imperméables et une forte densité bâti en absorbant la chaleur pendant la journée et la libérer la nuit. D'après les études d'Oke, la différence de température entre une ville et les zones environnantes peut varier de 2 °C pour une petite ville de 1 000 habitants à 12 °C pour une grande ville de plusieurs millions d'habitants (FAHED, 2018)

### I.3.6.2 Les origines de l'ICU

Le concept d'"îlot de chaleur urbain" (ICU) a été introduit en 1958, bien que la découverte de ce phénomène remonte à 1820. Les zones urbaines présentent une différence de température nocturne due à l'absorption et au stockage de radiations à courte longueur d'onde par des masses thermiques comme les bâtiments, qui sont ensuite émises la nuit sous forme de radiations à longue longueur d'onde. Les raisons de l'ICU incluent l'utilisation de matériaux capables de stocker des radiations à courte longueur d'onde, le manque d'évapotranspiration, la diminution des espaces verts, ainsi que les caractéristiques géométriques des paysages urbains, telles que la présence de bâtiments hauts qui peuvent bloquer la circulation de l'air et entraver le processus de refroidissement par convection. Les îlots de chaleur peuvent être bénéfiques dans les villes situées dans des régions à haute latitude avec des climats plus frais, mais ils peuvent causer de l'inconfort en été pour les habitants et augmenter la charge de climatisation dans les villes situées à des latitudes moyennes et basses (Aflaki et al., 2017; Mirzaei, 2015).

### **I.3.6.3 Les types de l'îlot de chaleur urbain (ICU)**

Il existe deux types d'îlots de chaleur urbains (ICU) : l'îlot de chaleur surfacique et l'îlot de chaleur atmosphérique. L'îlot de chaleur surfacique se produit lorsque les surfaces exposées au rayonnement solaire, telles que les toitures et les chaussées, ont une température plus élevée que l'air ambiant. La différence de température surfacique entre la zone urbaine et la zone rurale peut atteindre 10 à 15 °C durant la journée et 5 à 10 °C durant la nuit (FAHED, 2018). La grandeur de l'ICU surfacique dépend du rayonnement solaire et varie selon les saisons, atteignant son maximum durant l'été. La température surfacique peut être estimée à l'aide de la technologie de télédétection / caméra infrarouge. L'îlot de chaleur atmosphérique se divise en deux types selon (Oke, 1976) : ICU dans la canopée urbaine et ICU dans la couche limite. La canopée urbaine, qui est la couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments. La canopée urbaine est perturbée en raison de l'interaction entre les structures urbaines et les paramètres micro-météorologique engendrant des mouvements de turbulence. La couche limite s'étend du sommet des toitures des bâtiments jusqu'à plusieurs dizaines de mètres au-dessus des toitures (FAHED, 2018). La différence de la température moyenne annuelle de l'air dans une grande ville et une zone environnante varie entre 1 °C et 3 °C. L'ICU atmosphérique dans la couche limite est caractérisé par des transferts de chaleur entre la surface et l'atmosphère. (Bailey et al., 1997; Berdahl & Bretz, 1997; FAHED, 2018; Voogt & Oke, 2003)

### **I.3.6.4 Approches pour étudier l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU)**

Différentes approches ont été adoptées pour étudier l'îlot de chaleur urbain (ICU) et trouver des solutions pour réduire ses impacts négatifs. Ces approches comprennent l'approche multi-échelle, l'approche observationnelle et l'approche de simulation (Aflaki et al., 2017). L'approche multi-échelle prend en compte les processus à petite échelle et les interventions à méso-échelle, mais elle est complexe et peut manquer de données inclusives et complètes. Les approches observationnelles, telles que la mesure sur site et la télédétection thermique, sont utiles pour évaluer les impacts de l'ICU, mais elles sont limitées en termes de temps, de coûts et de capacité à identifier la distribution spatiale en 3D des quantités dans la zone urbaine. Les approches de simulation, notamment la dynamique des fluides numérique (CFD) et l'équilibre énergétique, sont largement utilisées pour modéliser différentes formes urbaines et recommander des stratégies de conception pour réduire l'ICU. Cependant, chaque approche a ses limites, et les

théories existantes dans l'analyse des phénomènes correspondants à chaque échelle ne sont pas toujours compatibles (Aflaki et al., 2017). La figure I-13 ci-dessous présente toutes les approches pour étudier l'ICU ainsi que leurs limitations.

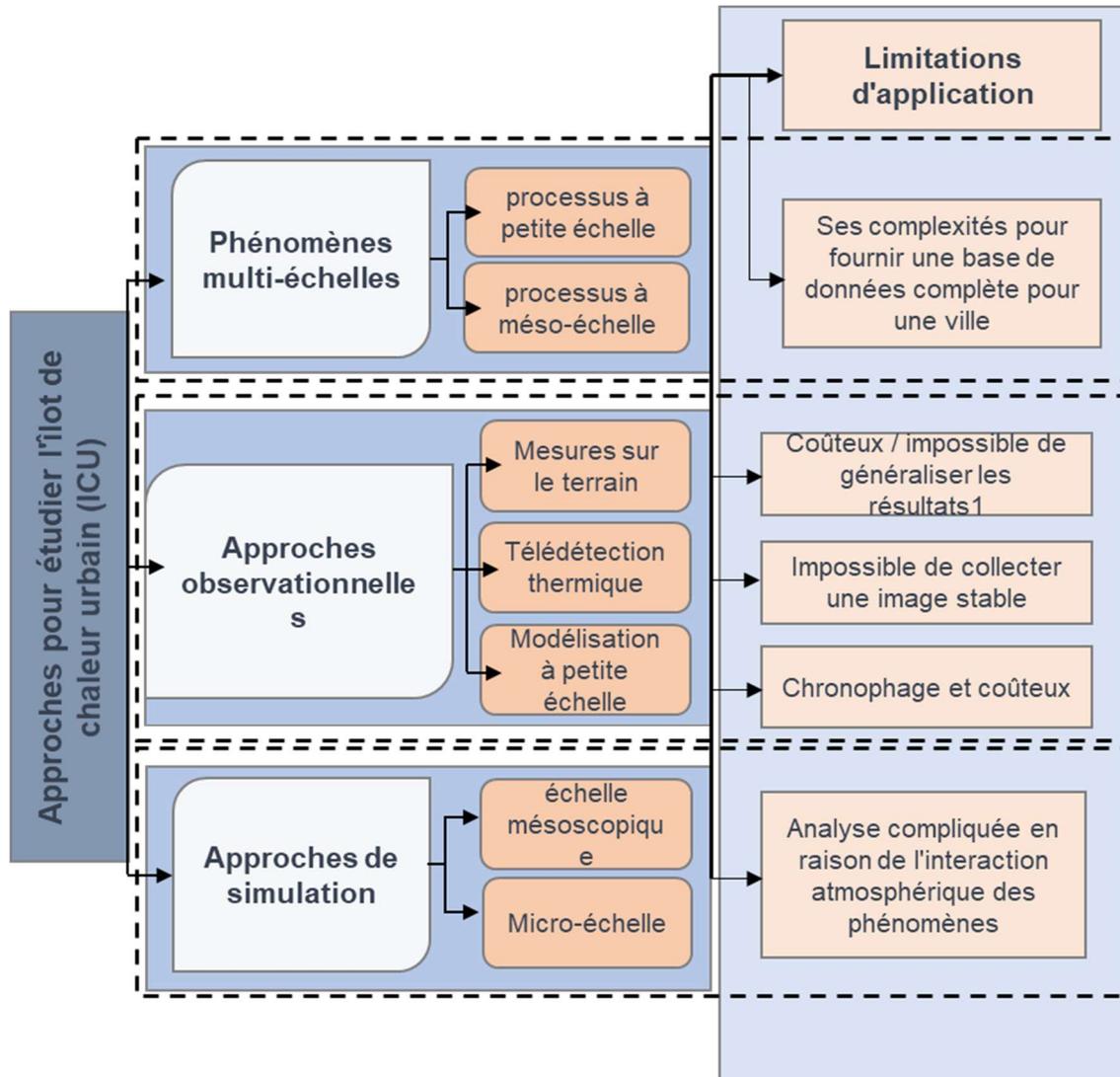


Figure I- 13: Approches et méthodes d'étude de l'îlot de chaleur urbain (ICU) ainsi que leurs limites. Source : (Aflaki et al., 2017)

## I.4 Le confort thermique extérieur

### I.4.1 Définition du confort thermique

La définition la plus utilisée du confort thermique est donnée par ASHRAE Standard 55 (2010), " ... condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique ". On constate d'après cette définition que la " satisfaction " est un élément clé dans la sensation du confort thermique. Le confort thermique est souvent associé à la notion de sensation thermique, mais il

est important de distinguer ces deux concepts. L'ASHRAE Standard 55 utilise la sensation thermique comme point de référence pour déterminer le confort thermique. Cependant, ces termes ne doivent pas être définis de la même manière, car ils représentent deux attitudes différentes envers le microclimat. La sensation thermique quantifie l'intensité de la stimulation thermique, alors que le confort thermique qualifie subjectivement l'état de confort ressenti par l'individu face à cette stimulation. Par conséquent, ces termes ne peuvent pas être échangés de manière interchangeable (de Dear, 2011; Dzyuban et al., 2022).

D'après les Normes internationales (Elnabawi & Hamza, 2019; Nikolopoulou, 2011) ISO 7730 de 2005, le confort thermique correspond à un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement environnant, impliquant que cette condition relève à la fois du physique et du psychologique. Bien que plusieurs chercheurs aient souligné que les sensations thermiques pouvaient varier d'un individu à l'autre, même en occupant le même lieu, en raison de plusieurs facteurs tels que l'état d'esprit, la culture et les perceptions sociales, le confort thermique a été exclusivement étudié sous un angle physique, malgré les suggestions d'influences psychologiques (Elnabawi & Hamza, 2019; Nikolopoulou, 2011).

#### **I.4.2 Le confort thermique extérieur**

La conception urbaine tient désormais compte de plus en plus du confort thermique dans les espaces extérieurs pour améliorer la santé publique, l'utilisation des espaces ouverts et les interactions sociales. Ce confort thermique est influencé par des facteurs tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relative, la forme et la géométrie urbaine, la topographie, la végétation, la présence d'eau et les propriétés de surface. L'ASHRAE a défini le confort thermique extérieur comme "l'état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique extérieur" (*ANSI/ASHRAE Standard 55-2017*, s. d.). Il existe de nombreux référentiels pour évaluer ce confort, notamment les jugements subjectifs sur la sensation thermique, la préférence thermique, le niveau de confort thermique et l'acceptabilité thermique, ainsi que les réponses physiologiques. Cependant, il est important de noter que très peu d'études se sont intéressées au confort thermique extérieur sous un angle physiologique (Abd Elraouf et al., 2022; Lai et al., 2020).

### I.4.3 Les facteurs qui influent sur le confort thermique extérieur

Plusieurs études ont été menées sur le confort thermique extérieur et ont été documentées dans la littérature scientifique (Arakawa Martins et al., 2022; Coccolo et al., 2016; Djongyang et al., 2010; Mishra & Ramgopal, 2013; Rupp et al., 2015). (Lai et al., 2020) offrent une synthèse particulièrement pertinente des facteurs qui influencent le confort thermique extérieur en les catégorisant en facteurs directs et indirects (figure I-14), que nous allons présenter ci-dessous :

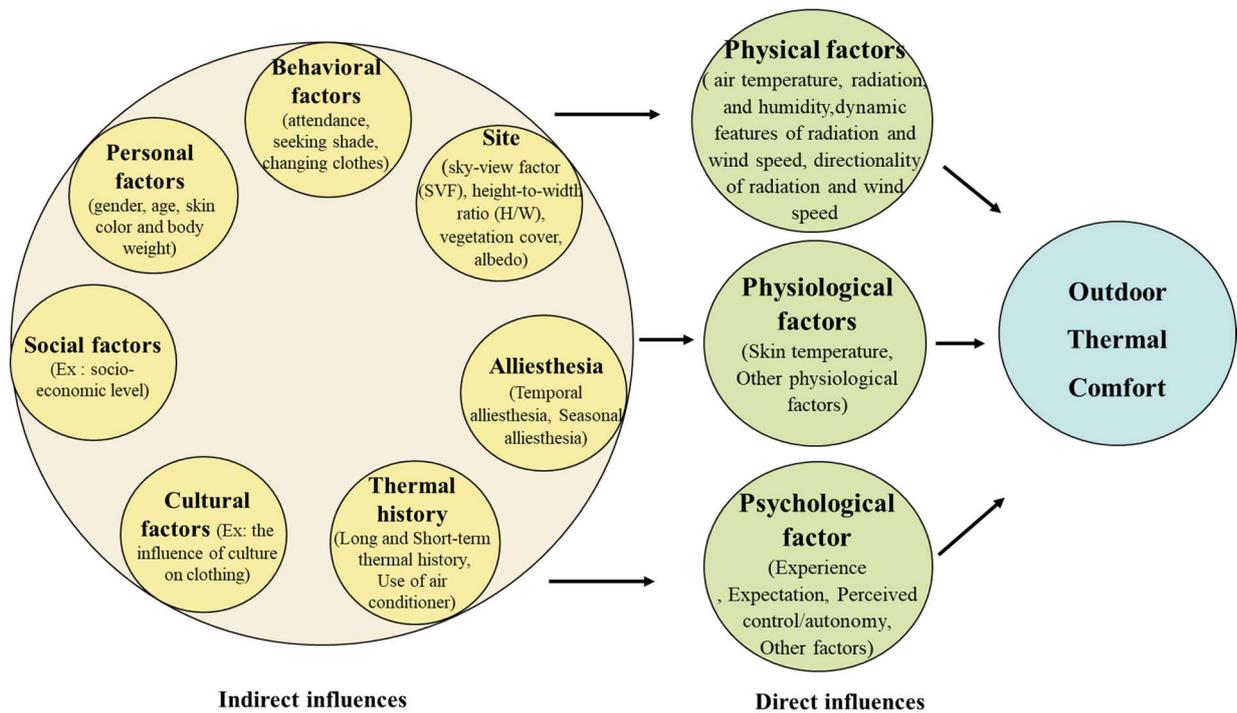


Figure I- 14: Influences directes et indirectes sur le confort thermique extérieur. Source : (Lai et al. 2020)

#### I.4.3.1 Influences directes

##### -Facteurs physiques

Les facteurs physiques qui influencent le confort thermique extérieur sont la température de l'air, le rayonnement thermique, le vent et l'humidité relative. Selon différentes études, la température de l'air est le paramètre microclimatique le plus important pour le confort thermique. Les différences de température radiante ont également une influence plus significative que celle du vent (Tseliou et al., 2016; Yin et al., 2012). Pour créer des espaces urbains ouverts confortables thermiquement, il est recommandé de contrôler les niveaux de rayonnement thermique et de vent. Les changements dynamiques dans l'environnement

thermique extérieur sont également causés par les changements rencontrés par l'occupant lorsqu'il se déplace d'un endroit à un autre. La direction du vent et de la radiation solaire peut également affecter le confort thermique extérieur. Cependant, il n'y a pas eu suffisamment d'études sur l'impact de la radiation solaire non uniforme sur le confort thermique extérieur (Lai et al., 2020).

### **-Facteurs physiologiques**

Le confort thermique extérieur est évalué à l'aide d'indicateurs physiologiques, dont la température de la peau qui est la plus utilisée car elle est facile à mesurer et en relation directe avec le confort. Le système de thermorégulation commence à fonctionner dès que la température corporelle sort de la valeur normale afin de maintenir la température centrale. La température cutanée moyenne considérée comme confortable à l'intérieur est d'environ 33,5°C, tandis qu'en extérieur, la température cutanée moyenne associée à une sensation thermique neutre est de 32,7°C (Lai et al., 2020). Bien que d'autres paramètres physiologiques tels que la température centrale, le taux de sudation et la fréquence cardiaque soient peu étudiés, la température de la peau reste un indicateur important pour évaluer le confort thermique en extérieur. Des modèles de prédiction ont été développés pour estimer le confort thermique à partir de la température de la peau (Lai et al., 2020).

### **-Facteur psychologique**

Le confort thermique extérieur dépend de nombreux facteurs psychologiques tels que l'expérience, les attentes et le contrôle perçu. Les expériences passées influencent la perception du confort thermique, la température considérée comme confortable étant proche de ce qui a déjà été vécu. Les attentes des individus sur leur environnement thermique peuvent également affecter leur sensation de confort. Le contrôle perçu sur leur environnement a une incidence sur leur tolérance envers leur environnement thermique. Les activités exercées dans les espaces extérieurs peuvent influencer le niveau de confort thermique. D'autres facteurs tels que la naturalité, la stimulation environnementale et le temps d'exposition ont été proposés dans un cadre d'adaptation psychologique, mais ont été peu étudiés. En revanche, les prévisions météorologiques, l'émotion et la sécurité n'ont pas eu d'influence significative sur la sensation thermique en extérieur selon les études (Lai et al., 2020).

### **I.4.3.2 Influences indirectes**

#### **-Facteurs comportementaux**

Les personnes peuvent s'adapter aux conditions climatiques en modifiant l'environnement ou en ajustant leur propre état thermique. Dans les conditions chaudes, les comportements courants incluent la recherche de l'ombre, boire des boissons, changement de vêtements ou quitter l'espace extérieur. Les gens préfèrent chercher de l'ombre et se déplacer des espaces ensoleillés vers les espaces ombragés lorsque la température augmente. Le changement de vêtements est également considéré comme un facteur comportemental important pour s'adapter aux conditions climatiques, mais il est aussi lié à des facteurs culturels (Lai et al., 2020).

#### **-Facteurs personnels**

Les individus peuvent percevoir différemment la température même s'ils sont exposés aux mêmes conditions climatiques, cela s'explique par les différences individuelles. Ces différences sont liées à des facteurs tels que le sexe, l'âge, le poids et la couleur de la peau (Lai et al., 2020).

#### **-Facteurs sociaux**

Certaines recherches affirment que les facteurs sociaux ont un impact sur la sensation thermique extérieure, tels que la position académique et non-académique, la compagnie et le niveau socio-économique. Les résultats varient selon les études, certains facteurs ayant un impact significatif sur la sensation thermique en extérieur, tandis que d'autres n'en ont pas. Par exemple, le niveau socio-économique n'a pas eu d'impact significatif selon certaines études, mais d'autres ont montré que les personnes ayant un niveau socio-économique plus élevé étaient plus sensibles à l'environnement thermique extérieur (Lai et al., 2020).

#### **-Facteurs culturels**

La perception du confort thermique des individus est aussi influencée par les différences culturelles, mais il est complexe de comprendre leurs effets sur l'acclimatation physique ou à l'adaptation psychologique. Les habitudes vestimentaires et le comportement envers le microclimat, comme l'exposition au soleil, peuvent également être influencées par la culture (Lai et al., 2020).

### **-Histoire thermique**

La perception thermique des individus peut être influencée par leur expérience passée de l'environnement thermique. Cette influence peut être divisée en deux catégories : à court terme tel que l'utilisation de climatiseurs et à long terme comme l'adaptation à un climat particulier sur une longue période (Lai et al., 2020).

### **-Site**

La sensation de confort thermique peut varier en fonction des paramètres morphologiques locales liée au site, tels que la vue du ciel, le rapport hauteur/largeur, la couverture végétale et l'albédo. Ces différences sont dues à des variations de température radiante, de vitesse du vent et de température de l'air (Lai et al., 2020).

### **-Alliesthésie**

Le terme "alliesthésie" a été proposé pour la première fois en 1971 pour décrire la sensation agréable ou désagréable causée par une variation dans les conditions microclimatiques. La théorie a été initialement proposée pour expliquer le plaisir thermique dans les environnements intérieurs construits (Lai et al., 2020).

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons défini les indicateurs morphologiques qui ont un impact sur l'environnement thermique à l'échelle du tissu urbain et à l'échelle de l'espace public. Les paramètres morphologiques urbains servent d'outils pour décrire et mesurer qualitativement ou quantitativement l'espace urbain. Cela permet aussi de catégoriser et de comparer entre les différents sites urbains et déterminer la forme qui offre les meilleures conditions climatiques en utilisant des paramètres spécifiques (Al-Sudani, AH, 2018). En effet, un grand nombre de paramètres morphologiques urbains ont été élaborés pour étudier la forme urbaine (Al-Sudani, AH, 2018; Morganti et al., 2017).

Il y a peu d'études qui abordent l'espace public extérieur sous l'angle morphologique, et les approches morphologiques restent encore insuffisamment représentées et très rarement mentionnées dans les études sur les espaces publics extérieurs (Han et al., s. d.). Nous avons évoqué le concept de la morphologie de l'espace public dans ce chapitre.

Le concept d'espace public est une notion à la fois simple et complexe qui dépend de sa description physique dans l'environnement urbain et de sa signification sociale et symbolique. L'espace public se définit par sa forme et sa fonction, donc il existe plusieurs types d'espaces publics ouverts à savoir la place, la rue, le jardin...etc.

De multiples recherches ont été menées pour établir et améliorer les paramètres morphologiques relatifs au microclimat, tel que : la sinuosité, la rugosité, la porosité, la densité, le ratio h/, le facteur de vue du ciel (SVF) et l'orientation.

La conception urbaine prend de plus en plus en compte le confort thermique dans les espaces extérieurs pour améliorer le cadre de vie dans la ville. Ce confort dépend de divers éléments tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relative, la forme et la structure de la ville, la topographie, la végétation, la présence d'eau et les propriétés des surfaces. D'autre part la notion du confort a une dimension subjective liée à la psychologie de l'être humain. De ce fait, La littérature scientifique contient plusieurs études documentant le confort thermique extérieur, en classifiant les facteurs qui l'influencent en facteurs directs et indirects (Han et al., s. d.; Lai et al., 2020)

# **Chapitre II : Etat de l'art et positionnement épistémologique**

### **Introduction :**

Avant de passer à la deuxième partie qui aborde le site d'investigation, nous explorons d'abord la littérature scientifique. Ce chapitre présente une synthèse de recherches menées sur la question du microclimat et le confort thermique dans les espaces urbains extérieurs et leurs relations avec la morphologie urbaine. Nous exposons les approches adoptées et les résultats obtenus, dans l'objectif de définir la méthode appropriée à ce travail.

Dans ce chapitre, nous faisons une revue de littérature de plusieurs études réalisées par des chercheurs et des experts dans le domaine du microclimat et du confort thermique extérieur et leur relation avec la morphologie urbaine. Notre objectif, est d'identifier la meilleure méthode qui convient à notre objectif de recherche. De ce fait, nous avons effectué une sélection des différentes expériences traitant le même sujet de recherche, portant les mêmes objectifs, mais avec des méthodes et outils d'analyse différents. Cela nous permettra de choisir la méthode appropriée pour notre cas d'étude.

Dans un premier temps, nous évoquons les études portant sur le microclimat urbain, les différentes approches et méthodes utilisées pour les études du microclimat, ainsi que les publications les plus citées dans ce domaine.

Ensuite nous ciblons les études du confort thermique et les approches existantes dans la littérature, tout en mettant le point sur les indices et les normes utilisés ainsi que les méthodes d'évaluation du confort thermique extérieur. De plus nous présentons une synthèse des études les plus cités et qui traite la question du confort thermique extérieur

La simulation numérique est aussi abordée dans ce chapitre. Elle est devenue un pilier dans les recherches du microclimat et du confort thermique dans le milieu urbain avec l'évolution de l'outil informatique. Donc nous faisons une synthèse des différentes applications de la CFD dans les conceptions urbaines et architecturales ainsi que les logiciels de simulation du microclimat et du confort thermique extérieur.

Enfin, nous présentons des exemples des études menées sur l'impact de la morphologie de l'espace public sur le microclimat et le confort thermique extérieur, leurs méthodes et les résultats obtenu. En outre, nous montrons brièvement la méthode adoptée dans notre recherche.

## **II.1 Les études du microclimat urbain**

L'urbanisation et le développement des infrastructures ont accru l'attention portée aux études du microclimat urbain, en particulier au XXe siècle (Albdour & Baranyai, 2019; Bherwani et al., 2020; Y. Chen et al., 2021; Jänicke et al., 2021; Lenzholzer & Brown, 2016; Li et al., 2022; P. Lin et al., 2017; Mehare & Joshi, 2022; Palme & Salvati, 2021; Toparlar et al., 2017; Tsoka et al., 2020; Zhou et al., 2022). Plusieurs démarches ont été mises en place pour évaluer comment la configuration de la ville affecte le microclimat et le confort thermique (Bherwani et al., 2020). Dans ce qui suit, nous présentons les approches et méthodes adoptées dans les études du microclimat, ainsi qu'une revue des travaux les plus cités ayant eu un impact important dans ce domaine de recherche.

### **II.1.1 Approche et méthodes d'étude du microclimat**

Différentes méthodes ont été développées pour comprendre l'impact de l'urbanisation sur le microclimat urbain et le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Les approches couramment utilisées incluent les observations sur le terrain, les observations par satellite, la dynamique des fluides numériques (CFD) et les simulations numériques (Bherwani et al., 2020). À l'origine, l'étude du microclimat urbain était principalement basée sur l'observation, mais les progrès récents dans les technologies informatiques ont permis de développer des approches de simulation numérique plus sophistiquées pour cette étude (Tsoka et al., 2020). L'attention de la communauté scientifique a contribué au développement de cette discipline, surtout après que Oke T.R. a utilisé l'équation du Bilan Énergétique de Surface qui permet d'établir une relation entre les différents paramètres du microclimat urbain. L'évolution des méthodologies au fil des ans est présentée sous forme de diagramme de flux dans la figure II-1 établi par (Bherwani et al., 2020). Les méthodologies adoptées sont présentées en détails dans les sections suivantes.

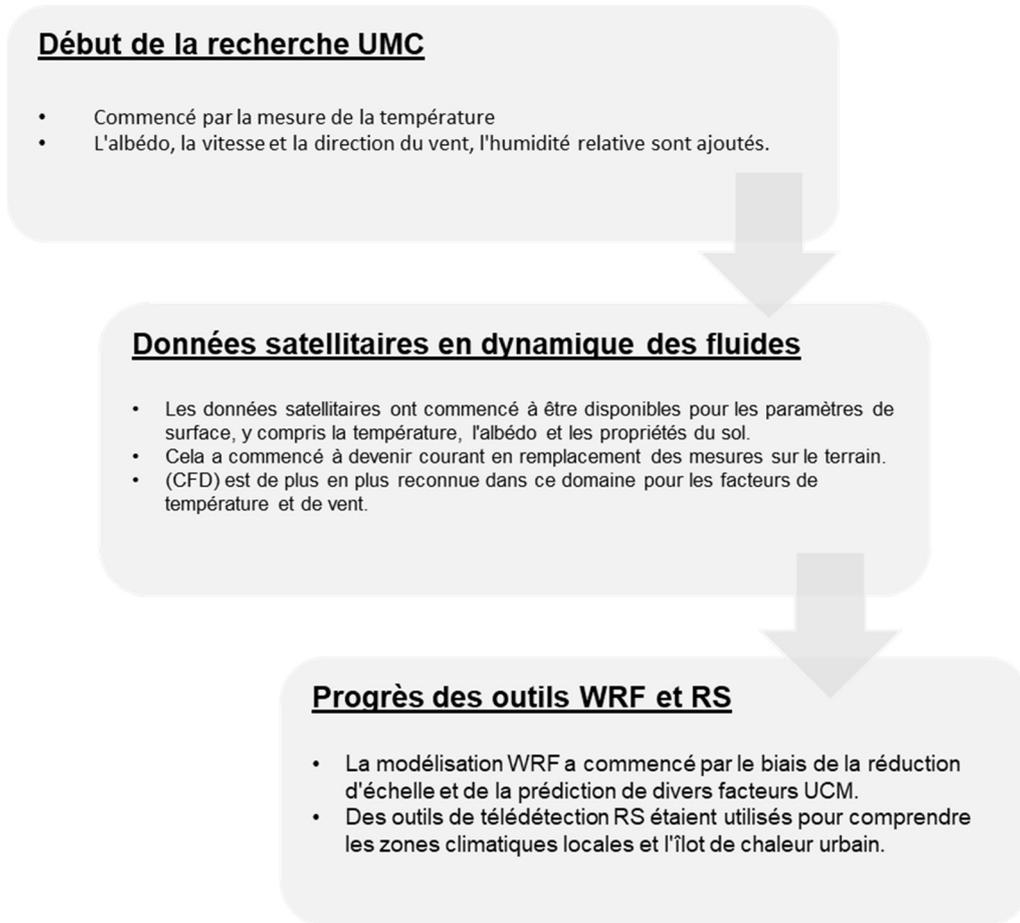


Figure II- 1: Avancées majeures dans le domaine de la recherche sur le microclimat urbain. Source : (Bherwani et al., 2020)

### II.1.1.1 Méthode expérimentale : Observations et Mesures sur terrain

Les observations sur le terrain étaient considérées comme l'un des meilleurs moyens de confirmer les hypothèses scientifiques, pendant l'étude de l'îlot de chaleur urbain, notamment pour la température et le vent (Oke, 2006). Autres paramètres ont également été étudiés tels que l'albédo, mais les observations sur le terrain étaient limitées par la technologie peu avancée au 19<sup>ème</sup> siècle, Par conséquent, la télédétection est devenue la méthode la plus facile à utiliser (Hafner & Kidder, 1999). Aujourd'hui, les mesures sur le terrain sont principalement utilisées pour vérifier les résultats de la télédétection. Grâce aux progrès technologiques actuels, il est possible d'utiliser des techniques sophistiquées pour mesurer et examiner des observations plus subtiles (Bherwani et al., 2020). La figure II-2 établi par (Bherwani et al., 2020), résume efficacement l'évolution des études portant sur les mesures sur le terrain, tandis que le tableau 1 présente les avancées et les limites historiques des mesures sur le terrain et de l'analyse des paramètres microclimatiques. Les méthodes avancées telles que la télédétection, les capteurs et les réseaux de surveillance sont devenues nécessaires pour l'évolution de ce domaine de

recherche, malgré l'utilité des observations sur le terrain dans le passé. De même, les prochaines méthodes pourraient être basées sur les développements actuels dans ce domaine (Bherwani et al., 2020).

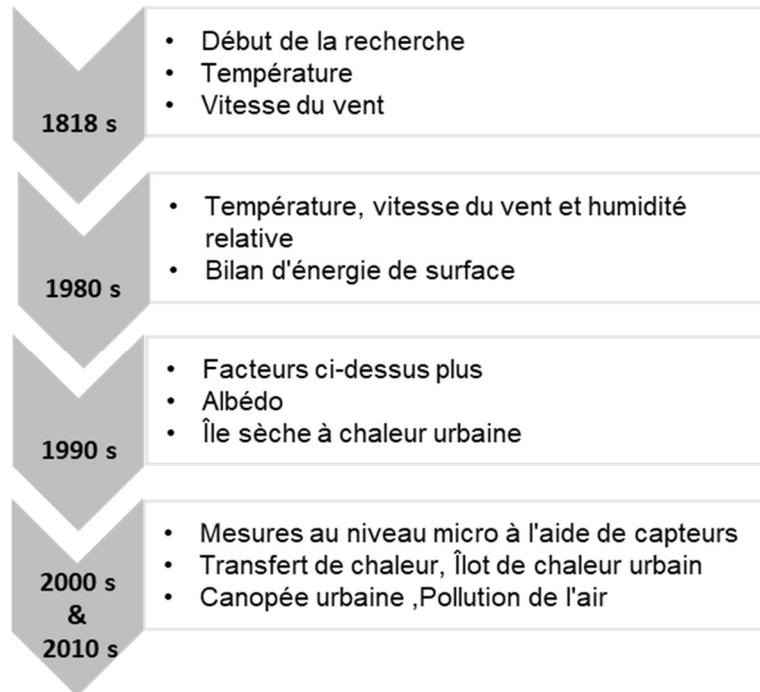


Figure II- 2: Extrait de l'évolution des études de mesure sur terrain dans le domaine du microclimat. Source : (Bherwani et al., 2020)

La méthode expérimentale utilisée dans les études d'îlot de chaleur urbain repose essentiellement sur la comparaison des enregistrements climatiques effectués dans deux zones : la zone urbaine et la zone rurale qui l'entoure, en utilisant des stations météorologiques fixes ou mobiles ainsi que des capteurs adaptés. La température de l'air est le paramètre le plus couramment utilisé pour mesurer l'intensité de ce phénomène. Cette intensité est définie par la différence entre la température de l'air maximale quotidienne dans le centre-ville et celle de la zone suburbaine environnante. La vitesse et la direction du vent, le rayonnement solaire, et d'autres paramètres ont été moins étudiés, bien que leur importance soit reconnue (Tsoka et al., 2020).

Cependant, les procédures présentent des inconvénients tels que des limitations en termes de temps et de coûts, une résolution spatiale limitée et un risque d'erreur élevé. Pour surmonter ces obstacles, l'utilisation de méthodes telles que le développement de modèles numériques à micro-échelle peut aider à la simulation des climats urbain locaux et le calcul des paramètres climatiques tels que le rayonnement solaire et la circulation de l'air (Tsoka et al., 2020).

Tableau II- 1: Avancées majeures dans la recherche sur le microclimat grâce à l'analyse et l'observation sur terrain Source : (Bherwani et al., 2020)

Analyse et observation sur terrain				Limitation	
Année	Auteur	Paramètre de mise au point/ zone	Breve description	Contributions significatives/nouveauté/résultats notables	
1818	Luke Howard	Température	Observations de données sur le terrain sur le climat de Londres par rapport à la campagne	La température urbaine est plus élevée que celle de la campagne et une différence notable dans le profil du vent est observée.	Seules les mesures de température ont été cartographiées, aucune autre entrée ni évaluation n'a été réalisée.
1987	T.R. Oke	Température et vitesse du vent.	Surveillance sur site de la vitesse du vent et de la température, ainsi que l'établissement de leur corrélation. Résolution de l'équation de bilan d'énergie de surface (SEB).	Des régimes d'écoulement sont identifiés en fonction des dimensions et de l'espacement des structures construites, et l'effet de canyon est observé.	La cartographie des données était limitée à certaines zones. De plus, les équations ne capturaient pas l'essence des variations, ce qui a été prouvé correct jusqu'aux années 1950, lorsque la Préviation Numérique du Temps (PNT) a connu un succès limité.
1997	Kadioglu	Température	Étude des tendances de température de l'air de surface en Turquie conclu que la température de nuit a une tendance relativement croissante, tandis que les températures de jour restent inchangées.	Le réchauffement pour la période de 1939 à 1989 est estimée à 0,1 °C pour la moyenne estivale et à 0,7 °C pour la moyenne hivernale des températures.	Les observations auto-contrôlées des méthodes paramétriques reposent sur des hypothèses qui ne peuvent pas être validées pour des séquences corrélées. Des méthodes non paramétriques auraient dû être utilisées.
1997	Taha	Albédo	Mesures de l'albédo effectuées à Los Angeles Bassin utilisant des vols à basse altitude	Le maximum d'albédo signalé était d'environ 0,2, avec une moyenne comprise entre 0,12 et 0,16 dans les zones urbaines. Il a été rapporté que le cœur de la zone urbaine présentait un albédo plus faible en raison de la présence de végétation.	L'analyse basée sur un seul paramètre a été réalisée en se basant sur des données spatiotemporelles limitées.
1999	Santamouris et al.	Température, canopée urbaine	Transfert de chaleur convectif mesuré à partir des surfaces murales adjacentes des bâtiments opposés ayant un impact sur la température de l'air.	Une différence de température de surface entre les murs opposés des bâtiments a été observée jusqu'à 19 °C. On a constaté une augmentation de la température de l'air de 4,5 °C entre les murs.	L'effet de paramètres confondants tels que la vitesse du vent et l'humidité a été négligé. L'évaluation a été restreinte en termes de variations de la couverture urbaine.
2014	Rajagopalan et al.	Température, îlot de chaleur urbain.	Mesure de l'effet de la géométrie urbaine et de l'écoulement du vent sur l'UHI dans la ville de Muar, en Malaisie.	L'intensité de l'îlot de chaleur urbain (UHI) a été mesurée à 4 °C pendant la journée et à 3,2 °C pendant la nuit. La cause identifiée était le développement chaotique de la ville avec des immeubles de grande hauteur et des rues étroites, ce qui entraîne une réduction de la ventilation et un emprisonnement de la chaleur.	La mesure de l'îlot de chaleur urbain (UHI) est de nature restrictive et ne permet pas d'identifier des points chauds spécifiques ni de détailler les causes. Il s'agit d'une simple observation rapportée avec une liste de causes probables.
2014	Edussuriya et al	Canopée urbaine, qualité de l'air.	Des données sur la pollution de l'air et le microclimat ont été collectées en temps réel dans 20 zones résidentielles urbaines réparties sur cinq grands districts de Hong Kong afin d'analyser les impacts de la canopée urbaine sur la température et la pollution de l'air.	En utilisant l'analyse en composantes principales, il a été conclu que seuls cinq attributs urbains tels que la densité de la zone, la hauteur de rugosité, le volume moyen de la zone construite, le développement des terres et la compacité sont corrélés avec les particules en suspension (PM) et les oxydes d'azote (NOx).	La relation de cause à effet a été faiblement établie dans cette étude holistique. Les hypothèses sous-jacentes de l'ACP n'ont pas été prises en compte avant de conclure les observations paramétriques.
2015	Shahrestani et al	Canopée urbaine, température	Une étude sur le microclimat à Londres a révélé que l'évaluation des performances thermiques/énergétiques des bâtiments devrait être réalisée en tenant compte des informations sur le microclimat, en remplaçant l'utilisation des données météorologiques conventionnelles.	La disposition et les attributs de la zone construite ont un impact significatif sur le microclimat. Le profil du vent est affaibli dans les régions fortement urbanisées. On a constaté que l'évapotranspiration contribue à atténuer l'îlot de chaleur urbain (UHI).	L'évaluation de l'îlot de chaleur urbain (UHI) basée sur un seul paramètre ne tient pas compte des facteurs de confusion nécessaires pour faire progresser la science dans ce domaine.
2020	Wong, 2020Wong	Température	Étude des scénarios de circulation et de piétonnisation Ville urbaine densément peuplée en référence aux zones climatiques locales. Étude de l'impact des déplacements des véhicules et des piétons par rapport à la température dans un canyon de rue.	L'impact de l'îlot de chaleur n'est pas entièrement atténué par une réduction du trafic automobile intense.	L'évaluation de l'îlot de chaleur urbain (UHI) basée sur un seul paramètre à une échelle réduite ne permet pas de traiter la question de la mise en œuvre de la science.

**II.1.1.2 Méthodes basées sur la télédétection et les SIG**

L'utilisation de la télédétection pour étudier le microclimat urbain s'est généralisée à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, car elle permet d'analyser plusieurs paramètres tels que la température, l'albédo et l'humidité, grâce à de nombreux capteurs et satellites comme l'AVHRR, le MODIS et le Landsat (Bherwani et al., 2020). Les différents facteurs et méthodologies d'évaluation utilisés par la télédétection sont présentés dans la figure II-3. Malgré les difficultés à prévoir et à prendre des décisions, les outils SIG ont récemment été utilisés pour réaliser des prévisions basées sur des données collectées par les satellites. (Bherwani et al., 2020) ont présenté une synthèse des avancées de la recherche dans le domaine de la télédétection et des observations effectuées par satellite, qui est illustrée par le tableau II-2.

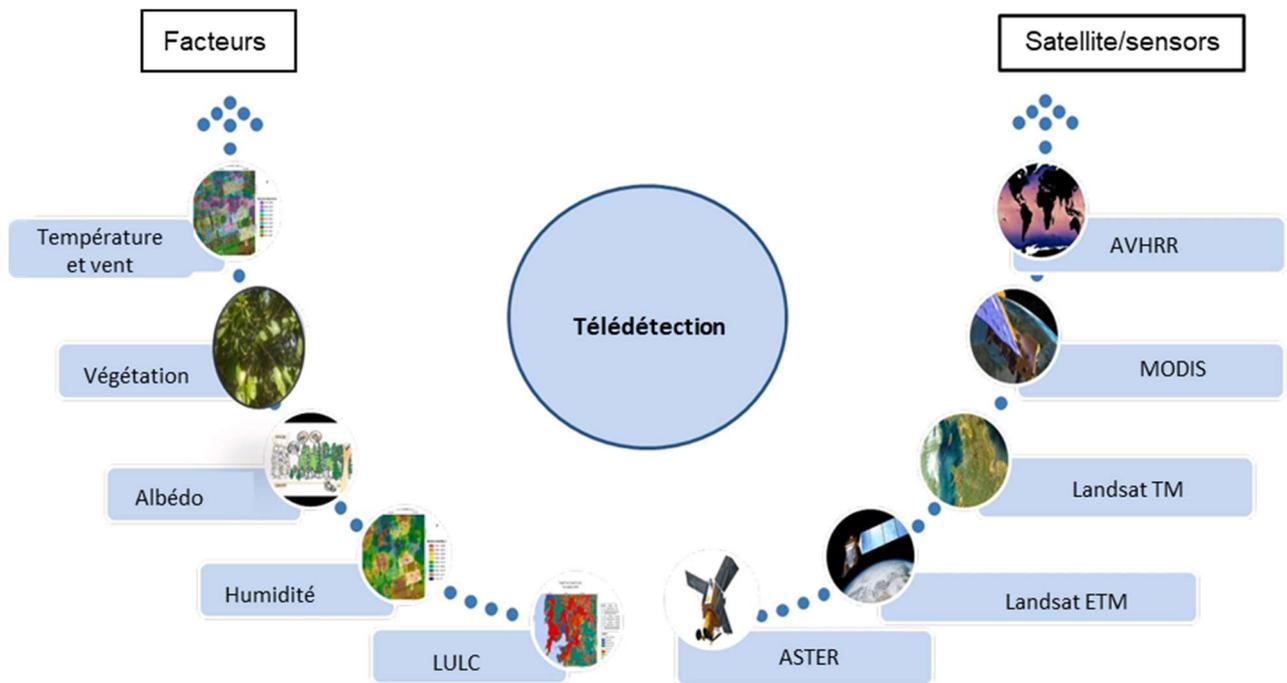


Figure II- 3: Utilisation des capacités de télédétection pour la recherche sur le microclimat urbain. Source : (Bherwani et al., 2020)

Tableau II- 2:Principales réalisations de la recherche et du développement du microclimat grâce à des mesures de télédétection. Source : (Bherwani et al., 2020)

Télédétection et modélisation basée sur les SIG et évaluation.				Limitation	
Année	Auteur	Paramètre de mise au point/ zone	Breve description	Contributions significatives/nouveauté/résultats notables	
1999	Hafner et Kidder	Albédo, température, humidité	Ils ont utilisé des données satellites de l'Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) pour déterminer différents paramètres de surface tels que l'albédo et les propriétés du sol (thermiques et d'humidité).	Le contenu en humidité a été étudié dans les zones urbaines et rurales, avec pour conclusion générale que les zones urbaines présentaient une humidité plus faible. Dans l'un des cas, la différence dans la zone urbaine était de seulement 40 % d'humidité par rapport aux zones rurales.	Une analyse multiparamétrique a été réalisée à l'aide de données satellites, cependant, la validation sur le terrain et les liens entre les différents paramètres faisaient défaut.
2002	Dezso et al.	Température	Budapest a été étudiée en utilisant le Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) pour étudier les variations de température de surface de jour et de nuit en tant que mesure dépendante du temps.	L'intensité de l'îlot de chaleur urbain (UHI) détectée était comprise entre 1 K et 3 K. La période la plus intense était celle des nuits estivales	Étude basée sur l'analyse d'un seul paramètre pour chaque étude.
2007	Stathopoulou et al.	Température	Les données de télédétection Landsat ETM et les données de couverture terrestre Corine ont été utilisées pour identifier l'effet d'îlot de chaleur urbain pendant la journée.	L'effet d'îlot de chaleur urbain pendant la journée a été mesuré et validé sur le terrain. Le processus complet est décrit en détail pour permettre la reproduction des résultats.	Étude de l'UHI basée uniquement sur les données Landsat, sans tenir compte de la validation sur le terrain et des données en séries temporelles
2007	Krayenhoff et Voogt	Température, LULC	Les images satellites et les dispositifs d'estimation aéroportés sont préparés pour correspondre à la température de surface et aux variations de l'utilisation des terres (LULC) d'une ville qui sont liées à des paramètres tels que la position topographique, la couverture terrestre, le volume des bâtiments par unité de surface et le dégagement de chaleur d'origine anthropique.	"Temperatures of Urban Facets in 3-D" (TUF-3D) est développé pour mesurer les températures de surface en se basant sur le modèle de bilan énergétique.	Les limitations de l'étude étaient d'étudier les dispersions de température à la surface et l'anisotropie dans la télédétection des zones urbaines à travers la version actuelle de TUF-3D.
2009	Wang et al.	Température, vent Vitesse, hauteur PBL	Les variations diurnes de température ont été mesurées ainsi que les vitesses du vent. Les variations de la hauteur de la couche limite planétaire ont également été mesurées.	Les vitesses du vent ont été mesurées. Les variations de la hauteur de la couche limite planétaire ont également été mesurées. L'urbanisation a entraîné une augmentation de la température tant le jour que la nuit, respectivement de 0,6 °C et 1,4 °C, et le niveau d'ozone en surface a également augmenté de 2,9 % pendant la journée et de 4,7 % pendant la nuit, par rapport aux changements dans les cartes d'utilisation des terres entre 1990 et 2001. Une réduction de la vitesse du vent pendant le jour (d'environ 3 m/s) et pendant la nuit (de 0,5 à 2 m/s) a également été observée et mesurée.	L'augmentation de la température avec une diminution de la vitesse du vent n'est pas appropriée pour décrire les variations des concentrations d'ozone. Les travaux futurs devraient être axés sur la reconnaissance de l'impact des changements du taux d'émission par rapport à l'utilisation des terres et à la couverture terrestre.
2010	Ramchandra et Kumar	Température	Une étude a été menée à Bangalore en utilisant des données satellites et sur le terrain grâce à un SIG (Système d'Information Géographique) et a révélé une diminution des ressources naturelles de 76% pour la végétation et de 79% pour les plans d'eau.	Une densité de population plus élevée entraîne une augmentation des activités anthropiques, ce qui augmente la température de surface. Cette augmentation a été mesurée à environ 2 à 2,5 °C par décennie.	Une étude similaire sur l'Îlot de Chaleur Urbain (UHI), basée sur des données satellites, pourrait être réalisée pour un autre endroit. La validation sur le terrain et une étude multiparamétrique pourraient constituer des perspectives d'avenir.
2011	Liu et al.	Température	Les données acquises à distance à partir des images du Landsat TM (LST) et d'ASTER ont été utilisées pour mesurer la température de surface et déterminer l'effet de l'îlot de Chaleur Urbain (UHI).	Les indices de différence normalisée et de végétation à bande étroite (NDVI et NBVI respectivement) sont inversement corrélés à la température, cependant les zones construites sont directement corrélées	En plus des données satellites, les méthodes doivent être améliorées avec des mesures sur le terrain de la température de surface (LST, pour Land Surface Temperature).
2015	Grover et Singh	Température	Comparaison de l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) entre les deux grandes villes métropolitaines, Mumbai et Delhi, à l'aide de la cartographie thermique à partir de l'image Landsat-5 Thematic Mapper de mai pour Delhi et d'avril pour Mumbai.	Plus l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est élevé, moins l'intensité de l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) est importante.	Utilisation de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et d'autres paramètres tels que le vent et l'humidité reste à discuter en détail. Les perspectives futures montrent qu'il est nécessaire de mettre en œuvre des règles d'urbanisme et d'accroître les espaces verts.

### II.1.1.3 Méthodes basées sur la modélisation, la simulation numérique.

Avec l'avènement de la dynamique des fluides computationnelle (CFD), les méthodes numériques sont devenues largement répandues. La simulation numérique permet désormais prendre en compte les effets de diverses conditions météorologiques sur la performance énergétique des villes et des quartiers ainsi que sur le confort thermique des habitants. Elle joue un rôle crucial dans l'évaluation du microclimat urbain (Lam et al., 2021; Zhou et al., 2022). L'évaluation basée sur la CFD a commencé en prenant en compte la température et le vent comme paramètres clés du modèle (Bherwani et al., 2020; Erell et al., 2012; Shih et al., 1995). La figure II-4 présente l'évolution du processus de recherche sur la CFD dans le microclimat.

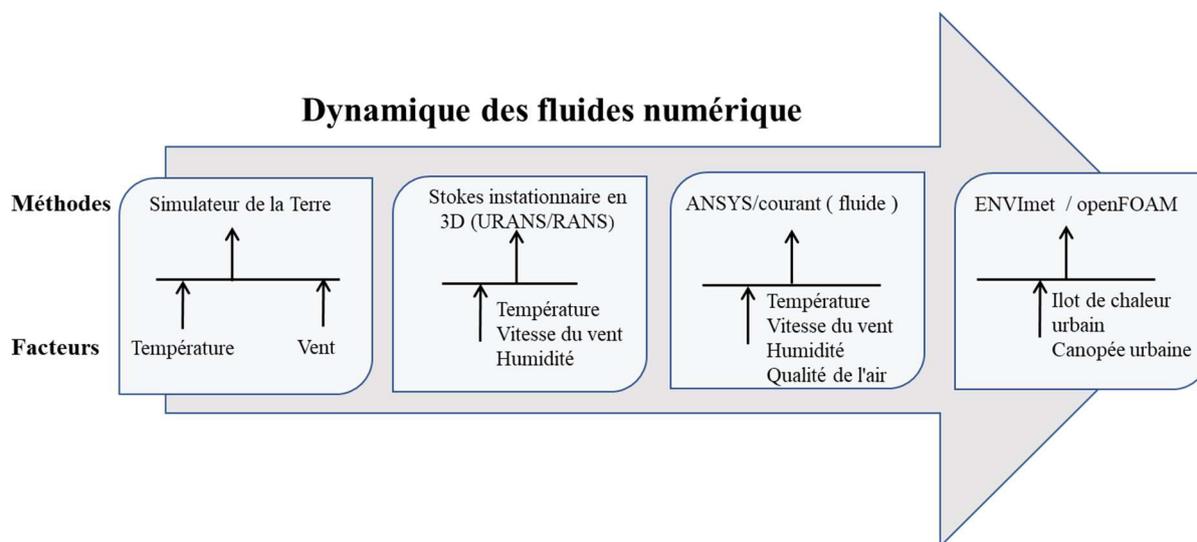


Figure II- 4: l'évolution de l'utilisation de la CFD pour la recherche sur le microclimat urbain. Source : (Bherwani et al., 2020)

Une autre méthode, différente à celle du CFD, qui est le WRF « Weather Research and Forecasting », c'est un modèle numérique météorologique adaptable, est employé dans les études de microclimat urbain pour évaluer l'impact du couvert végétal urbain (Abaas, 2020; Bherwani et al., 2020). En analysant les interactions à méso-échelle à l'échelle microscopique, le WRF a contribué largement à l'évolution de la recherche dans le domaine de la climatologie urbaine et la simulation numérique (Bherwani et al., 2020; Molnár et al., 2019). Le Tableau II-3 synthétise les études sur le microclimat utilisant les méthodologies de CFD et WRF, en distinguant les recherches sur CFD dans la partie "A" et celles sur WRF dans la partie "B" (Bherwani et al., 2020). La section suivante examine en détail les logiciels de simulation numérique utilisés dans la recherche sur le microclimat.

Tableau II- 3: Avancées de la recherche dans le domaine de microclimat grâce à la modélisation et aux simulations. Source : (Bherwani et al., 2020)

<b>A) Simulation et modélisation de la dynamique des fluides computationnelle (CFD)</b>					
Année	Auteur	Paramètre de mise au point/ zone	Breve description	Contributions significatives / originalité / résultats	Limitations
2007	Ashie et al.	Température .	L'Earth Simulator, un environnement thermique artificiel créé pour prendre en compte tous les effets d'une zone urbaine ainsi que leurs interactions mutuelles, a été utilisé pour Tokyo pour la CFD (Dynamique des Fluides Computationnelle).	La distribution de la température et du flux d'air a été analysée, suivie d'une validation sur le terrain	Les premières études sur la modélisation étaient concentrées uniquement sur la simulation de la température dans un système fermé. La simulation des conditions du monde réel s'est avérée difficile.
2011, 2019	Erell et al., Surapa et al.	Température, vent	Des données à haute résolution des zones urbaines ainsi que des conditions limites pertinentes ont été utilisées pour exécuter le modèle de température et de vent.	Ils ont prouvé que la dynamique des fluides numérique (CFD) peut être utilisée pour l'analyse simultanée de la température et du vent, mais dans les simulations de CFD, l'effet de la température sur la vitesse du vent est étudié.	L'analyse est réalisée dans une géométrie composite et se concentre sur les fluctuations de température avec le vent.
2015	Toparlar et al., 2015 Toparlar et al.	Température .	Des données à haute résolution des zones urbaines ainsi que des conditions limites pertinentes ont été utilisées pour exécuter le modèle de température et de vent.	Des mesures adaptatives, telles que le refroidissement par évaporation et le verdissage urbain, ont été suggérées en se basant sur les résultats de simulation.	Dans les recherches menées par l'UMC (University of Modelica City) avec des modèles d'équilibre énergétique, l'absence du champ de vitesse est la principale limitation.
2017	Toparlar et al.	Température .	Ils ont prouvé que les techniques de CFD peuvent être utilisées pour résoudre le transfert de chaleur/matière et leur interaction avec des obstacles individuels tels que les bâtiments.	Examen des techniques disponibles du CDF pour évaluer le microclimat	Les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) sur les zones urbaines sont réalisées uniquement pour la température. La mesure et l'accessibilité des données de température de l'air à des fins techniques et de validation ont été considérées comme limitantes.
2017	Fatima and Chaudhry	Température , vent	Ils ont résolu les équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds (RANS) avec FLUENT pour analyser le courant d'air et la température en utilisant la CFD.	La relation entre la température de l'air et le vent est établie grâce aux modifications du profil du vent dues aux grands bâtiments. On a calculé une augmentation de 16% de la demande de charge de refroidissement par degré d'élévation de la température.	Les résultats de modélisation ne sont pas validés pour une situation réelle.
2018	Jandaghian	Température, couverture urbaine, qualité de l'air	Ils ont étudié la simulation de la température et de sa variation, de la vitesse et de la dispersion des polluants à l'intérieur d'un canyon de rue bidimensionnel en utilisant ANSYS avec les équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds (RNG).	Les concentrations de polluants sans dimension (P) ont une valeur plus élevée du côté abrité et montrent une tendance à la baisse depuis le toit jusqu'au bas.	Les canyons urbains en 3D doivent être étudiés plus attentivement. Les travaux de simulation actuels sur ANSYS Fluent peuvent être validés par d'autres outils ou des données sur le terrain
2020	Abaas	Température	Ils ont étudié l'impact de l'urbanisation de Bagdad sur le microclimat et le confort thermique en utilisant des modèles tels que ENVI-met et RayMan-pro.	La hauteur et la largeur des bâtiments ont un effet significatif sur l'îlot de chaleur urbain (ICU). Les matériaux à albedo élevé peuvent atténuer l'ICU de 50%.	L'analyse d'un seul paramètre sans variations saisonnières est considérée comme limitante.
<b>B) Weather Research and Forecasting (WRF)/Urban canopy model (UCM)</b>					
2001, 2019	Kusaka et al., Molnar et al.	Canopée urbaine, Température.	Une comparaison de trois modèles de couverture urbaine proposés par WRF a été réalisée.	Les simulations diurnes pour les couches simples et multiples ont montré une bonne corrélation. Les modèles de dalles ont été identifiés comme ayant la plus forte chute de température nocturne.	La validation sur le terrain est un problème générique observé dans les modèles UCM. Une prédiction juste est observée en ce qui concerne l'UHI, cependant, l'efficacité de la prédiction des autres paramètres est remise en question.
2006	Holt and Pullen, 2007 Holt T and Puller J	Température , vent	Ils ont mené une étude utilisant le système de prévision méso-échelle couplé océan-atmosphère (COAMPS) pour des simulations numériques à New York City.	Le W-UCM (WRF couplé à l'UCM) donne de meilleurs résultats pour l'îlot de chaleur urbain en montrant un réchauffement nocturne accru dû aux effets des routes et des murs des bâtiments.	L'optimisation des paramètres pour une meilleure efficacité de prédiction s'est avérée être un défi.
2008	Zhang H et al	Température	Le système régional de modélisation atmosphérique (RAMS), associé à un modèle de couverture urbaine à une seule couche, a été utilisé pour évaluer la condition de l'îlot de chaleur urbain (UHI) à Chongqing, en Chine.	Les résultats simulés ont été vérifiés en les comparant aux données observées, ce qui a révélé que les modèles couplés présentaient de meilleurs résultats pour les simulations d'îlot de chaleur urbain.	Les modèles à l'échelle mésoscopique sont utilisés pour l'hydrostatique, ce qui entraîne une limitation de la taille des cellules de grille. De plus, on remarque une capacité limitée à simuler la couche limite et une précision limitée dans la direction verticale

Tableau II-3 (la suite): Avancées de la recherche dans le domaine de microclimat grâce à la modélisation et aux simulations. Source : (Bherwani et al., 2020)

A) La simulation et la modélisation de la dynamique des fluides numérique (CFD)					
Année	Auteur	Le paramètre de mise au point / zone	Breve description	Contributions significatives/nouveauté/résultat	Limitations
2010	Comarazamy et al., 2010 Comarazamy et al.	Température	Une étude de cas de l'îlot de chaleur urbain (UHI) réalisée à Porto Rico pour mesurer l'impact des changements d'utilisation des terres/couverture des terres (LULC) sur l'environnement de la ville. La validation a été réalisée à l'aide du modèle numérique atmosphérique RAMS sur différentes variables atmosphériques.	De plus, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est plus élevée pendant les journées à ciel dégagé et dans des conditions stagnantes. Une augmentation de la fréquence des précipitations légères est également estimée. L'ICU est mesuré avec des valeurs positives allant jusqu'à 2,5 °C. Une augmentation du mouvement convectif vertical est observée dans les zones urbaines.	Pour séparer les effets de l'urbanisation, de l'automatisation et des gaz à effet de serre, les simulations devraient être réalisées sur toute la saison. L'échelle spatiale pourrait également poser problème.
2010	Jin et al.	Température, Qualité de l'air	Les villes de Beijing, New York, Mexico et Moscou ont été étudiées en combinant des données de télédétection avec un modèle WRF (Weather Research and Forecasting).	Les résultats montrent que les aérosols urbains réduisent à la fois la température de la peau (Tskin) et la température de l'air (Tair). Les aérosols ont tendance à affecter davantage les nuages que la pluie elle-même.	Dans cette étude, seuls les résultats directs des aérosols sont pris en compte. Les émissions d'aérosols et la formation des nuages, qui ont un impact indirect, ne sont pas discutées.
2011	Chen et al.	Canopée urbaine, Température	Un modèle de canopée urbaine à couche unique a été étudié en combinaison avec le modèle WRF (Weather Research and Forecasting) afin de fournir des conditions limites inférieures à l'atmosphère. Ce modèle a été appliqué dans différentes villes du monde pour étudier l'effet de l'îlot de Chaleur Urbain (UHI).	Une vue d'ensemble globale du système de modélisation intégré WRF/urbain est fournie, le présentant comme un outil pour la modélisation climatique régionale avec des fonctionnalités de prédiction pour les villes futures.	Pour obtenir une précision dans la modélisation à petite échelle, des conditions climatologiques de haute résolution sont nécessaires.
2012	Yang et al., 2012 Yang et al.	Canopée urbaine, Température	Une étude a été réalisée sur l'effet d'îlot de chaleur urbain sur le climat urbain à Nanjing en utilisant le modèle WRF (Weather Research and Forecasting) et le modèle de canopée urbaine à couche unique (UCM).	Les arbres sur une pelouse offrent un meilleur rafraîchissement dans une zone urbaine.	Les UCM composites sont importants pour des études ultérieures, les incertitudes de l'étude actuelle sont liées à la couverture végétale à une seule couche. Les caractéristiques de l'urbanisation se limitent à la température et à la couverture végétale.
2014	Dasari et al., 2014 Dasari et al.	Température	Étude de 25 km avec WRF en collaboration avec NCEP.	Les résultats suggèrent que WRF peut analyser différentes tendances de température dans la plupart des régions de l'Europe et peut être appliqué à d'autres parties du monde.	Comme la plupart des études utilisant WRF, l'accent est mis sur une seule simulation paramétrique.
2017	Takane et al.	Température	Un modèle climatique régional (RCM) couplé à un modèle de canopée urbaine et à un modèle d'énergie des bâtiments (RCM-UCM + BEM) a été utilisé comme simulation numérique pour une meilleure quantification de la température et de la demande en électricité dans la zone urbaine.	Le modèle combiné a donné un résultat validé pour la demande d'électricité et la température de l'air urbain, indiquant que le modèle unifié peut être utilisé pour la prédiction.	Dans cette étude, l'effet de la température n'est pas pris en compte pour BEM + BEP (paramétrisation de l'effet du bâtiment) en raison de la chaleur anthropique, ce qui perd l'essence du travail par rapport à UMC.
2019a	Yang and Bou-Zeid, 2019a Yang et Bou-Zied	Température, vent	Étude de simulation WRF à haute résolution sur six grandes villes américaines pour évaluer l'efficacité des toits frais et verts avec une couverture de 25% lors d'un été typique.	Le modèle combiné a donné un résultat validé pour la demande d'électricité et la température de l'air urbain, ce qui indique que le modèle unifié peut être utilisé pour la prédiction.	Étude centrée sur l'efficacité de la végétalisation urbaine dans la modification du microclimat, qui peut être renforcée à l'aide de mesures au sol et de validation.
2020	Jandaghian et Berardi, 2020 Jandaghian et Berardi	Canopée urbaine	Comparaison de différents modèles de canopée urbaine pour les simulations de microclimat dans WRF.	Les modèles à une seule couche (SL-UCM), à dalle de UCM (SB-UCM) et à plusieurs couches (ML-UCM) ont été comparés. Les modèles SL et ML sont de bons prédicteurs de la température de l'air, tandis que le vent et le point de rosée sont généralement sous-estimés.	L'approche holistique suivie en référence aux paramètres de l'UMC nécessite cependant une validation sur le terrain.

### **II.1.2 Les publications les plus citées sur le microclimat :**

Jiajing Li et al. ont réalisé une revue de littérature des publications portant sur le microclimat urbain de 1980 à 2020 en utilisant "Web of Science" comme source de données et les logiciels CiteSpace et VOSviewer comme outils d'analyse. L'objectif était d'examiner les tendances annuelles, les pays de recherche, les institutions de recherche, les auteurs clés, les publications les plus citées, les problématiques importantes et les fronts de recherche. Le tableau II-4 présente les publications les plus citées dans le domaine du microclimat urbain de 1990 à 2020 selon (Li et al., 2022). Le document le plus cité est "Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence", publié dans le journal *LANDSCAPE AND URBAN PLANNING* en 2010 et cité 1038 fois. Cet article rapporte et examine de manière rigoureuse les travaux menés pour évaluer les effets des mesures de verdissement, telles que la création de parcs et la plantation d'arbres, sur la température dans les zones urbaines. Il met en évidence la nécessité d'étudier plus en profondeur l'impact de la quantité, de la répartition et du type de verdure sur la température afin de guider efficacement la planification et la conception des espaces verts en milieu urbain (Bowler et al., 2010) cité par (Li et al., 2022).

Tableau II- 4: Les 20 publications les plus citées basées sur la littérature publiée sur le microclimat urbain. Source : (Li et al., 2022)

N°	Année	Auteur	Journal	Pays/Institut	Sujet	Citations
1	2010	Bowler, D.E. et al.	LANDSCAPE AND URBAN PLANNING	Pays de Galles / Université de Bangor	Verdure	1038
2	1999	Matzarakis, A. et al.	INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY	Allemagne/Université de Fribourg	PET	535
3	1998	Bruse, M.; Fler, H.	ENVIRONMENTAL MODELLING & SOFTWARE	Allemagne/Université de la Ruhr à Bochum	ENVI-met	487
4	2006	Ali-Toudert, F.; Mayer, H.	BUILDING AND ENVIRONMENT	Allemagne/Université de Fribourg	Confort thermique en extérieur	487
5	2008	Alexandria, E.; Jones, P.	BUILDING AND ENVIRONMENT	université de Cardiff	Confort thermique en extérieur	451
6	2012	Ng, E. et al	BUILDING AND ENVIRONMENT	Chine / Université chinoise de Hong Kong	Conception urbaine; Canyon de rue"	401
7	2006	Fisher, J.I. et al	REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	États-Unis / Université Brown	Landsat; Verdure"	350
8	2006	Nikolopoulou, M.; Lykoudis, S.	BUILDING AND ENVIRONMENT	Angleterre/ Université Bath ; Grèce/NatlObserv Athènes	Confort thermique en extérieur	334
9	2003	Dimoudi, A.; Nikolopoulou, M	ENERGY AND BUILDINGS	Grèce/Ctr Source d'énergie renouvelable	Verdure	330
10	2000	Carlson, T.N.; Arthur, S.T	GLOBAL AND PLANETARY CHANGE	États-Unis/Université d'État du Penn	Variables microclimatiques	325
11	2007	Ali-Toudert, F.; Mayer, H.	SOLAR ENERGY	Allemagne/Université de Fribourg	canyon urbain	301
12	2007	Chang, C.R. et al	LANDSCAPE AND URBAN PLANNING	Université de la culture chinoise de Taiwan	Parc urbain	290
13	2013	Lovell, S.T.; Taylor, J.R	LANDSCAPE ECOLOGY	États-Unis/Université de l'Illinois	gestion	275
14	2014	Middel, A. et al	LANDSCAPE AND URBAN PLANNING	États-Unis/Université d'État de l'Arizona ;Allemagne/ Université de Kaiserslautern	forme et conception urbaines	268
15	2006	Johansson, E.	BUILDING AND ENVIRONMENT	Suède/Université de Lund	Confort thermique en extérieur	261
16	2003	Stemmers, K	ENERGY AND BUILDINGS	Angleterre/Université de Cambridge	Demande d'énergie	259
17	2003	Dousset, B.; Gourmelon, F.	ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING	États-Unis/Université de Hawaï ; France/UBO	Paysage urbain ;Microclimat estival	251
18	2007	Jenerette, G.D. et al.	LANDSCAPE ECOLOGY	États-Unis/Université d'État de l'Ohio	Température de surface ; verdure	247
19	2015	Taleghani, M. et al.	BUILDING AND ENVIRONMENT	Pays-Bas/Université de DelftTechnologie	Confort thermique en extérieur	242
20	2011	Matzarakis, A. et al.	INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY	Israël/Université Ben Gourion du Néguev	Verdure ; confort thermique extérieur	240

## II.2 Les études du confort thermique

### II.2.1 Approches de confort thermique

Actuellement, il existe deux approches distinctes pour définir le confort thermique, chacune présente des avantages et des faiblesses (Djongyang et al., 2010). D'une part, il y a l'**approche rationnelle** ou de bilan thermique, qui s'appuie sur des données provenant d'études en chambre climatique et se fonde principalement sur les travaux de Fanger. D'autre part, il y a l'**approche adaptative**, qui utilise des données provenant d'études sur le terrain de personnes dans des bâtiments (Djongyang et al., 2010; Kwok & Rajkovich, 2010).

#### II.2.1.1 L'approche rationnelle ou du bilan thermique

Le bilan thermique est une méthode basée principalement sur les recherches menées par Fanger [10] sur le confort thermique. Pour développer son modèle, Fanger a mené une expérience sur 1296 étudiants qui effectuent des activités identiques et portent les mêmes vêtements mais exposés à des environnements thermiques différents. Ensuite Fanger a développé une équation qui prédit les conditions dans lesquelles les occupants se sentiront thermiquement neutres, c'est-à-dire confortables, sur la base des données de cette expérience. Ce modèle décrit le confort thermique en termes de déséquilibre entre le flux de chaleur réel du corps dans un environnement thermique donné et le flux de chaleur requis pour un confort optimal pour une activité donnée. Le modèle de Fanger se base sur deux théories qui sont l'équilibre thermique et la physiologie de la thermorégulation. Cette méthode est appelée indice "Predicted Mean Vote" (PMV) et est largement utilisée pour la conception et l'évaluation sur le terrain du confort thermique (Djongyang et al., 2010). Le modèle PMV a ensuite été incorporé dans l'indice "Predicted Percentage of Dissatisfied" (PPD). En plus de cette méthode, le modèle à deux nœuds développés par (Stolwijk & Hardy, 1977) est également utilisé pour prédire le confort thermique des occupants des bâtiments (Djongyang et al., 2010).

#### II.2.1.2 Approche adaptative

(Spagnolo & de Dear, 2003) explique l'approche adaptative et la définit comme une approche qui étudie le confort thermique en prenant en compte le comportement, le contexte et les attentes des occupants, ainsi que leur adaptation comportementale, physiologique et psychologique à

l'environnement thermique. En outre, pour évaluer de manière fiable et précise le confort thermique des usagers de l'espace, il est recommandé de réaliser des investigations sur le terrain. Cette approche est utilisée dans la conception de bâtiments, pour évaluer le niveau de confort et la performance énergétique des bâtiments. Elle est également utilisée pour étudier le confort thermique dans les espaces extérieurs dans les hôpitaux. Il ne serait pas approprié de considérer les normes actuelles comme des standards absolus, étant donné que les préférences en matière d'environnement thermique varient en fonction du contexte climatique, social et même individuel (Djongyang et al., 2010). (Zambrano et al., 2006) ont étudié le confort thermique extérieur au niveau de la ville de Rio de Janeiro et ont constaté que l'influence des conditions environnementales sur le confort thermique pouvait être établie, mais que les normes ne correspondent pas toujours aux sensations réelles des occupants. Donc, L'approche adaptative se concentre sur la subjectivité de la sensation et de l'expérience thermique, ainsi que sur les interprétations complexes des occupants vis-à-vis de leur environnement (Djongyang et al., 2010).

En outre, le corps humain s'adapte aux changements de l'activité métabolique ou des conditions environnementales de trois manières différentes (Coccolo et al., 2016; Nikolopoulou & Steemers, 2003): l'adaptation physique, physiologique et psychologique. L'adaptation physique peut être active, comme changer de vêtements, ou réactive, comme ouvrir un parasol. L'adaptation physiologique est liée à l'exposition à certaines conditions climatiques, que ce soit à court ou à long terme. L'adaptation psychologique, qui dépend de la naturalité du climat, des attentes, de l'expérience et contrôle perçu, a un impact majeur sur la sensation thermique. Les expériences et les attentes récentes des individus influencent leur perception de la température. Par exemple, une enquête menée auprès de plus de 10 000 personnes en Europe a révélé que la sensation de neutralité pouvait varier de 10°C entre deux villes en raison des attentes et des expériences thermiques différentes des habitants (Coccolo et al., 2016; Nikolopoulou & Lykoudis, 2006b)

### **II.2.1.3 Les approches de collecte des données**

Les méthodes courantes pour collecter des données sur le confort thermique extérieur sont l'enquête sur le terrain et le test subjectif longitudinal (Lai et al., 2020). L'enquête sur le terrain utilise un questionnaire pour évaluer le confort thermique et surveille le microclimat environnant, mais ne prend pas en compte les influences dynamiques de l'environnement

thermique et les différences individuelles. Le test subjectif longitudinal mesure sur une longue période les perceptions de confort thermique dans des conditions climatiques contrôlées, ce qui permet de vérifier les paramètres environnementaux et personnels. Les tests longitudinaux sont utiles pour enregistrer des paramètres physiologiques des personnes, tels que ceux réalisés par (Cheng et al., 2012) qui ont créé quatre combinaisons différentes de conditions environnementales thermiques extérieures (Lai et al., 2020).

## **II.2.2 Les méthodes d'évaluation du confort thermique extérieur**

### **II.2.2.1 Méthodes d'évaluation à état stable**

Des études ont montré que l'inconfort causé par le froid est lié à la température moyenne de la peau, tandis que l'inconfort causé par la chaleur est dû à l'humidité de la peau qui résulte de la transpiration (L. Chen & Ng, 2012). L'insatisfaction peut être liée à une sensation de chaud ou de froid inadéquate dans une partie spécifique du corps ou dans tout le corps. Les modèles de confort de Fanger et de Gagge et al sont basés sur ces relations et sont précis pour les personnes qui mènent des activités quasi sédentaires et dans des conditions d'état stable (Fanger, 1972). L'indice de vote moyen prédit (PMV), établi par Fanger, est l'un des indices les plus couramment utilisés pour prédire la réponse thermique moyenne d'une grande population de personnes (L. Chen & Ng, 2012; Nagano & Horikoshi, 2011). Le PMV est généralement mesuré sur une échelle de sept points et interprété en utilisant l'indice de pourcentage prédit de mécontentement (PPD). Pour l'analyse du confort thermique en extérieur, le modèle de température équivalente physiologique (PET) est utilisé. D'autres méthodes d'évaluation en état stable comprennent l'Index de stress thermique (ITS), le fuzzy-PMV, le OUT-SET et le modèle de confort thermique extérieur COMFA. Tous ces indices constituent un moyen pour mesurer le confort thermiques dans un environnement thermique local (L. Chen & Ng, 2012).

### **II.2.2.2 Les méthodes d'évaluation non-stationnaires**

Malgré les limites que présentent les méthodes stationnaire mais elles sont couramment utilisées pour évaluer le confort thermique. Contrairement aux méthodes d'évaluation non-dynamiques ou appelées aussi dynamiques qui sont plus appropriées, mais elles sont peu explorées. (Höppe, 2002) affirme que la méthode dynamique est plus fiable et plus pertinente que la méthode stationnaire et l'absence d'indices non-stationnaires internationalement constitue un obstacle majeur pour les études de confort thermique. Les méthodes d'évaluation non-stationnaires

utilisent des mesures continues de variables environnementales. Elle part du principe que la sensation du confort thermique est liée au plusieurs facteurs autres que climatiques, tel que le temps d'exposition aux conditions environnementales et l'activité humaine. Cependant, l'utilisation de ces méthodes pour évaluer le confort thermique extérieur rencontre des difficultés, notamment la nécessité d'une connaissance approfondie en biométéorologie et en physiologie et une surveillance continue de l'utilisateur de l'espace. En effet, des efforts sont en cours pour développer des modèles et des études sur le terrain dans ce domaine actif de recherche sur le confort thermique (L. Chen & Ng, 2012).

### **II.2.2.3 Évaluation du point de vue comportemental**

La notion de confort thermique extérieur est un sujet complexe, puisque il est influencé par divers facteurs. Le facteur principal est les paramètres microclimatiques, qui influent sur la perception thermique et donc sur le confort des usagers de l'espace. Les évaluations du confort devraient prendre en considération le caractère subjectif et dynamique de la sensation thermique, et qui varie en fonction de l'expérience antérieure et de l'état d'esprit des individus et d'autres facteurs psychologiques et sociologiques. Ainsi, pour évaluer de manière efficace la perception du confort thermique extérieur, il est nécessaire d'adopter une approche qui assemble les facteurs physiques, physiologiques, comportementaux, psychologiques et sociaux, en faisant le lien entre la condition microclimatique, les sensations humaines et l'utilisation de l'espace. En outre les aspects dynamiques et subjectifs du confort thermique demandent une observation continue sur le terrain et des entretiens approfondis (L. Chen & Ng, 2012).

### **II.2.3 Les indices du confort thermique**

La prise en compte du confort thermique extérieur dans la phase de conception contribue au développement urbain durable. Le confort thermique constitue un élément crucial pour évaluer la qualité du microclimat. De ce fait, plusieurs modèles ont été développés depuis le XX<sup>e</sup> siècle, en se basant sur les échanges d'énergie entre le corps humain et son environnement thermique, pour évaluer le niveau du confort thermique (Coccolo et al., 2016). Au cours des années 1930, les principes de la thermodynamique ont été appliqués pour la première fois aux échanges d'énergie entre le corps humain et son environnement thermique grâce au modèle à deux nœuds développés par (Gagge, 1936). Les recherches se sont poursuivies avec le développement de l'indice de stress thermique par (Givoni, 1963) et le "Predicted Mean Vote" par Fanger, devenu une norme reconnue pour quantifier le confort humain en intérieur. Dans les années 1980,

l'utilisation de l'outil informatique et le développement de la physique des échanges de chaleur ont participé à l'amélioration de la recherche sur l'environnement thermique humain et la formulation d'indices de confort (Fabbri, 2015). Les différents modèles et indices pour évaluer le confort thermique sont classés en fonction de leur pertinence pour l'étude du confort thermique intérieur ou extérieur (Coccolo et al., 2016).

Le confort thermique extérieur est compliqué à mesurer, contrairement au confort intérieur, à cause de l'instabilité de l'environnement extérieur. Ce dernier est considérablement influencé par plusieurs paramètres et variables environnantes tel que l'exposition solaire et la vitesse du vent. Cette variabilité nécessite l'utilisation des indices basés sur une méthode non stationnaire (Höppe, 2002). (Coccolo et al., 2016) ont examiné les différents modèles de confort thermique extérieur, détaillant leurs caractéristiques physiques et leur pertinence en fonction des objectifs de recherche et du climat. Les modèles extérieurs sont classés selon (Coccolo et al., 2016) en trois catégories distinctes, à savoir « les indices thermiques », « les indices empiriques », et « les indices basés sur des équations linéaires ». Nous résumons ces trois catégories dans la figure ci-dessous :

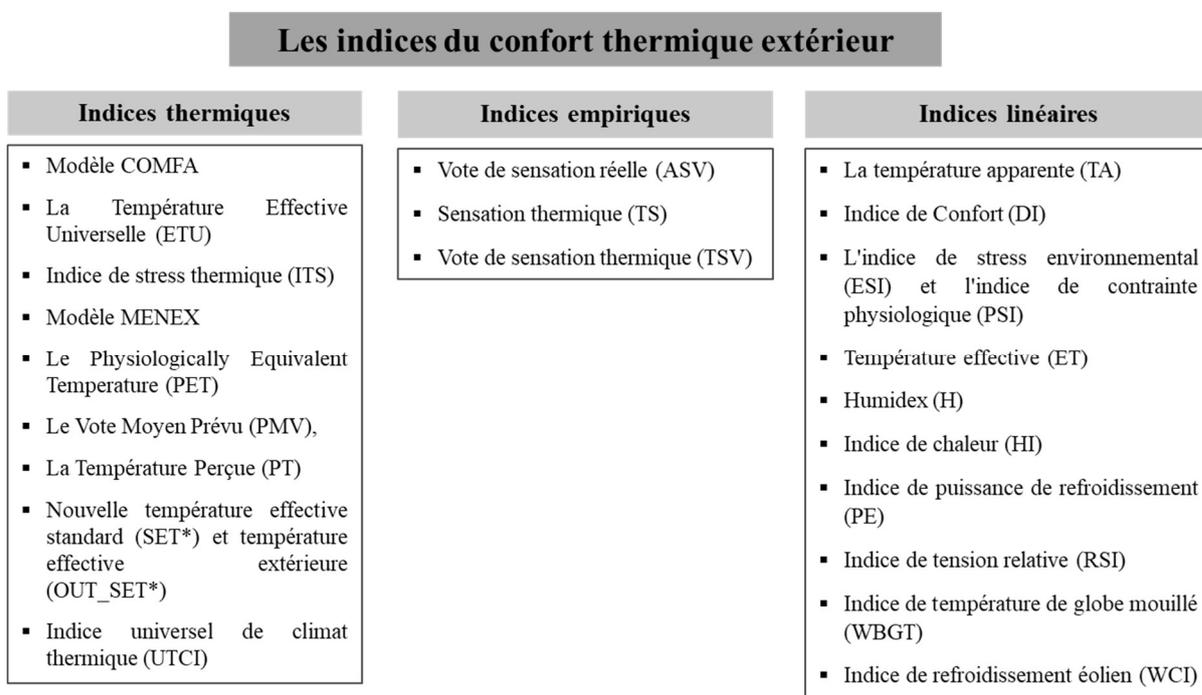


Figure II- 5: les indices du confort thermique extérieur. Source : (Coccolo et al., 2016)

### -Les indices thermiques

Les indices thermiques reposent sur l'évaluation de l'équilibre énergétique du corps humain. Ces indices visent à mesurer la perception thermique des piétons à travers des équations qui

relient un ensemble de paramètres tel que les activités métaboliques, les vêtements et les paramètres climatiques tel que la  $T_{mrt}$ , la  $T_{air}$ , la vitesse du vent, l'humidité...etc. Deux modèles les plus connus de cette catégorie sont le Predicted Mean Vote (PMV) et le Standard Effective Temperature (SET\*), initialement conçus pour les espaces intérieurs, mais adaptés ensuite pour être utilisés en extérieur. Il existe plusieurs indices qui entrent sous cette catégorie et qui ont été développés au fil du temps à savoir : La Température Effective Universelle (ETU) (Nagano et Horikoshi, 2011a), le Modèle COMFA Brown et Gillespie (1995), Indice de stress thermique (ITS) Givoni (1963), Le Physiologically Equivalent Temperature (PET)(Höppe, 1999), l'Indice universel de climat thermique (UTCI) qui a été développé depuis 1999 par un groupe d'experts de différentes disciplines...etc. (Coccolo et al., 2016).

### **-Les indices empiriques**

Les indices empiriques sont établis en se basant sur des études sur terrain à travers les questionnaires et les enquêtes in situ. Ils sont expérimentés et validés pour caractériser le confort thermique d'un endroit ou d'un climat spécifique. Ces indices sont représentés par des modèles de régression linéaire. Selon (Coccolo et al., 2016) Il existe trois indices empiriques : le Vote de sensation réelle (ASV), la Sensation thermique (TS), le Thermal Sensation Vote (TSV)

### **-Indices linéaires**

Cette catégorie d'indices basée sur des équations linéaires qui caractérise le confort en fonction de l'ambiance thermique (humidité relative, Température de l'air et vitesse du vent), sans prendre en considération les autres paramètres du microclimat et le comportement humain. Ces indices sont plus simplifiés par rapport aux indices précédemment cités. Ils sont plus adaptés pour des études à long terme et aux vastes zones d'étude. Parmi ces indices, on trouve : La température apparente (TA) Steadman (1984), Indice de Confort (DI) Thom (1959), Indice de température de globe mouillé (WBGT)...etc. (Coccolo et al., 2016).

## **II.2.4 Les normes et standards du confort thermique adaptatif**

Dans une revue de littérature sur le confort thermique adaptatif, De Dear et al, ont réalisé une enquête sur les normes et les documents de conception relatifs au confort thermique adaptatif

depuis 1998 (de Dear et al., 2020). Ils affirment que « Les modèles de confort thermique adaptatif ont été codifiés pour la première fois dans la norme ASHRAE 55 en 2004 » (de Dear et al., 2020). Ensuite ils ont été intégrés dans d'autres normes telles que EN 15,251, prEN 16,798-1, GB/T 50785 et ISSO 74 afin de répondre aux besoins thermiques réels des occupants des bâtiments. Ces modèles ont été couramment utilisés dans la planification et la gestion de bâtiments et ont été l'objet de plus de 350 publications dans « Scopus ». Les normes de confort adaptatif ont été mises en œuvre dans de nombreuses études de cas pour évaluer l'efficacité des bâtiments et offrir des commentaires constructifs aux architectes et ingénieurs. Le tableau II-5 donne des informations précises sur ces normes de confort adaptatif (de Dear et al., 2020).

Tableau II- 5: Informations de base sur différentes normes de confort thermique adaptatif. Source : (de Dear et al., 2020)

Standard/code	Scope of application and type of building	Applicable building operation mode	Data source	Outdoor reference temperature
ASHRAE 55 (2004 and 2010) [28,31]	Predominantly office buildings.	Occupant-controlled naturally conditioned spaces (No mechanical cooling system is installed, and no heating system is in operation.)	RP-884	Monthly mean outdoor temperature
ASHRAE 55 (2013 and 2017) [1,32]	Not specifically mentioned.	Occupant-controlled naturally conditioned spaces (No mechanical cooling system is installed, and no heating system is in operation.)	RP-884	Prevailing mean outdoor temperature (no fewer than 7 and no more than 30 sequential days horizon)
EN15251 (2007) [26] and prEN 16,798-1 (2015) [29]	Office buildings, residential buildings, conference rooms, auditorium, cafeteria, restaurants, and classrooms. Not specifically mentioned.	Not equipped with mechanical cooling systems (Mechanical ventilation with unconditioned air is allowed.)	SCATs	Running mean external temperature (approximate equation with 7-day horizon)
Dutch ISSO 74 (2004) [30]	Not specifically mentioned.	Alpha space refers to free-running situations in summer with operable windows. Beta space relies on centrally-controlled cooling in summer.	RP-884	Running mean outdoor temperature (approximate equation with 3-day horizon)
Dutch ISSO 74 (2014) [33]	Not specifically mentioned.	Alpha space refers to free-running situations in summer with operable windows. Beta space relies on centrally-controlled cooling in summer.	SCATs	Running mean external temperature (approximate equation with 7-day horizon)
National Building Code of India (2016) [34]	Not specifically mentioned.	Naturally ventilated buildings, mixed-mode buildings, and air conditioned buildings	Field studies in India	30-day outdoor running mean temperature
Chinese GB/T 50,785 (2012) [23]	Not specifically mentioned.	Free running buildings	Field studies in China	Running mean outdoor temperature (7-day horizon)

## II.2.5 Les études menées sur le confort thermique extérieur

Dayi Lai et al ont mené une revue de littérature sur « les études de confort thermique dans l'espace public ouvert ». Ils ont synthétisé les différentes recherches menées dans 107 villes à travers le monde et situées dans des zones climatiques différentes. Le nombre croissant des études menées sur le confort thermique extérieur montre son importance internationale. Toutefois, très peu d'études ont cherché à établir un lien entre les indicateurs physiologiques et le confort thermique en extérieur (Lai et al., 2020).

La répartition des études sur le confort thermique extérieur à travers le monde de 2001 à 2019, a été bien documenté dans une autre revue de littérature conduite par Pardeep Kumar, Amit

Sharma, intitulé « Étude sur l'importance, la procédure et la portée du confort thermique en extérieur » (voir figure II-6) (Kumar & Sharma, 2020).

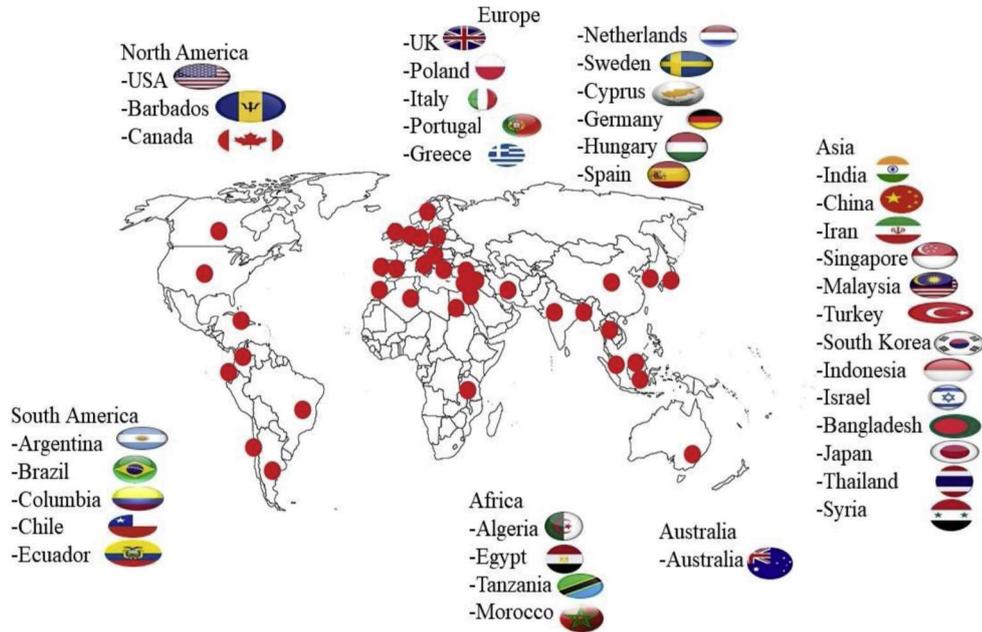


Figure II- 6: La répartition des études sur le confort thermique extérieur. Source : (Kumar & Sharma, 2020)

Ils ont constaté que la plupart des études ont été menées en Asie, avec un total de 68 enquêtes, suivie de l'Europe avec 26 études. En revanche, un nombre limité d'études sur le terrain a été mené en Amérique du Nord, en Amérique du Sud, en Afrique et en Australie, avec seulement 4, 13, 4 et 6 études respectivement. Cependant, d'après la figure II-7, on observe que ces continents présentent un grand potentiel pour analyser le confort thermique extérieur, et pour améliorer la qualité de vie dans les espaces urbains (Kumar & Sharma, 2020).

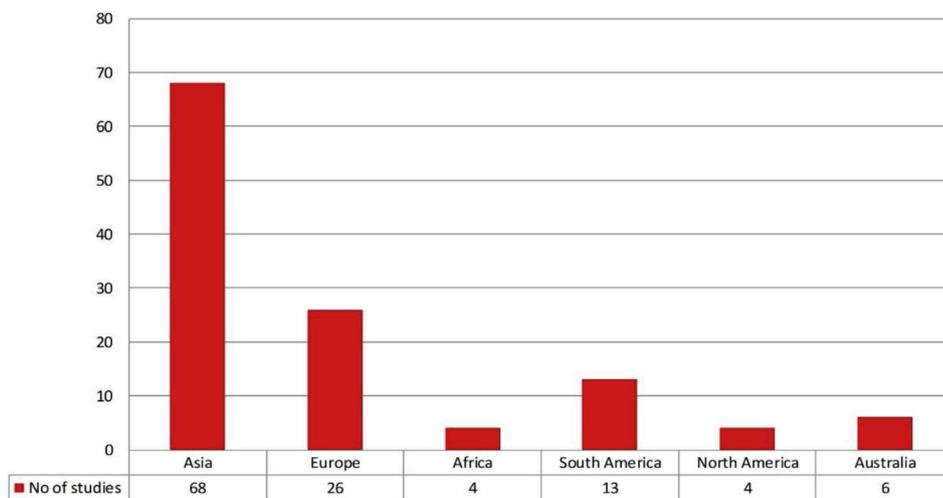


Figure II- 7: Répartition des études microclimatique par continent. Source : (Kumar & Sharma, 2020)

Dissanayake, C., & Weerasinghe, U. G. D. (2021) ont également exploré la littérature qui traite le microclimat et le confort thermique extérieur, disponible dans la base de donnée Scopus. Ils ont pu fixer à l'aide de la cartographie bibliométrique, les auteurs qui ont la plus grande contribution à ce domaine de recherche, où le nombre minimum de citations d'un auteur est limité à 300 (Dissanayake & Weerasinghe, 2021). (tableau II-6).

Tableau II- 6: Les dix auteurs les plus influents classés selon la moyenne normalisée des citations dans le domaine des évaluations du confort thermique extérieur. Source : (Dissanayake & Weerasinghe, 2021)

No. Nombre de	Auteur	documents	Citations totales	Citations normales	Moyenne de publications par an	Moyenne des citations	Moyenne des citations normalisées
1	Alexandri e.	1	434	2.5	2008	517.0	3.3
2	Tenpierik m.	2	326	6.4	2015	163.0	3.2
3	Van den dobbelsteen a.	2	326	6.4	2015	163.0	3.2
4	Chen l.	1	517	3.3	2012	434.0	2.5
5	Teleghani m.	5	471	11.9	2016	94.2	2.4
6	Yuan c.	2	460	4.1	2015	230.0	2.1
7	Johansson e.	8	867	13.9	2013	108.4	1.7
8	Ng e.	3	487	5.0	2015	162.3	1.7
9	Ali-toudert f.	3	974	4.9	2007	324.7	1.6
10	Jones p.	3	621	4.6	2012	207.0	1.5

## II.3 La simulation numérique

### II.3.1 Les applications de la CFD dans les conceptions urbaines et architecturales.

Le développement des outils informatiques a permis l'intégration de la simulation numérique de la dynamique des fluides (CFD) dans la conception architecturale et urbaine grâce à l'utilisation de plug-ins compatibles avec les logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur). Dans une littérature de revue sur « *Application de plug-ins CFD intégrés aux plateformes de conception urbaine et de bâtiments pour des simulations de performance.* », (Hu et al., 2023) ont fait une synthèse comparative des plug-ins CFD dans les logiciels Autodesk Revit, Rhinoceros/Grasshopper et SketchUp. Ils ont classés les applications de ces plug-ins selon trois types: simulations à objectif unique, à objectifs multiples et couplage (Hu et al., 2023). Les simulations à objectif unique ont été utilisées pour étudier la corrélation entre des conditions de microclimat spécifiques et les variables de conception. Les résultats ont montré

que les simulations à objectif unique peuvent aider les architectes à explorer des méthodes et des stratégies d'optimisation pour une seule condition microclimatique ou une pollution locale de l'air. Les simulations multi-objectives se sont principalement concentrées sur les flux d'air, la lumière du jour et le rayonnement solaire, qui affectent le confort thermique et la santé humaine. Différents outils de simulation sont nécessaires pour atteindre différents objectifs, et des stratégies d'optimisation multi-objective efficace ont été développées pour éviter les simulations fastidieuses étape par étape. Les simulations couplées sont utilisées pour évaluer le confort thermique extérieur et la performance énergétique des bâtiments. Ces études ont utilisé différents flux de travail pour combiner les données de microclimat, de vitesse du vent, de température et d'irradiance solaire, en utilisant des plug-ins CFD et des outils de simulation énergétique spécialisés pour quantifier le confort thermique et la demande énergétique totale du bâtiment (Bherwani et al., 2020).

La Figure II-8 présente les relations entre les différentes plates-formes de conception et leurs plug-ins. Le plug-in Autodesk Flow Design (Autodesk, 2018) a été développé pour effectuer des simulations CFD basées sur la plate-forme Revit, qui est le plus utilisé dans l'industrie du bâtiment. Ce plug-in permet aux concepteurs de simuler l'écoulement de l'air de manière rapide, afin de prédire la pression du vent sur les façades des immeubles de grande hauteur (Alhamad et al., 2018; Baghaei Daemei et al., 2019; Hamdan & de Oliveira, 2019; Hu et al., 2023). Les plug-ins CFD MicroFlo et MacroFlo, développé pour SketchUp aident à simuler les flux d'air. MicroFlo se concentre sur les simulations de convection forcée intérieure et extérieure, tandis que MacroFlo est plus capable de simuler la convection naturelle, l'infiltration d'air et la ventilation sous pression thermique à l'intérieur des bâtiments (R. Chen, 2018; Hu et al., 2023; Sharmin & Steemers, 2019).

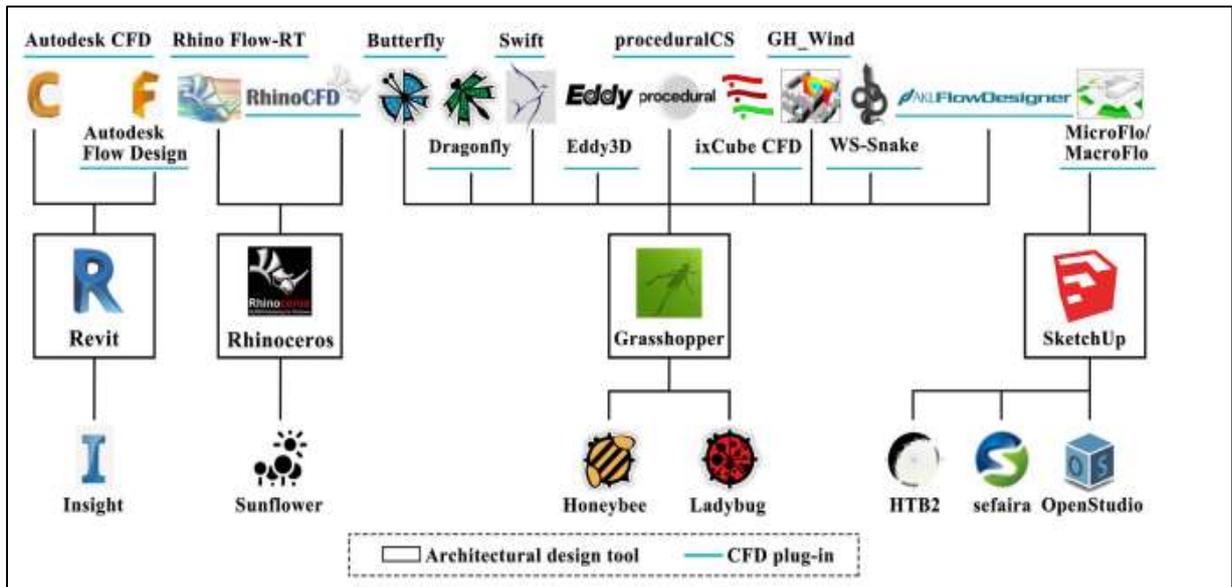


Figure II- 8:Diagramme des plug-ins intégrant des simulations CFD pour les plateformes de conception. Source : (Hu et al., 2023).

### II.3.2 Les logiciels de simulation du microclimat et du confort thermique extérieur :

Une multitude de logiciels ont été développés pour étudier le climat urbain, analyser l'impact de l'urbanisation sur le confort thermique des habitants ainsi que sur la consommation énergétique et la pollution atmosphérique. Dans leur article, (Jänicke et al., 2021) ont effectué une revue de littérature détaillée sur les modèles numériques traitant de la question du climat urbain. Ces modèles ont été classés en trois catégories selon leur échelle spatiale : « les modèles à l'échelle du bâtiment », « les modèles à l'échelle microscopique » et « les modèles à l'échelle de la ville ». Une analyse approfondie a été consacrée aux modèles à l'échelle micro-urbaine simulant le confort thermique extérieur. Pour sélectionner les modèles de microclimat les plus pertinents, (Jänicke et al., 2021) ont préalablement repéré 54 modèles dans 6335 études sur Web of Science et Science Direct, avant de les filtrer selon sept critères. Les modèles doivent être évalués par des pairs dans des articles publiés dans Web of Science et/ou Science Direct, ils doivent simuler et prendre en compte l'environnement bâti à une échelle micro, ils doivent être applicables à l'échelle mondiale, ils doivent simuler le confort thermique extérieur et être conviviaux, avec une disponibilité en téléchargement. Les tableaux II-7 et II-8 présentent les résultats de cette revue de littérature.

## Chapitre II : Etat de l'art et positionnement épistémologique

Tableau II- 7:méthodes utilisées pour identifier, évaluer l'éligibilité des modèles et décider de leur inclusion ou exclusion. Source : (Jänicke et al., 2021)

Nombre	Nom	Inclusion (Y/N)	Nombre	Nom	Inclusion (Y/N)
1	ADMS Temperature and Humidity model	N	28	OpenFOAM mircoscale mode	N
2	Advanced) SkyHelios mode	N	29	OTC Mode	N
3	AKL FlowDesigner	N	30	OutdoorROOM	N
4	ANSYS FLUENT	N	31	PALM	N
5	AUSSSM-Tool	N	32	QUIC EnvSim	N
6	BioCAS	N	33	RayMan	Y
7	CBE Thermal Comfort Tool	N	34	SCORCHIO tool	N
8	City Energy Analyst (CEA)	N	35	Simple Urban Radiation Model (SURM)	N
9	CityBES	N	36	SimStadt	N
10	CityComfort+	N	37	ThermoRender	N
11	CityFeel	N	38	SOLENE Microclimate	N
12	CITYgreen	N	39	SOLWEIG	N
13	CitySim	N	40	SPOTE	N
14	Climate Mapping Tool	N	41	The Surface Temperature And Runoff (STAR) Tools	N
15	COMFA model	N	42	STEVE	N
16	Decision Support System (DSS)	N	43	SUEWS	N
17	Ecotect Win-Air	N	44	SUNtoo	N
18	ENVI-met	Y	45	SVF mapping tool	N
19	FITNAH	N	46	TownScope	Y
20	Green CTTC Model/CTTC mode	N	47	TUF-3D	N
21	Griha LD online model	N	48	UBIKLIM	N
22	INKAS	N	49	UHI Atlas	N
23	Lucy model	N	50	UMEP	Y
24	MeteoInfo	N	51	UMI	N
27	MIMO	N	52	Umsim	N
26	Mitigation Impact Screening Tool (MIST)	N	53	Urban Weather Generato	N
27	MUKLIMO-3 Basis/Thermodynam	N	54	WRF-UCM	N

Tableau II- 8:Matrice d'évaluation des modèles conviviaux. Source : (Jänicke et al., 2021)

No.	Name	Reference	Simulated Variables	Bioclimatic Indices/Variables	Ventilation Aspects	Plants	Supported Data Formats	Linkage (to GIS/CAD)	Pay-/Free-Ware	Example(s) of Evaluation Studies	Number of Publications in Science Direct (Web of Science)	
											Mentioning Model Name	Mentioning Model Name and Urban Climate or Micro-Climature
1	ADMS Temperature and Humidity model	[22]	T <sub>s</sub> , T <sub>a</sub> , Q, T <sub>mrt</sub>	-	X	X	.csv, specific	GIS	Pay	[76]	72 (41)	0 (1)
2	advanced SkyHelios model	[23]	W <sub>s</sub> , W <sub>d</sub> , Q, T <sub>mrt</sub>	PT, UTCI, PET	X	X	grid/vector	GIS/CAD	Free	[23]	0 (1)	1 (5)
3	ANSYS FLUENT	[25]	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , Q, W <sub>s</sub> , W <sub>d</sub> , others	-	X	X	specific formats	CAD	Pay	[77]	1503 (2954)	5 (8)
4	ENVI-met	[39]	T <sub>a</sub> , T <sub>s</sub> , Q, W <sub>s</sub> , W <sub>d</sub> , others	PMV, UTCI, PET, SET	X	X	specific formats, NetCDF-Output possible	CAD/GIS	Pay	Numerous studies (see review by [78])	264 (389)	179 (281)
5	RayMan	[79]	Q, T <sub>mrt</sub> , T <sub>s</sub>	PET, SET, PMV, mPET, UTCI, PT	X	X	.txt, specific formats	GIS	Free	[14,55]	49 (122)	25 (53)
6	SOLWEIG	[61]	Q, T <sub>mrt</sub>	-	X	X	.shp, .txt, .tif	GIS	Free	[61,80,81]	12 (29)	5 (11)
7	TownScope	[67]	Q	Sweat rate, swealevaporation, skin wetness	X	X	specific formats	CAD	Pay	[82,83]	3 (3)	0 (0)
8	Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP)	[71]	T <sub>a</sub> , Q, T <sub>mrt</sub> , T	-	X	X	.shp, .txt, .tif	GIS	Free	see examples for SOLWEIG	2 (2)	1 (1)

### II.3.2.1 Le modèle de température et d'humidité ADMS (ADMS-TH)

Le modèle ADMS-TH a été développé et publié par les consultants en recherche environnementale de Cambridge (CERC). Il est capable de fonctionner à l'échelle de la rue et du bâtiment sur quelques mètres, mais aussi à l'échelle d'une ville entière. Le modèle ADMS-TH peut simuler les effets de refroidissement de la végétation et des changements d'albédo, ce qui le rend un outil efficace pour étudier la variation de température et d'humidité de l'air dans les quartiers et les villes. Toutefois, il nécessite des données d'entrée détaillées et complexes (Jänicke et al., 2021).

### II.3.2.2 Modèle SkyHelios

Le modèle SkyHelios est un outil simple et facile à utiliser qui simule T<sub>mrt</sub>, PT, PET et UTCI. Le modèle de vent tridimensionnel intégré à SkyHelios permet de prédire la vitesse et la direction du vent résolues spatialement pour estimer des indices thermiques à une résolution spatiale élevée et avec un temps de calcul court et des coûts réduits grâce à l'utilisation de frameworks open-source, ainsi qu'une paramétrisation mise à jour en termes de cavité de vent amont et de vortex améliorés dans les canyons de rue. SkyHelios est considéré comme une avancée par rapport au modèle RayMan (Jänicke et al., 2021).

### II.3.2.3 ANSYS FLUENT

ANSYS FLUENT « est un modèle commercial de CFD qui est utilisé depuis des décennies pour modéliser l'écoulement, la turbulence et le transfert de chaleur » [25]. Il a été utilisé dans différents domaines de recherche, notamment pour étudier le phénomène d'îlot de chaleur

urbain, la dispersion de la pollution atmosphérique, et pour simuler les écoulements éoliens urbains et l'effet d'îlot de fraîcheur en couplant avec d'autres outils de simulation. L'interface utilisateur d'ANSYS est adaptée pour les études de microclimat, mais il est important que l'utilisateur ait une connaissance de base du système de modélisation pour l'utiliser de manière efficace (Jänicke et al., 2021).

#### **II.3.2.4 ENVI-Met**

ENVI-met, un modèle tridimensionnel qui simule les interactions surface-végétation-air dans l'environnement urbain. Il est souvent utilisé pour étudier les effets de la végétation, de l'eau, de l'albédo, de la position, du matériau, de l'ombrage, de la transpiration et de la dispersion des polluants dans les décisions de conception urbaine. ENVI-met est un modèle sophistiqué et nécessite une connaissance de base de la modélisation computationnelle et des processus atmosphériques (Jänicke et al., 2021; Simon et al., 2018).

#### **II.3.2.5 RayMan**

Le modèle RayMan calcule les flux de rayonnement et les indices biométéorologiques en prenant en compte les structures complexes. Il suit une approche diagnostique et nécessite des entrées météorologiques limitées. RayMan permet aux utilisateurs de dessiner librement des structures urbaines et offre de nombreuses possibilités en climatologie appliquée pour la recherche et l'éducation. Cependant, il ne permet que la simulation ponctuelle de densités de flux radiants et d'indices d'évaluation thermo physiologiques (Jänicke et al., 2021).

#### **II.3.2.6 SOLWEIG**

« SOLWEIG est un modèle de rayonnement capable de simuler les variations spatiales des flux de rayonnement 3D et de la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ) dans des environnements urbains complexes. » (Jänicke et al., 2021). (Lindberg et al., 2008) ont développé le modèle pour gérer les angles de faible élévation du soleil lors du calcul de  $T_{mrt}$ . Il est utilisé aussi pour étudié l'impact de la géométrie urbaine sur le confort thermique, les variations de  $T_{mrt}$  dans des environnements urbains à forte densité, et l'effet des variations de couverture terrestre sur  $T_{mrt}$ . SOLWEIG offre de nombreuses opportunités pour la recherche et l'éducation en climatologie urbaine. Il demande un nombre limité d'entrées (Jänicke et al., 2021).

### II.3.2.7 TownScope

Le logiciel TownScope utilise des calculs solaires pour évaluer l'accès solaire dans les espaces ouverts urbains, en prenant en compte les espaces et bâtiments environnants ainsi que le site 3D réel. Il combine des instruments visuels avec des évaluateurs numériques dans un système de gestion d'informations urbaines, en mettant l'accent sur le niveau de détail de la conception urbaine. Le logiciel prend également en compte le confort thermique et facilite la comparaison directe de différentes scènes. TownScope est utilisé dans différents projets et fournit un outil visuel et d'analyse pour soutenir le processus de prise de décision en matière de conception urbaine (Jänicke et al., 2021).

### II.3.2.8 UMEP

*« UMEP est un modèle open source auquel les utilisateurs peuvent contribuer pour améliorer et étendre les capacités de modélisation. Il est gratuit à télécharger. Une fonctionnalité importante est la capacité pour l'utilisateur d'interagir avec des informations spatiales pour déterminer les paramètres du modèle. Les données spatiales à travers une gamme d'échelles et de sources sont accessibles via QGIS - une application de système d'information géographique (SIG) libre d'accès, gratuite et multiplateforme - qui fournit des capacités de visualisation, d'édition et d'analyse de données<sup>4</sup>».*

L'Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) peut être utilisé pour effectuer des analyses climatiques à différentes échelles, allant de l'échelle du canyon de rue à celle de la ville entière. Le système est constitué de plusieurs modèles qui offrent aux utilisateurs la possibilité de saisir des données atmosphériques et de surface, de caractériser l'environnement urbain, de simuler différents scénarios, et de visualiser et de comparer diverses combinaisons d'indicateurs climatiques. L'avantage d'UMEP est qu'on peut aborder différentes questions de recherche liées à la conception urbaine sensible au climat avec différents outils simples dans un seul environnement (Jänicke et al., 2021).

---

<sup>4</sup>Lindberg F, Grimmond CSB, A Gabey, L Jarvi, CW Kent, N Krave, T Sun, N Wallenberg, HC Ward (2019) Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) Manual. <https://umep-docs.readthedocs.io/> University of Reading UK, University of Gothenburg Sweden, SIMS China

#### **II.4 Les recherches portant sur l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique extérieur**

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, le microclimat et le confort thermique en milieu urbain sont influencés en grande partie par la morphologie de la ville. Ainsi, de nombreuses recherches ont été menées pour étudier l'impact des paramètres morphologiques sur le microclimat et le confort thermique extérieur. (Lai et al., 2019) ont effectué une revue de littérature sur les "stratégies d'atténuation pour améliorer l'environnement thermique et le confort thermique dans les espaces extérieurs urbains". Ils ont abordé les études menées sur l'impact de la géométrie urbaine sur les paramètres microclimatiques et le confort thermique extérieur. (Lai et al., 2019) ont dressé un tableau (tableau II-9) qui résume les études menées pour évaluer l'impact de diverses stratégies d'atténuation de la température de l'air, notamment le changement de la géométrie des bâtiments, la végétation, la surface et l'eau (Lai et al., 2019).

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons une synthèse des études menées sur l'impact de la morphologie de l'espace public sur le microclimat et le confort thermique extérieur. Ces études ont contribué efficacement à enrichir et à faire progresser la recherche dans ce domaine. Les paramètres morphologiques les plus utilisés par ces études sont le SFV, le rapport H/L et l'orientation.

## Chapitre II : Etat de l'art et positionnement épistémologique

Tableau II- 9: Résumé des études sur les différentes stratégies d'atténuation de la température en été à midi ou dans l'après-midi, à partir de la littérature examinée par (Lai et al., 2019).

stratégie	Auteur, date	Ville	Climat	Méthode	temps	Description	$\Delta T_a$ (K)		
Geometry	<a href="#">Johansson, 2006</a> <a href="#">Kakon et al., 2009</a>	Fès, Maroc Dhaka, Bangladesh	BWh Aw	Mesure Mesure	Juillet. 19, 15:00 p.m. Avril. 18, 14:00 p.m.	H/L = 11 vs. H/W = 1.3 FVC = 0.126 vs. FVC = 0.51	11.0 6.7		
	<a href="#">Johansson and Emmanuel, 2006</a> <a href="#">Chatzidimitriou and Yannas, 2017</a>	Colombo, Sri Lanka Thessalonique, Grèce	Af Bsk	Mesure Simulation, ENVI-met	Mai 3, 14:00 p.m. Juillet0 29, 16:30 p.m.	FVC = 0.49 vs FVC = 0.75 rue NE-50 vs rue NO-SE.	5.0 2.5		
	<a href="#">Shashua-Bar et al., 2012</a> <a href="#">W. Yang et al., 2016</a> <a href="#">Cheung and Jim, 2018a</a> <a href="#">Ali-Toudert et al., 2005</a> <a href="#">Lee et al., 2013</a> <a href="#">Yang et al., 2011</a>	Athènes, Grèce Singapour Hong Kong, Chine. Beni-Isguen, Algérie Freiburg, Allemagne Shanghai, Chine	Csa Af Cwa Csa Cfb Cfa	Simulation, CTTC Mesure Mesure Mesure Mesure Mesure	Juin. 19, 15:00 p.m. Mars. 14:00 p.m. Août. 6, 14:00 p.m. Juin. 23, 14:00 p.m. Juin. 15, 13:00 p.m. Août. 5, 13:00 p.m.	H/O = 0.42 vs. H/W = 0.66 Rues ombragées VS espaces relativement ouverts FVC = 0.004 vs. FVC = 0.452 FVC = 0.09 vs. FVC = 0.67 FVC = 0.2 vs. FVC = 0.65 FVC = 0.11 vs. FVC = 0.6	2.2 2.0 2.0 1.8 1.7 1.0		
	<a href="#">Oliveira et al., 2011</a>	Lisbonne, Portugal	Csa	Mesure	Août. 9, early afternoon	Site ombragé dans le jardin vs. site ensoleillé dans la rue environnante	6.9		
	<a href="#">Song and Wang, 2015</a>	Phoenix, États-Unis	BWh	Simulation, UCM	Juillet. 13–19, 10:30 a.m.	Sous un arbre avec un diamètre de couronne = 1 m vs sans arbre	6.0		
	<a href="#">Shashua-Bar and Hoffman, 2000</a>	Tel-Aviv, Israël	Csa	Mesure	Août. 26–27, 15:00 p.m.	Couverture végétale = 61%, étalement de la couronne = 6-12 m hauteur = 5-8 m vs sans arbre	4.0		
	<a href="#">Skoulika et al., 2014</a>	Athènes, Grèce	Csa	Mesure	Septembre. 2, afternoon	Au sein du parc urbain VS 220 mètres du parc urbain	3.8		
	<a href="#">Potchter et al., 2006</a>	Tel-Aviv, Israël	Csa	Mesure	Juin. 6, 16:00 p.m.	Un parc urbain VS aux zones environnantes	3.5		
	<a href="#">Shashua-Bar et al., 2010</a>	Tel-Aviv, Israël	Csa	Simulation, CTTC	Juillet. 15:00 p.m.	rue (H/L = 0,6) avec 90% d'arbres VS à une rue sans arbres	3.4		
	<a href="#">Skelhorn et al., 2014</a>	Manchester, Royaume-Uni.	Cfb	Simulation, ENVI-met	Juillet. 19, 15:00 p.m.	Ajout de 5 % d'arbres matures VS au scénario actuel	2.9		
	Vegetation	<a href="#">Wang and Akbari, 2014</a>	Montréal, Canada	Dfb	Simulation, ENVI-met	Juillet. 23, 12:00 p.m.	Couverture végétale = 44,3% vs. couverture végétale = 3,4%	2.8	
		<a href="#">Cheung and Jim, 2018a</a>	Hong Kong, Chine	Cwa	Mesure	Août. 6, 14:00 p.m.	Sous un grand arbre (H = 9,7 m, diamètre de la couronne = 14,0 m) vs. pelouse exposée	2.4	
		<a href="#">de Abreu-Harbach et al., 2015</a> <a href="#">Wong and Jusuf, 2010</a> <a href="#">Ng et al., 2012</a>	Campinas, Brésil Singapour Hong-Kong, Chine	Cfa Af Cwa	Mesure Mesure Simulation, ENVI-met	Une journée estivale typique, 11:00 a.m. Août. 6, 16:00 p.m. Une journée estivale typique, 11:00 a.m.	Sous un regroupement d'arbres VS au soleil. Un canyon (H/L = 1,3) recouvert d'arbres matures VS à un toit de référence. Couverture végétale = 56% vs. aucune couverture	2.0 1.8 1.8	
		<a href="#">Shashua-Bar et al., 2012</a>	Athènes, Grèce	Csa	Simulation, CTTC	Juin. 19, 15:00 p.m.	Couverture végétale = 50 % vs. couverture végétale = 7,8 %	1.8	
		<a href="#">Lee et al., 2013</a>	Freiburg, Allemagne	Cfb	Mesure	Juillet. 24, 14:00 p.m.	SVF = 0,06 (à l'ombre des arbres) vs SVF = 0,70	1.7	
		<a href="#">Spangenberg et al., 2008</a>	São Paulo, Brésil	Cfb	Simulation, ENVI-met	Decembre. 19, 15:00 p.m.	Sous la canopée des arbres VS à l'absence de végétation	1.5	
		<a href="#">Wang et al., 2015b</a> <a href="#">Tan et al., 2016</a> <a href="#">Salata et al., 2017</a>	Assen, Pays-Bas Hong-Kong, Chine Rome, Italie	Cfb Cfa Csa	Mesure Simulation, ENVI-met Simulation, ENVI-met	Mai 28th Juillet. 13:00 p.m. Juillet. 18, 13:00 p.m.	Bosquet VS à un espace ouvert FVC = 0,8, étalement de la couronne des arbres = 10-12 m, hauteur = 18 VS à l'absence de verdure. Couverture végétale = 14,23% par rapport à une couverture végétale = 5,35%.	1.5 1.5 1.3	
		<a href="#">Wang et al., 2016</a> <a href="#">Salata et al., 2015</a> <a href="#">Duarte et al., 2015</a>	Toronto, Canada Rome, Italie. São Paulo, Brésil	Dfb Csa Cfb	Simulation, ENVI-met Simulation, ENVI-met Simulation, ENVI-met	Juillet. 15, 16:00 p.m. Août. 7, 14:00 p.m. Février. 6, 15:00 p.m.	Conception de base VS à l'ajout de 10% de végétation. Sous un arbre VS à un sol nu. Sous des arbres de rue VS à une zone ouverte.	0.8 0.7 0.6	
		<a href="#">Fintikakis et al., 2011</a> <a href="#">Tan and Fwa, 1992</a>	Tirana, Albanie Singapour	Csa Af	Simulation, PHOENICS, Standard k-e Measurement	Un après-midi de septembre. Octobre. 18, 15:00 p.m.	Pavé en béton avec peinture réfléchissante, albédo = 0,65 par rapport à l'asphalte noir, albédo = 0,4. Béton, albédo = VS l'asphalte, albédo = 0,13	3.0 2.1	
		Surface	<a href="#">Gaitani et al., 2011</a>	Athènes, Grèce	Csa	Simulation, PHOENICS, Standard k-e	Une journée estivale typique, 14:00 p.m.	asphalte noir, albédo = 0,3 VS l'asphalte avec un revêtement photocatalytique.	2.0
<a href="#">Santamouris et al., 2012</a>			Athènes, Grèce	Csa	Simulation, PHOENICS, Standard k-e	Une journée estivale typique, 14:00 p.m.	Peinture réfléchissante, albédo = 0,6 VS un revêtement sombre.	1.9	
<a href="#">Salata et al., 2015</a> <a href="#">Salata et al., 2017</a>			Rome, Italie. Rome, Italie.	Csa Csa	Simulation, ENVI-met Simulation, ENVI-met	Août. 7, 14:00 p.m. Juillet. 18, 13:00 p.m.	Albédo VS cas de base. Pavé en béton avec un albédo plus VS pavé en asphalte.	1.6 1.5	
<a href="#">Yang et al., 2011</a> <a href="#">Xi et al., 2012</a> <a href="#">Nishimura et al., 1998</a>			Shanghai, Chine Guangzhou, Chine Ville d'Osaka, Japon	Cfa Cfa Cfa	Mesure Mesure Mesure	Août. 5, 13:00 p.m. Juillet 4, 14:30 p.m. Juillet, 12:00–15:00	Albédo = VS à albédo = 0,14. Bord du lac VS l'environnement en béton. Près d'un étang VS dans un parc	0.7 2.0 2.0	
Water			<a href="#">Xu et al., 2010</a> <a href="#">Zhao and Fong, 2017</a> <a href="#">Saaroni and Ziv, 2003</a>	Shanghai, Chine Hong-Kong, Chine Tel Aviv, Israël	Cfa Cwa Csa	Mesure Simulation, ENVI-met Measurement	juillet et Les après-midis de août. Une journée estivale typique. 15:00 p.m. Mai 17, 12:10 p.m.	Près d'un plan d'eau VS 20 mètres de distance du plan d'eau. Taux de couverture par les plans d'eau = 56% VS un paysage de pavage en béton. À l'abri d'un étang par rapport au vent venant de l'étang.	1.8 1.5 1.5

#### II.4.1 Etude de Ali-Toudert (2005) : « Confort thermique extérieur dans l'ancienne ville désertique de Beni-Isguen, en Algérie »

L'étude d'Ali-Toudert (2005) explore le confort thermique extérieur dans la vieille ville désertique de Beni-Isguen (figure II-9), qui se caractérise par un climat chaud et sec. L'étude se concentre sur l'efficacité des formes de conception traditionnelles dans l'amélioration du confort thermique extérieur. L'étude s'intéressait en particulier à la géométrie des canyons urbains. Les résultats montrent que le stress thermique est très élevé dans les endroits ouverts, tandis que les endroits couverts sont plus confortables pendant la journée. De plus les rues profondes avec des matériaux adaptés atténuent le stress thermique. Les résultats montrent aussi que la température surfacique des murs hauts et lourds est plus basse car ils stockent la chaleur journalière et fournissent plus d'ombre (Ali-Toudert et al., 2005).

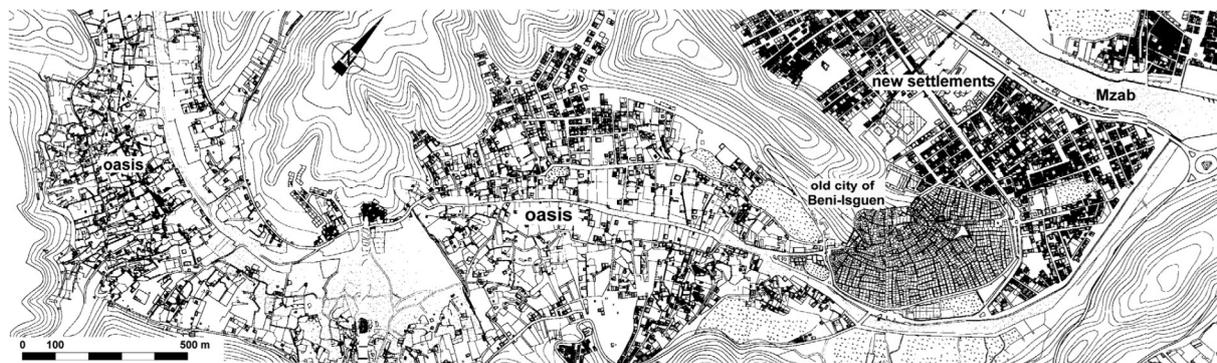


Figure II- 9:La vieille ville de Beni-Isguen et son oasis dans la vallée du M'zab, Algérie. Source : (Ali-Toudert et al., 2005)

##### II.4.1.1 Méthode adoptée

L'étude s'est basée principalement sur les mesures in situ, mais les aspects subjectifs qui peuvent affecter la sensation thermique réelle des personnes n'ont pas été traités. Les mesures des paramètres climatiques ont été effectuées sur deux journées en 2003 avec des conditions estivales typiques. Les mesures comprennent la température de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse du vent et la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ). La méthode de mesure de  $T_{mrt}$  utilisée est différente de celle couramment utilisée (L'utilisation d'un thermomètre à globe) car elle est plus précise en extérieur.  $T_{mrt}$  a été déterminé selon en fonction des densités de flux de rayonnement à ondes courtes et à ondes longues provenant de six directions environnantes et de facteurs d'angle représentant les parties de l'environnement dans chaque direction vue par un corps humain Höpfe (1992) et VDI (1998). Une fois que ces mesures sont connues, un indice thermique peut être calculé pour l'utilisation en extérieur, comme PET,

OUT-SET\* ou PMV\*. Cette étude utilise PET, basée sur le modèle de bilan énergétique humain (Ali-Toudert et al., 2005).

Les points de mesure ont été sélectionnés dans 8 endroits différents de la vieille ville de Beni-Isguen, en fonction des objectifs de l'étude. Ces endroits présentent des orientations et des ratios d'aspect différents. Les points de mesure ont été placés le long d'un itinéraire descendant, avec le point de départ étant le plus élevé. La ville est divisée en deux parties, avec la partie supérieure composée de petites maisons irrégulières et la partie inférieure avec des rues et des maisons plus régulières. Les rues sont étroites avec des ratios d'aspect élevés et des matériaux de construction lourds en pierre. Des mesures météorologiques ont été effectuées à chaque point de mesure, à partir du Point 1 de 6h00 du matin jusqu'à minuit, avec des intervalles de temps d'environ 3 heures entre chaque mesure. Le tableau II-10 présente les propriétés géométriques et matérielles de tous les points de mesure (Ali-Toudert et al., 2005).

Tableau II- 10: Propriétés géométriques et matérielles de tous les points de mesure dans la ville de Beni-Isguen, vallée du M'zab. Source : (Ali-Toudert et al., 2005).

Points	Street width W (m)	Aspect ratio H/W	SVF	Orientation (angle from N)	Ground albedo	Ground material
1	2.5	H1/W = 1.5; H2/W = 0.6	0.45	NE-SW; 45°	0.15	concrete
2	1.4	H1/W = 7.5; H2/W = 4.7	0.11	N-S; 166°	0.15	stone + concrete
3	2.1	H1/W = 3.5; H2/W = 3.8	0.13	NEE-SWW; 63°	0.15	concrete
4	1.5	H1/W = 1.4; covered	0.03	NW-SE; 130°	0.15	concrete
5	2.1	H1/W = 4.6; H2/W = 3.8	0.16	NE-SW; 50°	0.20	stone + concrete
6	2.4	H1/W = 3.1; H2/W = 3.5	0.14	NW-SE; 122°	0.15	concrete
7	1.7	H1/W = 4.3; H2/W = 4.3	0.09	NW-SE; 125°	0.15	concrete
8	Market place	H1/W = 0.1; H2/W = 0.1	0.67	-	0.25	stone

#### II.4.1.2 Résultats

Cette étude montre qu'un emplacement non ombragé à une latitude subtropicale peut entraîner un fort inconfort thermique pendant la période estivale. L'ombrage des surfaces urbaines environnantes et de l'utilisateur de l'espace est crucial pour atténuer le stress thermique extérieur. Les ratios (H/L) élevés sont efficaces pour réduire l'exposition à l'énergie solaire, mais peuvent ralentir le refroidissement nocturne du tissu urbain. Les matériaux épais et lourds avec une capacité thermique élevée peuvent aider à diminuer la chaleur rayonnante de longue longueur d'onde pendant la journée et minimiser les différences entre les rues de différentes géométries et orientations. Les rues couvertes ont les valeurs PET les plus basses et sont utiles comme passages piétons. Les résultats montrent également que la température de l'air était modérément

plus basse dans les canyons urbains par rapport à un endroit ouvert. Cette investigation met en évidence que la température de l'air est un indicateur secondaire du confort en extérieur, car elle est peu influencée par la géométrie urbaine (Ali-Toudert et al., 2005).

#### **II.4.2 Etude de Shashua-Bar (2012) : « Options de conception de refroidissement passif pour améliorer le confort thermique dans les rues urbaines d'un climat méditerranéen (Athènes) par temps chaud en été ».**

Cette étude se concentre sur la façon dont la conception urbaine peut réduire la température de l'air et améliorer les conditions thermiques pour les piétons en été. Une rue d'Athènes a été choisie comme étude de cas en raison de son faible ratio hauteur/largeur, la forte circulation automobile. Différentes variables urbaines ont été étudiées, telles que le ratio de la surface couverte par la canopée des arbres, la charge de trafic, l'albédo des surfaces des murs et H/L. Les résultats montrent que les scénarios de conception avec une couverture arborée plus importante ont le plus grand impact sur la réduction de la température de l'air et l'amélioration des conditions thermiques pour les piétons (Shashua-Bar et al., 2012).

##### **II.4.2.1 Méthode adoptée**

Cette étude utilise le modèle microclimatique « Green-CTTC » et l'indice de température équivalente physiologique (PET) pour évaluer le niveau de confort thermique. Le jour choisi pour mener l'enquête est relativement chaud, avec une température de l'air atteignant 36,5 °C à midi (Shashua-Bar et al., 2012).

Le modèle Green-CTTC est une version améliorée du modèle analytique CTTC, qui utilise une constante de temps thermique pour prédire les fluctuations de température de l'air dans la couche de la canopée urbaine. À l'origine, le modèle CTTC a été développé par Swaid et Hoffman (Shashua-Bar et al., 2012; Swaid & Hoffman, 1990).

Une approche expérimentale a été adoptée aussi dans cette étude, en surveillant plusieurs rues bordées d'arbres situées dans la banlieue nord d'Athènes.

##### **II.4.2.2 Résultats**

Les résultats de cette étude montrent que l'effet des arbres est considéré comme le facteur dominant qui améliore le confort, suivi de du rapport H/L et de la modification de l'albédo.

L'étude montre qu'une augmentation de la couverture végétale de la rue de 8% à 50% entraîne une diminution de la valeur de MRT de 13,6 °C et une diminution de la valeur de PET d'environ 8,3 °C à midi, principalement en raison de l'ombrage supplémentaire. Les résultats de l'étude sont comparés à d'autres études similaires, qui ont également trouvé des effets bénéfiques de la végétation sur le confort thermique dans les rues urbaines (Shashua-Bar et al., 2012).

En outre les scénarios avec un rapport hauteur/largeur (H/L) plus élevé offrent des conditions plus confortables. Cependant, cela peut avoir un effet négatif pendant la nuit. Les résultats montrent également que l'effet du changement de l'albédo du sol de la rue peut avoir un effet plus important que changement d'albédo des murs. L'accent est mis sur les solutions et les options réalisables pour améliorer le confort thermique dans les espaces urbains (Shashua-Bar et al., 2012).

#### **II.4.3 Etude de Salata (2016): “ Confort thermique extérieur dans la région méditerranéenne. Une étude transversale à Rome, en Italie »**

L'étude de (Salata et al., 2016) traite le confort thermique extérieur dans la région méditerranéenne, en se basant sur une enquête de terrain transversale menée à Rome pendant une année entière. Plus de 1000 questionnaires ont été remplis et combinés à des mesures micro météorologiques pour évaluer la perception thermique et les préférences des interviewés. Des lignes de régression ont été obtenues pour déterminer les valeurs de PET neutres et les préférences thermiques, montrant l'influence de l'adaptation thermique. Une plage de confort de PET de 21,1 à 29,2 °C a été obtenue, et deux indices ont été déterminés pour prédire les qualités thermiques d'un environnement dans la région méditerranéenne (Salata et al., 2016).

##### **II.4.3.1 Méthode adoptée**

Cette étude a utilisé trois méthodes complémentaires pour aboutir aux résultats et objectifs ciblés ; (1) Collecte des données sur le terrain ; (2) Mesures micro météorologiques ; (3) questionnaire (Salata et al., 2016)

L'étude a duré un an, couvrant toutes les saisons, et a été menée sur un seul site en examinant la perception et la préférence thermique des individus. Les données ont été collectées auprès de 941 participants, en utilisant des mesures micro météorologiques de variables telles que la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et la radiation globale, ainsi qu'un questionnaire pour évaluer la perception et la préférence thermique. Les réponses ont été

confrontées à la température équivalente physiologique (PET) et au vote moyen prédit (PMV) pour évaluer la perception thermique et prédire le nombre de personnes insatisfaites thermiquement. L'étude a également ajusté l'isolation vestimentaire en fonction de l'activité physique des usagers et a exclu les femmes enceintes et les usagers ayant une durée de résidence inférieure à 6 mois (Salata et al., 2016).

#### **II.4.3.2 Résultats**

Cette étude a utilisé des données collectées pour déterminer les valeurs de confort thermique neutre et préférée pour la population méditerranéenne en utilisant les votes moyens de sensation thermique (MTSV) et le modèle de courbe logistique avec la fonction probit. Ils ont également défini une plage de confort thermique optimale pour les (PET) et ont développé un indice empirique de confort thermique extérieur méditerranéen (MOCI) pour prédire le confort thermique d'un grand groupe de personnes en utilisant la température moyenne rayonnante, la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et l'isolation vestimentaire. Les résultats de l'étude peuvent aider les professionnels de l'architecture, de l'ingénierie, de la conception et de l'urbanisme à évaluer le comportement thermique extérieurs dans la région méditerranéenne. Les résultats peuvent également aider dans le choix des matériaux pour la planification de nouveaux espaces publics et la rénovation de sites urbains (Salata et al., 2016).

#### **II.4.4 Etude de Chatzidimitriou (2017): « Conception des canyons de rue et potentiel d'amélioration pour les espaces urbains ouverts »**

Cette étude propose des résultats empiriques et analytiques montrant les améliorations possibles de la conception urbaine en utilisant des mesures environnementales et des simulations numérique de microclimat. Les résultats propose les formes de canyon les plus favorables pour le confort thermique extérieur et soulignent l'importance d'intégrer les paramètres climatiques de base dans la conception urbaine (Chatzidimitriou & Yannas, 2017). Les études ont été menées dans 18 canyons de rue à Thessalonique, en Grèce (figure II-10).



Figure II- 10:a. Points de surveillance dans le centre-ville de Thessalonique (lat. 40,5°N) et b. Facteurs de vue du ciel calculés avec envi\_met. Source : (Chatzidimitriou & Yannas, 2017)

#### II.4.4.1 Méthode adoptée

Cette étude a utilisé les mesures in-situ et la simulation numérique. Les mesures des paramètres climatiques ont été effectuées dans dix-huit canyons de rues de la ville de Thessalonique en été et en hiver. Le choix des rues était en fonction de leur orientation par rapport à la côte et aux vents hivernaux dominants, ainsi que de leur rapport d'aspect H/L. Les canyons ont été répartis en quatre groupes en fonction de leur rapport d'aspect. Les mesures ont été prises à des endroits précis dans les canyons (Chatzidimitriou & Yannas, 2017).

Les paramètres mesurés sont la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, la température du globe et la température surfacique. Les relevés ont été effectués toutes les 15 minutes pendant une heure ou deux heures chaque jour, entre 9h00 et 18h00 en été et entre 9h00 et 16h00 en hiver. Les mesures ont été prises à l'aide de divers instruments tels que des thermistances, des capteurs de capacité, un thermomètre à infrarouge et un anémomètre portatif. Ensuite, les données météorologiques étaient utilisées pour calculer la température radiante moyenne ( $T_{mrt}$ ) et les indices de confort thermique (PET et UTCI) à l'aide du logiciel RayMan (Chatzidimitriou & Yannas, 2017).

Enfin, le logiciel ENVI-met a été utilisé pour simuler la zone d'étude et comparer les résultats de la simulation aux données mesurées. Des simulations ont également été réalisées pour évaluer les effets des paramètres géométriques de l'orientation du rapport H/L sur

l'environnement thermique. Douze canyons simplifiés ont été modélisés avec différentes orientations d'axe et rapports H/L (Chatzidimitriou & Yannas, 2017).

#### II.4.4.2 Résultats

Les résultats de cette étude montrent l'impact de l'orientation et le rapport hauteur/largeur du canyon ainsi que l'impact des arbres et les matériaux de revêtement des trottoirs sur le microclimat et le confort thermique extérieur.

Concernant l'orientation, et pour canyons de taille moyenne et de profondeur moyenne Les résultats montrent que l'orientation de l'axe NW-SE est plus favorable en été tandis que l'orientation NE-SW est plus favorable en hiver pour les. Les canyons NW-SE offrent des conditions les plus confortables en été et en hiver, tandis que les canyons NW-SE (côté SW) sont les plus confortables en été. Les canyons E-O sont les plus confortables en été pour les canyons très profonds, tandis que les canyons NWSE sont les plus confortables en hiver.

A propos du rapport H/L, les résultats ont montré que les canyons profonds et ombragés étaient les plus confortables en été, tandis qu'en hiver, les canyons moyennement larges étaient les plus confortables.

#### II.5 Choix de la méthode d'investigation

Cette recherche étudie l'impact de la morphologie de l'espace public sur le microclimat et le confort thermique extérieur. Nous avons choisi la place publique comme sujet de recherche. Cinq places avec des morphologies différentes ont été sélectionnées. L'étude a été menée dans la ville d'Annaba. Nous avons adopté une méthodologie basée principalement sur une **approche objective ou quantitative** composée de deux méthodes : **les mesures sur terrain** et la **simulation numérique**.

Des campagnes de mesures in situ étaient fixées pour la prise des paramètres climatiques tel que la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative. L'outil utilisé dans cette étude est l'appareil 'Testo 480'.

**La méthode de simulation numérique, en utilisant le logiciel Envi-met V5.0.2.** L'objectif de cette méthode est de comparer entre les espaces étudiés et la modélisation des scénarios d'amélioration du confort pour évaluer l'impact des paramètres morphologiques sur le

microclimat et le confort thermique extérieur. Elle permet aussi de valider le modèle Envi-met et vérifier son exactitude par la création des lignes de régression et le calcul du coefficient de corrélation linière, comparant les résultats de terrain avec ceux de la simulation.

Les deux méthodes sont développées avec plus de détails dans les chapitres 3 et 4. La méthode de mesure est expliquée dans le chapitre "Présentation du cas d'étude et investigation", tandis que la méthode de simulation est abordée dans le chapitre "Simulation numérique".

La méthodologie adoptée est synthétisée dans la figure II-11

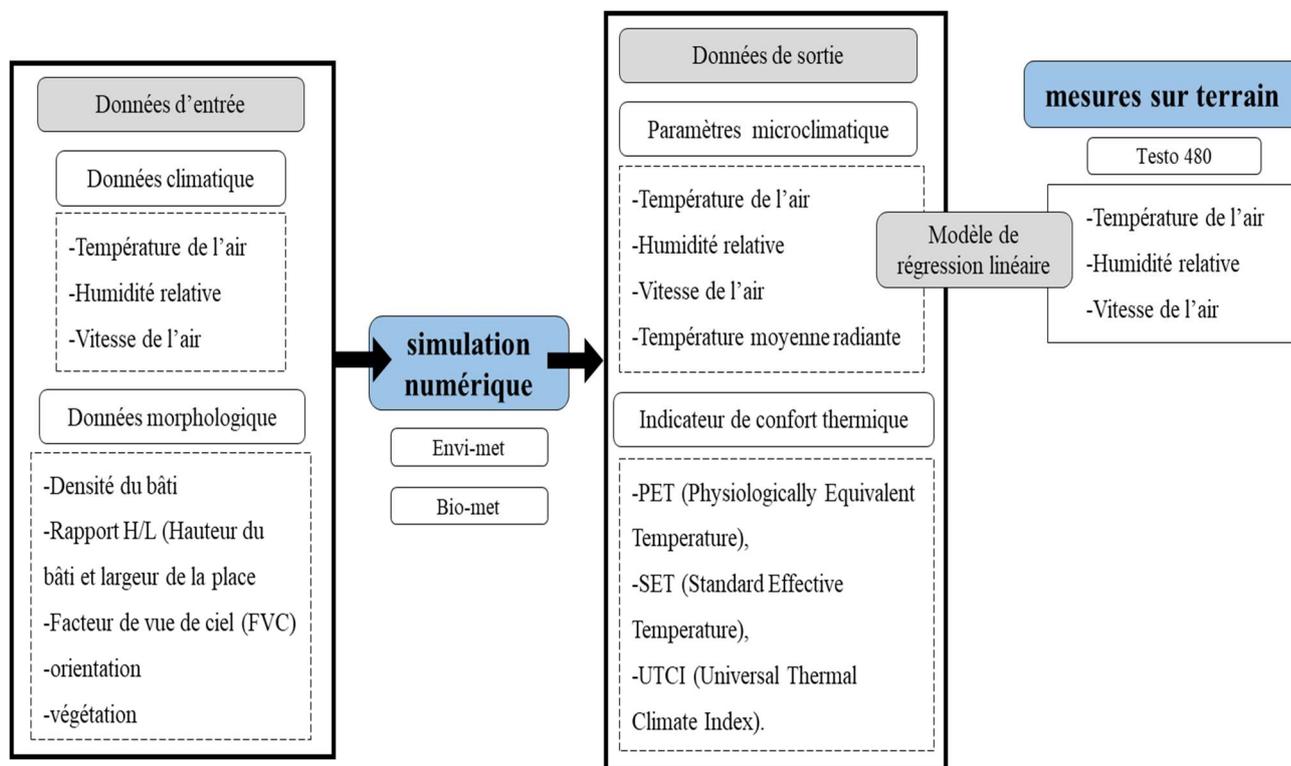


Figure II- 11: synthèse de la méthodologie adoptée. Source : auteur

### Conclusion :

Ce chapitre constituait une initiation à la partie pratique de cette thèse. Une synthèse a été fournie, des différentes méthodes et outils utilisés pour évaluer l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat et le confort thermique dans le milieu urbain extérieur. L'objectif était de définir la méthode adéquate pour ce travail, afin de répondre à nos objectifs de recherche.

Le chapitre était structuré en cinq parties : La première partie destinée aux études microclimatiques et ses différentes méthodes et approches. La deuxième partie était consacrée aux études du confort thermique extérieur, ses approches, et les indices utilisés pour l'évaluer. La troisième partie portait sur les outils numériques et les différents modèles de simulation microclimatique. Une quatrième partie analyse des exemples d'expériences menées dans le même contexte climatique (climat méditerranéen). Dans cette partie, on a défini les méthodes adoptées et les résultats obtenue. Une dernière partie dans laquelle nous avons présenté notre choix de la méthode et outils utilisées.

Les résultats montrent que les études du microclimat urbain ont connues une évolution importante aux cours des années. Plusieurs méthodes ont été développées, à savoir ; La télédétection et les évaluations basées sur les systèmes d'information géographique (SIG), les méthodes expérimentales (mesures sur site) et les méthodes numériques. L'évaluation du confort thermique extérieur a connu aussi un progrès notable. En effet plusieurs approches d'étude di confort thermique existent dans la littérature, à savoir : l'approche rationnelle ou de bilan thermique, l'approche adaptative et les approches de collecte des données. Et différentes méthodes d'évaluation du confort thermique extérieur ont été développées : les Méthodes d'évaluation à état stable, les méthodes d'évaluation non-stationnaires et l'évaluation du point de vue comportemental. En outre l'outil informatique a été largement utilisé dans ce domaine.

Par conséquent, le choix de la méthode de recherche a été effectué en se basant sur des exemples qui portaient sur des objectifs de recherche similaires aux nôtres. Dans cette étude, nous adaptons méthodologie basée principalement sur une approche objective ou appelé aussi quantitative composée de deux méthodes : les mesures sur terrain et la simulation numérique.

# Partie pratique

# **Chapitre III : présentation et investigation du cas d'étude**

### **Introduction :**

Ce chapitre est destiné à la présentation du cas d'étude et aux mesures in situ. Notre recherche vise à l'évaluation de l'impact de la morphologie de l'espace public sur le microclimat et le confort thermique extérieur pendant la période de surchauffe, dans la ville d'Annaba, une ville côtière qui se caractérise par un climat méditerranéen avec un été chaud et sec et un hiver doux et relativement humide.

Il s'agit en premier temps de présenter le contexte d'étude, nous présentons la ville d'Annaba, sa situation géographique, sa topographie et son urbanisme. Nous effectuons aussi une analyse climatique de la ville en déterminant l'isotherme de la région et la période de surchauffe. Ensuite, nous justifions le choix des espaces étudiés tout en présentant ses caractéristiques morphologiques et urbaines. Ces espaces sont des places publiques ayant des formes distinguées : La place du cours de la révolution avec une forme longitudinale situé dans un tissu colonial d'une trame orthogonale. La placette de la vieille ville d'une forme carrée située dans un tissu médiéval dense. La placette Alexis Lambert. La place du cours El-Bouni d'une forme longitudinale et la placette El-Bouni d'une forme carrée, situées dans un tissu dilué avec une faible densité.

Enfin, nous expliquons la méthode et les outils de mesure utilisés dans cette recherche. En plus, nous présentons les résultats de mesure et nous comparons entre les paramètres climatiques enregistrés au niveau des espaces étudiés, ensuite entre ces mesures et les données de la station météorologique.

### **III.1 Présentation de la ville d'Annaba :**

Annaba 4<sup>e</sup> ville de l'Algérie après Alger, Oran et Constantine. Le SNAT (Schéma National d'Aménagement du Territoire) la considère comme une métropole méditerranéenne de l'avenir, du fait de sa croissance démographique et sa dynamique économique importante (SNAT). C'est une agglomération portuaire à vocation industrielle. Son territoire a connu un développement rapide et une implantation industrielle massive, ce qui a entraîné son éclatement, organisant ainsi son passage d'une simple ville aux limites de 15km<sup>2</sup> en 1970 vers une agglomération de plus de 20 Km<sup>2</sup> (PDAU 2008). La ville d'Annaba abrite plus de 250 000 habitants et anime un territoire wilaya regroupant près de 610 000 habitants (ONS, 2008) (Kebir & Zeghiche, 2014)

### III.1.1 Situation :

La wilaya d'Annaba est située au Nord-Est du pays faisant face à la mer sur une bande littorale de plus de 16 kms. Son territoire wilayal couvre une superficie de 1 412 km<sup>2</sup>. Elle est délimitée comme suit :

- Au Nord : par la mer méditerranéenne,
- Au sud : par la wilaya de Guelma,
- A l'Est : par la wilaya d'El Tarf,
- A l'Ouest : par la wilaya de Skikda.

Selon la composition du réseau urbain établie par l'office National des Statistiques en 2008, l'agglomération d'Annaba est située à la limite nord-est de la wilaya, elle regroupe les deux communes : Annaba et El-Bouni. Elle est ouverte à l'est par une baie sur le golfe d'Annaba, limitée à l'ouest par le massif montagneux de l'Edough et ouverte au sud aux plaines agricoles. La limite de l'agglomération d'Annaba, comme établie par l'ONS est représentée dans la figure III-1

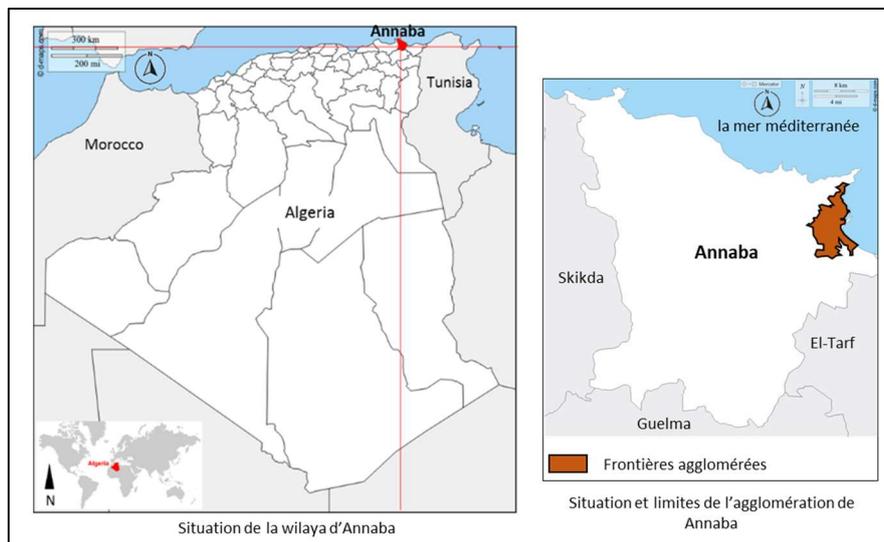


Figure III- 1: Situation et limites de la wilaya et la ville d'Annaba. Source : auteur.

### III.1.2 Topographie et urbanisme de la ville

L'agglomération d'Annaba s'étend sur le territoire des deux communes : Annaba et El-Bouni (ONS, 2008). Elle est caractérisée par trois types majeurs de relief qui ajuste son évolution (Zennir et al., 2020). Ces trois types sont répartis comme suit :

-Une partie montagneuse représentée par le massif de l'Edough qui atteint plus de 1000 m d'altitude et qui figure sur la partie Nord-Ouest de l'agglomération, le massif de Belileita et les hauteurs de Boukhadra se situent à El Bouni se présente comme des fragments parallèles à l'Edough dont ils font partie.

-Une partie plaine renfermée entre le massif de l'Edough tous le long des deux limites communales Ouest et la mer méditerranée à l'Est, l'ensemble de ces plaines sont d'une topographie basse et plate, vulnérables aux débordements des oueds.

-Une partie côtière qui se manifeste comme un cordon dunaire littoral qui s'étend de cap de garde à l'extrême Nord-Est de la commune d'Annaba jusqu'à l'extrême Sud -Est de la commune d'El Bouni à proximité de l'Aéroport Rabah Bitat en passant par Sidi Salem.

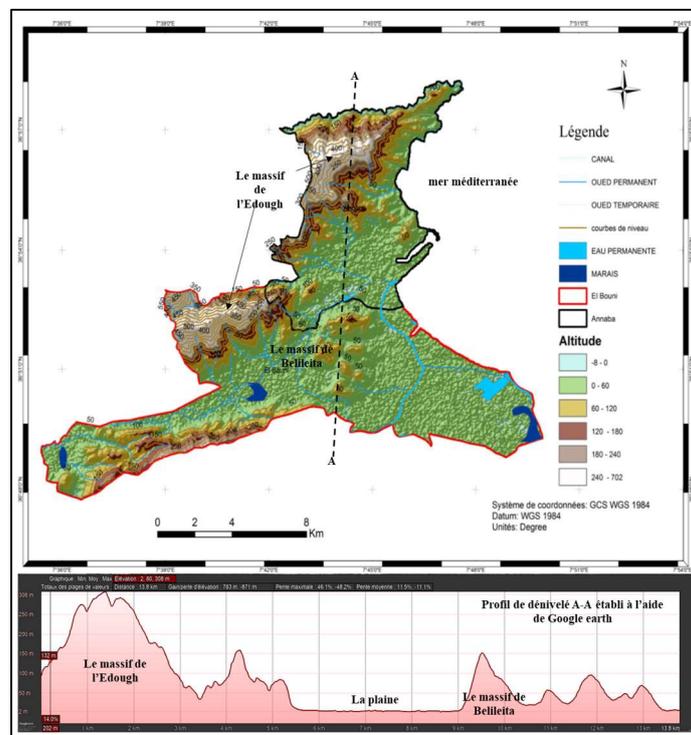


Figure III- 2: Topographie des communes d'Annaba et d'El Bouni. Source : (Zennir et al., 2020) traité par l'auteur.

La majorité de la ville d'Annaba s'est implantée au côté Est et Sud-Est par rapport à son territoire communal. Cela s'explique par son relief, on remarque une forte densité urbaine avec des différentes typologies du bâti, dans les zones de basse altitude (de 0 à 60m). La plaine constituait auparavant l'assiette principale des extensions de l'ancienne ville d'Annaba. En outre, il faut noter que les zones situées à l'extrême sud du territoire communal d'Annaba restent non urbanisées, à cause du caractère marécageux de son relief avec une altitude qui varie de -7 et 0 m. En effet, Le relief constitue un facteur essentiel qui influence l'urbanisation. Sans oublier aussi les facteurs historiques surtout la vieille ville et la ville coloniale qui constituaient un noyau urbain primitif de la ville d'Annaba (Zennir et al., 2020).

L'urbanisation d'El-Bouni s'avère plus complexe à cause de la diversité du relief. L'objectif de cette urbanisation était de satisfaire les besoins de logements de toute la wilaya d'Annaba. La grande densité urbaine se manifeste dans une zone plus ou moins approprié à l'urbanisation avec une altitude qui varie de 0 à 60 M, ainsi que dans d'autres zones situées sur des terres à faible sur le piémont du massif de l'Edough, leur urbanisation a été freinée par le massif de l'Edough. Toutefois, on constate une urbanisation dans les zones surélevées de 60 à 120 m d'altitude, telle que la région de Boukhadra qui est une partie de l'Edough, où on a implanté un pôle universitaire et aussi juste en face se trouve une grande mosquée et des blocs résidentiels en cours de réalisation (Zennir et al., 2020).

### **III.1.3 Histoire et urbanisme de la ville**

Hippone, Bûna, Bône et Annaba, sont des dénominations données à la ville d'Annaba au cours des âges, révélant sa richesse historique. Ces appellations sont dérivées de la racine *Ubbon*, qui signifie la baie. La ville d'Annaba a connue plusieurs occupations à travers l'histoire, à partir de la période préhistorique passant par Hippone de l'antiquité ensuite la période médiévale, après Bône de la colonisation française jusqu'à Annaba d'aujourd'hui (AOUCHAL, 2013). La figure III-3 synthétise les différentes périodes historiques qu'a connues la ville.

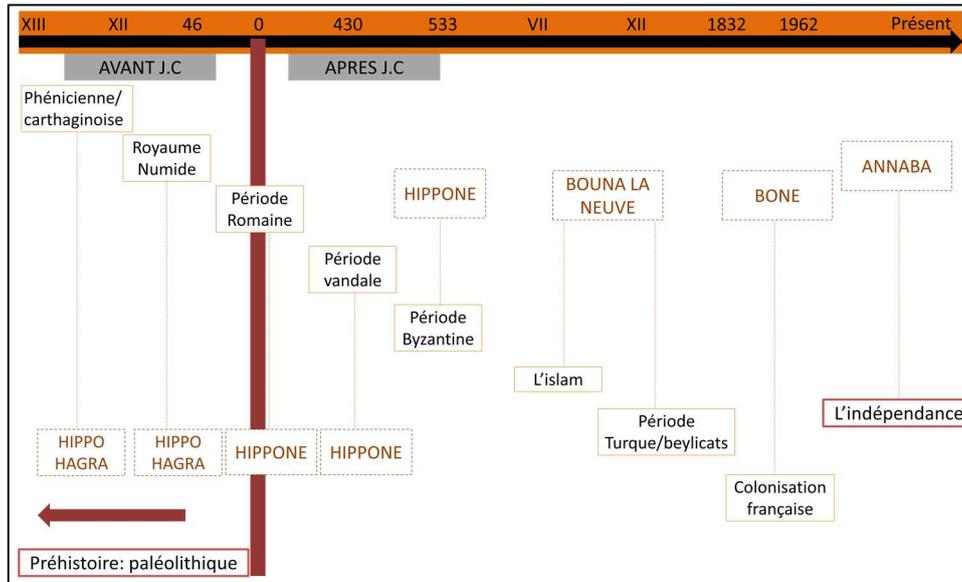


Figure III- 3: Les périodes historiques la ville d'Annaba. Source : auteur.

Cette richesse historique a participé à la diversité de la forme urbaine de la ville. Nous allons présenter que les trois périodes de l'histoire d'Annaba : médiévale, coloniale et postcoloniale, puisque ce sont les trois périodes qui ont laissées des tissus urbains habitables jusqu'à nos jours (figure III-4).

En effet, la ville est composée de trois tissus majeurs juxtaposés qui correspondent aux trois grandes périodes de son histoire : le noyau initial de l'époque médiévale, qui est un tissu traditionnel compact à côté du port ; le tissu colonial composé d'une trame en damier combinée à un tracé concentrique avec une architecture constituée principalement dans la partie centrale d'immeubles de rapport de type haussmannien, où on trouve la Place du Cours de la Révolution comme un espace principal. Ensuite, les ensembles d'habitat collectif qui représentent les extensions périphériques de la période post-indépendante dont les normes de conception obéissent à un maillage très hiérarchisé et un espace libre dispersé (Kebir & Zeghiche, 2014).

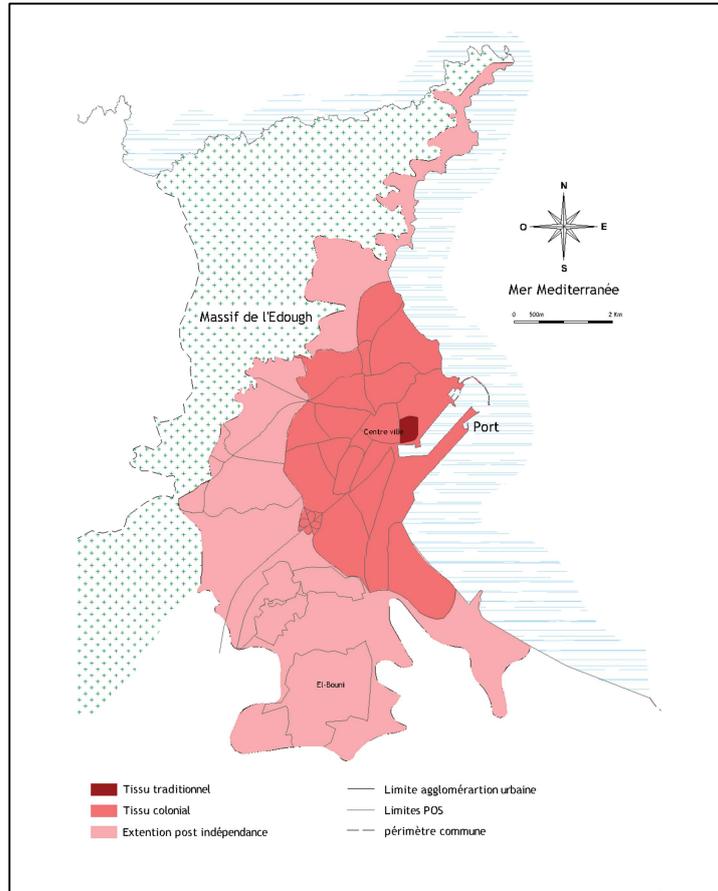


Figure III- 4: Les trois tissus constituant la ville d'Annaba. Source : PDAU, traité par l'auteur.

**-La période de médiévale :** L'Islam est apparu entre le 7<sup>ème</sup> et le 8<sup>ème</sup> siècle. Cependant Annaba et ses régions sont restées en dehors de la période « *Feth* », jusqu'à l'arrivée des Arabes à la fin du 8<sup>ème</sup> siècle. Les commerçants et les voyageurs de cette époque, racontent que l'islam n'était pas introduit à la population de ce territoire sous les armes et que Hippone occupait la partie de la ville antique. Au 10<sup>ème</sup> siècle les Arabes ont fondé une ville nouvelle sur la colline d'Abu Marouane qui s'appelle Bona El haditha, situé à l'emplacement de la vieille ville d'Annaba aujourd'hui. La ville s'était fortifiée entre 1056 et 1060. Le changement du site était significatif sur le plan urbain, le site antique était complètement abandonné, sauf pour la réutilisation des pierres et des chapiteaux et d'autres matériaux et éléments architecturaux dans la construction de Bûna-al-Haditha (AOUCHAL, 2013).

La nouvelle ville arabo-musulmane avait connu un très grand épanouissement. La défense militaire a été améliorée, en édifiant la citadelle hafside sur la colline, dite aujourd'hui les sept dormants ou « *les Sebaa Rgoud* ». La ville reconnaissait un très grand essor culturel et scientifique dans la littérature, l'architecture et la religion. À partir de 1535, cette stabilité était

menacée par les espagnoles. En effet, les musulmans de l'Algérie médiévale faisaient un appel au secours à l'empire Ottoman qui était le plus puissant à cette époque sous le règne de Soliman el Kanouni (AOUCHAL, 2013).

L'épanouissement de la ville à l'époque ottomane avait son impact sur l'urbanisme, où la ville ne cessait de se densifier et d'accueillir de nouvelles populations. L'intérieur de la ville était constitué d'édifices publics et religieux (mosquées et quelques synagogues). La zone d'habitat était structuré en cinq quartiers : Quartier Kuchat (fours), Quartier Abra ou Houmat al-Yahoud (quartier juifs), Quartier al Aqba (la montée), Quartier Hammam Al-Qaïd (bain du Caïd) et le Quartier Bir (puits). Ces quartiers disposaient chacun de différents Souks (marchés) thématiques. La ville s'ouvrait à l'extérieur par quatre portes qui assuraient le contact avec l'extérieur de la ville, où on trouvait les terres agricoles, les Souks hebdomadaires, les Qoubba, les cimetières et l'aqueduc, pour l'alimentation en eau potable (AOUCHAL, 2013).

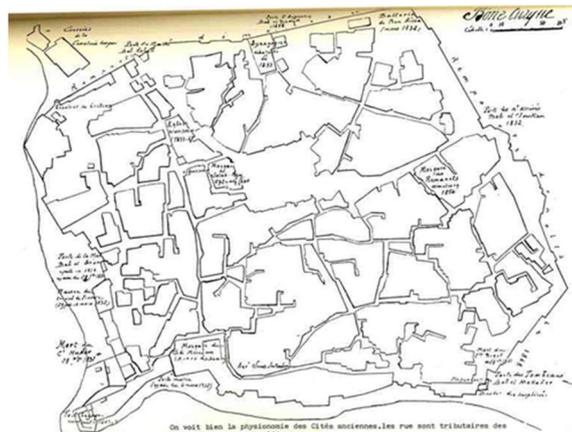


Figure III- 5: Plan de Bûna à l'époque Ottomane.

### **-La période coloniale**

Boune était la deuxième ville à subir l'assaut français, trois semaines après la reddition du dey d'Alger. Bûna devient Bône et elle subit des transformations majeures, notamment sur le plan urbain. Les français ont construit des nouvelles constructions néoclassiques, pour contrôler la population autochtone et stopper son extension. En effet, la partie basse de la ville était totalement rénovée pour loger les colons et construire une nouvelle cité à l'image française et européenne. En 1864 sous le financement de Bertagna, la France a commencé la construction de la nouvelle ville appelée Bône. Cette ville se caractérise par un tracé régulier avec une implantation rigoureuse des constructions en style néoclassique. La médina à cette époque a

connue des travaux de destruction des *Zaouïa* et de reconversion des mosquées en églises. L'espace public constituait un élément crucial dans la conception de cette nouvelle ville qui était structurée sur une place publique gigantesque nommée le cours de Bertagna, aujourd'hui (le cours de la révolution).

Au début du XXe siècle, la France a changé le langage architectural officiel, du néoclassique au néo mauresque. Afin remplacer l'image de la France colonisatrice par la France protectrice. De nouveaux édifices étaient installés sous le style néo mauresque telle la gare ferroviaire. Le site d'Hippone et de nouveau urbanisé pour la première fois depuis des siècles, consacré principalement pour l'agriculture et des activités agro-alimentaires. Sur le même site, et sur la colline surplombant la cité d'Hippone, on a construit une basilique pour célébrer le personnage du saint Augustin, l'algérien et l'universel (AOUCHAL, 2013)

Dans son ensemble, Bône, la ville coloniale est constituée de trois types de tissus urbains : **Le tissu haussmannien**, d'une trame en damier combinée à un tracé concentrique avec une architecture constituée principalement d'immeubles de rapport de type haussmannien, où on trouve la Place du Cours de la Révolution (figure). **Tissu contigu et maisons de faubourg**, à Sainte-Anne (La colonne actuellement) qui affirmait sa vocation résidentielle dès les débuts de son urbanisation de part et d'autre de la rue axiale de Sadi Carnot. Le parcellaire est étroit et allongé, perpendiculaire à l'axe de la route de l'Edough pour une optimisation du nombre de façades sur rue. Les maisons sont jointives, aucun lieu à la formation d'espaces intermédiaires (figure). Et la **Cité-jardin et pavillon (Beauséjour)**, structurée par le boulevard Narbonne auquel s'attachent des rues restreintes et calmes. Les maisons sont installées derrière des jardins, protégées par des grilles, laissant apparaître le pavillon entouré des espaces sans lesquels il serait dénaturé (figure III-6) (Bensaâd Redjel & Labii, 2019).



Figure III- 6: a) le tissu haussmannien, b) quartier de la colonne, c) quartier du Beauséjour

### **-La période postcoloniale (l'indépendance)**

Le 5 juillet 1962 l'indépendance de l'Algérie est proclamée après 132 ans de colonisation française. Bône devient Annaba. Un nouveau nom issu de Bilad et-Ünnab à cause de l'abondance des jujubiers sur ce territoire. Quelques années après l'indépendance, le gouvernement algérien décide de changer la vocation économique de la ville en intégrant des usines industrielles malgré le potentiel agricole et touristique de la région. Donc Annaba a connu une évolution démographique importante à cause l'exode rural. Cette augmentation de la population a participé à une croissance urbaine rapide anarchique favorisant le développement de l'habitat illicite. Des petites villes satellites commencent à se développer, sur la plaine Ouest et sur les terres du Sud de la ville, telles El-Bouni, El-Hadjar, Sidi Amar, Sidi Salem et Sidi Achour. Aujourd'hui, la croissance continue vers le Nord de la ville sur les contrebas du mont de l'Edough (AOUCHAL, 2013).

Dans une perspective de développement économique, l'état algérien a mis en place une politique de modernisation du pays. Ces politiques visaient aussi la ville par la programmation des opérations de ZHUN entre 1970-1980, dans les sites d'El Bouni, Sidi Ammar et Plaine-Ouest, et l'intégration des activités industrielles telles que le complexe sidérurgique d'El-Hadjar. Malgré la réalisation des ZHUN, la crise de logements persiste en Algérie, favorisant le développement des baraques et des bidons villes. L'état ensuite a essayé de reprendre à ce problème par la politique de limitation de la croissance 1983. En 1980, les pouvoirs publics décident de déloger les bidonvilles vers la périphérie (MEBIROUK, 2005). Finalement, On peut dire qu'Annaba aujourd'hui, est une ville combinée de plusieurs formes urbaines façonnées à travers le temps. Cette diversité urbaine témoigne d'une richesse patrimoniale et culturelle menacé par un urbanisme peu soucieux de la valeur historique et culturelle de la ville.

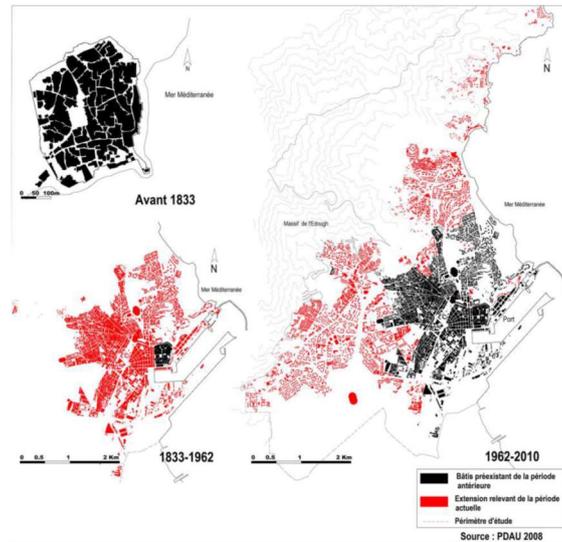


Figure III- 7:L'évolution urbaine de la ville d'Annaba. Source : (Laouar et al., 2019)

### III.2 Analyse climatique de la ville d'Annaba

Selon la classification de Köppen (figure III-8). Annaba se situe dans la zone « Csa » (Warm Mediterranean climate). Donc, elle se caractérise par un climat méditerranéen dominée par les situations anticycloniques durant une grande partie de l'année. Deux saisons se distinguent : l'été chaud et sec et l'hiver doux et relativement humide. La topographie locale et la proximité de la Méditerranée ont également un impact sur le climat de cette ville. (Dahech & Saihia, 2019). Les directions principales des vents sont du nord au nord-est. Les températures maximales sont enregistrées durant le mois d'août, avec une moyenne maximale de 31.3°C, et minimales durant le mois de janvier, avec une valeur moyenne de 7,1°C.

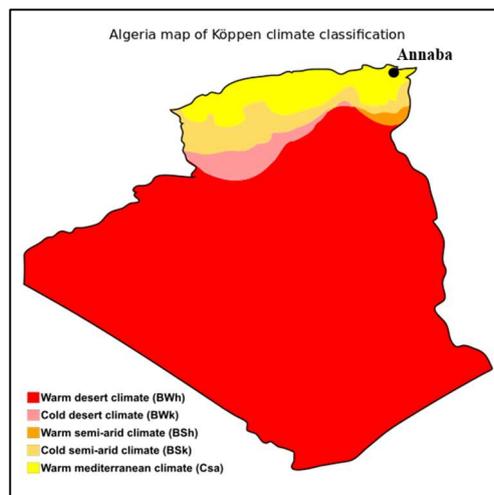


Figure III- 8:L'évolution urbaine de la ville d'Annaba. Source : (Laouar et al., 2019)

L'analyse climatique de la région d'Annaba s'est réalisée en se basant sur des données climatiques récupérées de la station météorologique « Bone des Salines », située à l'aéroport Rabah Bitat. On a récupéré aussi les données météorologiques de la période entre 2000 et 2021, à partir du site de la NASA<sup>5</sup>, pour établir les cartes climatiques du territoire de la wilaya d'Annaba.

### III.2.1 La température de l'air

Le tableau ci-dessous (III-1) et le graphe (III-1) représentent l'évolution mensuelle de la température de l'air moyenne, moyenne maximale et moyenne minimale. Ces valeurs ont été établies en se référant aux données météorologiques de la période entre 2005 et 2018. Les résultats montrent que la température moyenne maximale est enregistrée pendant le mois d'aout avec une valeur de 31.3 °C, Alors que la température moyenne minimale est enregistrée pendant le mois de janvier avec une valeur de 7.1°C. L'amplitude thermique annuelle est de 24.2 °C. Les valeurs annuelles de la température de l'air (période entre 2005 et 2018) sont les suivants : la température moyenne annuelle égale à 18.3°C, la température moyenne maximale est 23.5°C et la température moyenne minimale annuelle est 13°C .On constate aussi, que le mois de juillet et le mois d'aout, sont les mois les plus chauds de l'année, et que le mois de janvier et février sont les plus froid.

Tableau III- 1: Les valeurs moyennes de la température pendant de la période entre 2005 et 2018. Source : station météorologique de l'aéroport « Rabah Bitat » d'Annaba.

mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Temp moyenne °C	11,3	11,8	13,1	15,6	18,7	22,4	25,4	25,6	23,4	20,3	15,7	12,3
Temp moyenne max °C	16,6	17,07	18,7	21,3	24,6	28,1	31,1	31,3	28,4	26,3	21,5	17,6
Temp moyenne min °C	7,1	7,4	8,2	10,5	13,2	16,6	19,2	20,4	18,5	15,5	11,3	8,7

<sup>5</sup> <https://power.larc.nasa.gov>

### Chapitre III : présentation et investigation du cas d'étude

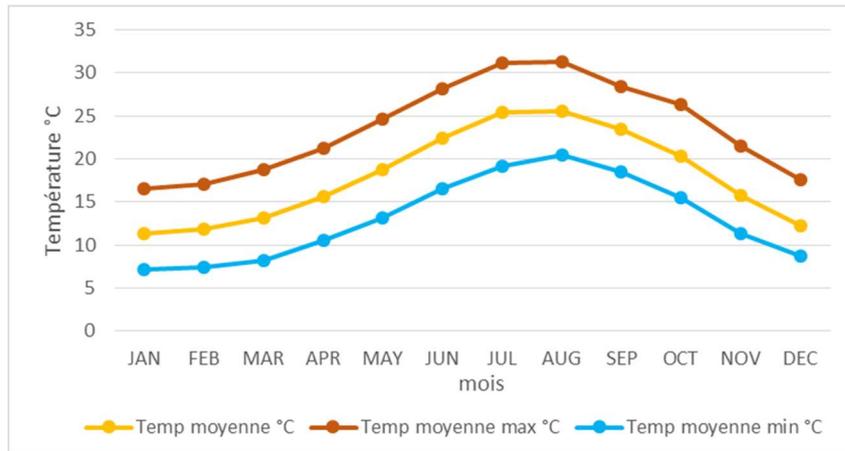


Figure III- 9: Graphe de la variation de la température de l'air pendant de la période entre 2005 et 2018

La carte ci-dessous représente la variation spatiale de la température de l'air moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba. On a établi cette carte à l'aide du logiciel « QGis », en se basant sur les données météorologiques récupérées du site de la NASA de 21 ans (de 2000 à 2021). D'après la carte, on voit que la partie nord de la wilaya, là où se situe la ville d'Annaba est plus chaude par rapport au sud avec une différence qui peut arriver jusqu'à 2°C. La température moyenne annuelle du nord varie entre 18.8 et 19.2, alors qu'au sud la moyenne varie entre 17 et 17.3

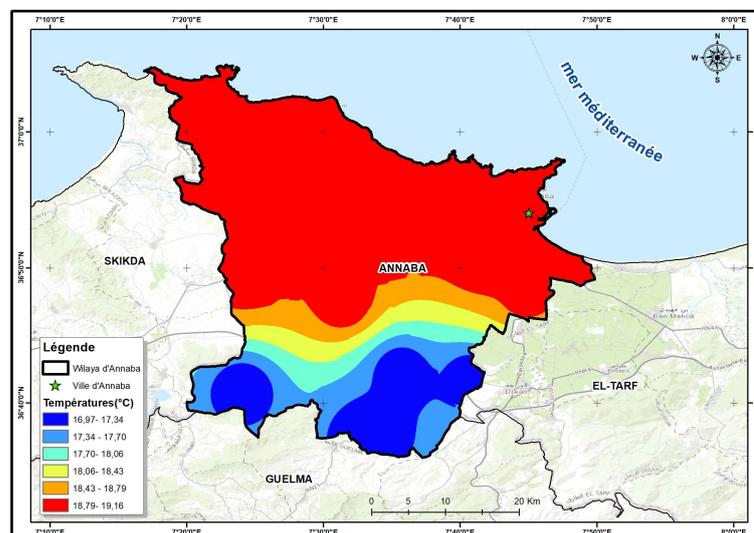


Figure III- 10: carte de la variation spatiale de la température de l'air moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba.  
Source : auteur

#### III.2.2 L'humidité relative

D'après le tableau (III-2) et le graphe (Figure III- 10) établis sur la base des données météorologiques de la période entre 2005 et 2018, on constate que l'humidité relative moyenne

### Chapitre III : présentation et investigation du cas d'étude

maximale est enregistrée pendant le mois de mars avec une valeur de 95,4%, alors que l'humidité minimale est enregistrée pendant le mois de juillet avec une valeur de 47.6%. Les valeurs annuelles de l'humidité relative (période entre 2005 et 2018) sont les suivants : l'humidité relative moyenne annuelle égale à 77.4 %, l'humidité relative moyenne maximale est 94.4 % et l'humidité relative moyenne minimale annuelle est 52.5%. Ce qui est remarquable aussi est la relation inverse entre la température de l'air et l'humidité relative, lorsque la température augmente l'humidité relative baisse et inversement.

Tableau III- 2: Les valeurs moyennes de l'humidité relative pendant de la période entre 2005 et 2018. Source : station météorologique de l'aéroport « Rabah Bitat » d'Annaba.

mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Humidité relative moy %	80,6	80	78,1	80,5	77,3	75,1	74,4	73,8	74,6	78,3	76,3	80,3
Humidité relative moy max %	95	94,9	95,4	94,7	94,3	94,7	93,9	93,5	93,7	94,6	93,1	94,5
Humidité relative moy min %	57,6	57	55,4	55,4	51,3	47,8	47,6	49,9	50,2	50,3	51,5	55,8

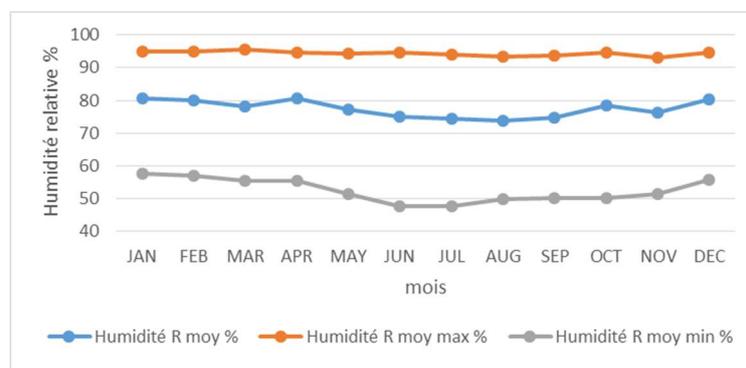


Figure III- 11: Graphe de la variation de l'humidité relative pendant de la période entre 2005 et 2018

D'après la Carte III-10, on voit que la partie nord est plus humide (entre 70.5% et 71.5%) que la partie sud de la wilaya (entre 67.7% et 68.6%). Cela peut être expliqué par la proximité de la mer et la présence du massif de l'Edough qui se caractérise par une couverture végétale très dense.

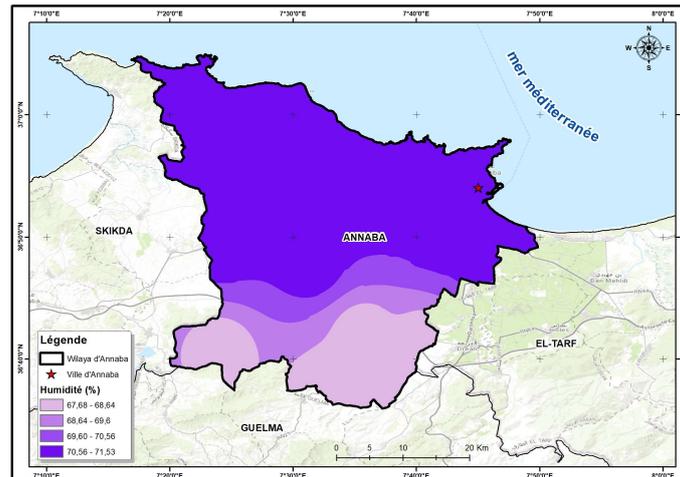


Figure III- 12: Carte de la variation spatiale de l'humidité moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba. Source : auteur

### III.2.3 Les vents

Le tableau III-3 et le graphe III-3 représentent la variation mensuelle de la vitesse du vent de la période entre 2000 et 2021, établie en se référant aux données climatiques de la NASA de la station située à l'aéroport Rabah Bitat. On voit que la vitesse du vent moyenne maximale est enregistrée pendant le mois de janvier avec une valeur de 14 m/s, alors que la vitesse du vent minimale est enregistrée pendant le mois d'aout avec une valeur de 8.5 m/s. Les valeurs annuelles de la vitesse du vent (période entre 2000 et 2021) sont les suivants : la vitesse du vent moyenne annuelle égale à 4.5 m/s, l'humidité relative moyenne maximale est 11.8 m/s et la vitesse du vent moyenne minimale annuelle est 0.2 m/s.

Tableau III- 3: Les valeurs moyennes de la vitesse d vent pendant de la période entre 2005 et 2018. Source : station météorologique de l'aéroport « Rabah Bitat » d'Annaba.

mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
vitesse du vent moy m/s	5,5	5,4	5,1	4,5	4,1	3,6	3,6	3,4	3,8	4,1	5,1	5,4
vitesse du vent max m/s	14,0	13,4	13,9	12,6	11,7	9,3	8,9	8,5	10,2	11,5	13,6	13,8
vitesse du vent min m/s	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

### Chapitre III : présentation et investigation du cas d'étude

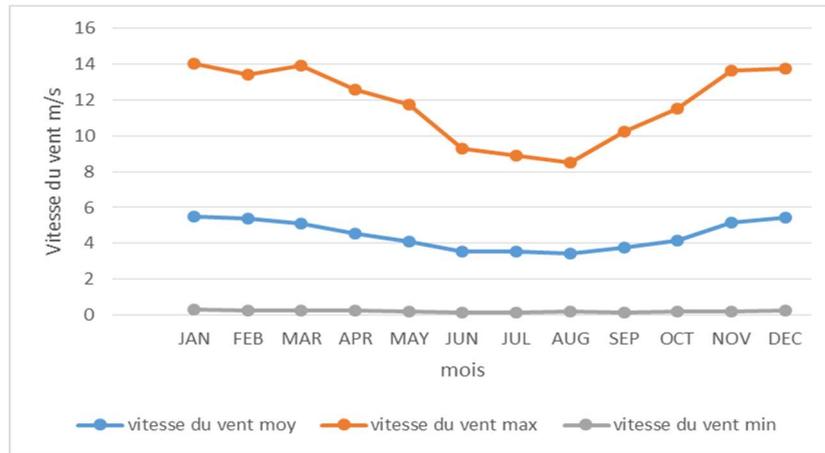


Figure III- 13: Graphe de la variation de la vitesse du vent pendant de la période entre 2005 et 2018

La carte ci-dessous présente la variation de la vitesse du vent dans la région d'Annaba. On note que la vitesse du vent moyenne annuelle est plus élevée au nord qu'au sud, avec une différence moyenne de 0.7 m/s. La proximité de la mer explique cette variation, Plus on s'éloigne de la mer, plus la vitesse du vent est faible.

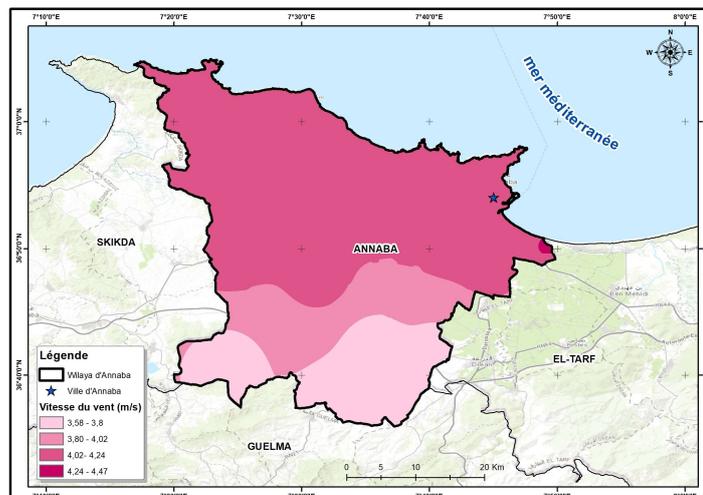


Figure III- 14: Carte de la variation spatiale de la vitesse du vent moyenne annuelle de la wilaya d'Annaba.  
Source : auteur

Salem Dahech et Saihia Abdallah, dans leur travail sur la pollution atmosphérique et la brise de mer à Annaba, ont établi la rose de vents enregistrés à 15 h et 3 h à l'aéroport d'Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) de la période entre 1970-2017. Situé à 2 km de la mer, à l'aéroport d'Annaba, à l'aide de la station météorologique, on enregistre l'arrivée de la brise de mer vers 9 h en été, soit 3 à 4 heures après le lever du soleil. Sa vitesse augmente progressivement pour atteindre 8 m/s vers 15 h. Quand elle est bien installée, la brise de mer

souffle du NNE à l'aéroport d'Annaba. La vitesse instantanée maximale de la brise de mer peut atteindre 10 m/s. La rose du vent enregistré à 15 h montre que dans 90 % des situations, un vent modéré souffle de la mer, soit du quadrant NE (figure III-9) (Dahech & Saihia, 2019).

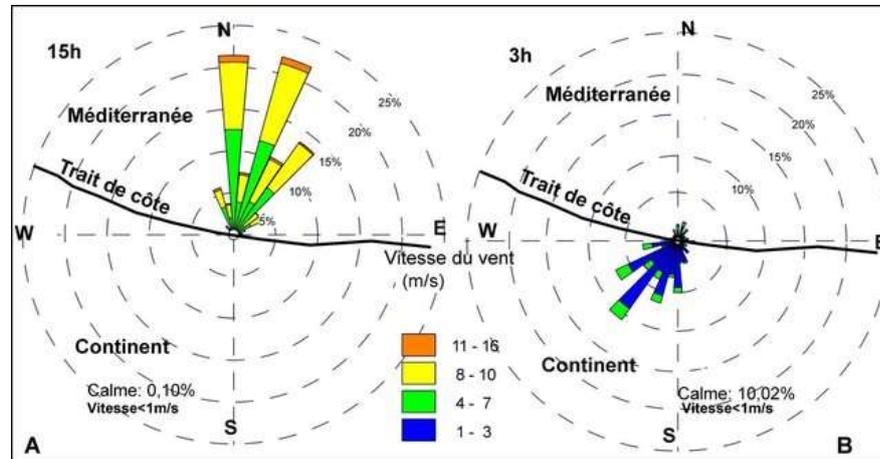


Figure III- 15: Rose de vents enregistrés à 15 h (A) et 3 h (B) à l'aéroport d'Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) ; source : (Dahech & Saihia, 2019).

### III.2.4 Les précipitations

Les précipitations sont un paramètre important dans l'étude climatologique, il est utilisé dans le calcul de l'indice d'aridité. Le tableau ci-dessous (tableau III-4) et la (figure III-10) représentent les valeurs mensuelles des précipitations enregistrées dans la station météorologique de la période entre 2005 et 2018. On remarque que la quantité de précipitation maximale est enregistrée au mois de février avec une hauteur moyenne de 95.2 mm. Alors que dans le mois de juillet on enregistre une moyenne minimale de 2.2 mm. La hauteur annuelle totale des précipitations est 608.8 mm, pour la période entre 2005 et 2018.

Tableau III- 4: les précipitations mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018

mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Précipitations (mm)	90,4	95,2	88,4	42,5	26	10,2	2,2	8,1	40,6	53,4	64,6	87,2

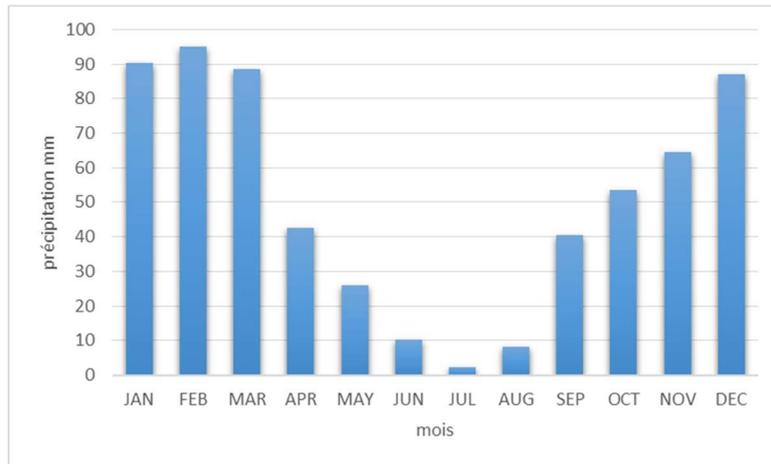


Figure III- 16: les précipitations mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018

La carte ci-dessous montre la variation la quantité totale annuelle des précipitations de la période entre 2000 et 2021 dans la région d'Annaba. On remarque que les précipitations dans la partie nord de la wilaya est moins importante (entre 588 mm et 618 mm) que dans sa partie sud, qui peut arriver jusqu'à 761 mm.

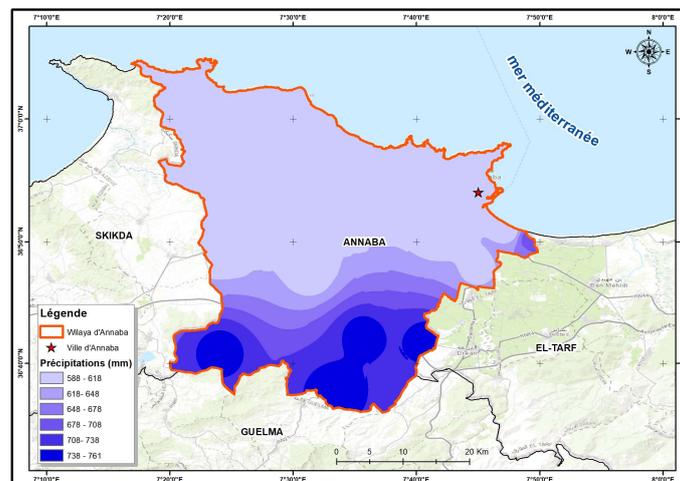


Figure III- 17: Carte de la variation spatiale des précipitations moyennes annuelles de la wilaya d'Annaba.  
Source : auteur

### III.2.5 L'insolation

L'insolation est la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est suffisant pour créer un ombre portée bien nette (Observé grâce à l'héliographe). Cette durée dépend de la couverture nuageuse de la journée (TEBBANI, 2006). La figure III-11 et le tableau III-5 présentent la durée totale mensuelle calculée à partir des données de la station météorologiques de la période entre

2005 et 2018. On remarque que la durée d'insolation est maximale pendant le mois de juillet, avec un total de 340 heures et 54 minutes, et minimale pendant le mois de février, avec un total de 150 heures et 06 minutes.

Tableau III- 5: l'Insolation mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018

mois	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Insolation totale (h)	156,3	150,1	200,5	228,5	291,5	332,8	340,9	329,5	216,1	213,3	171,4	151

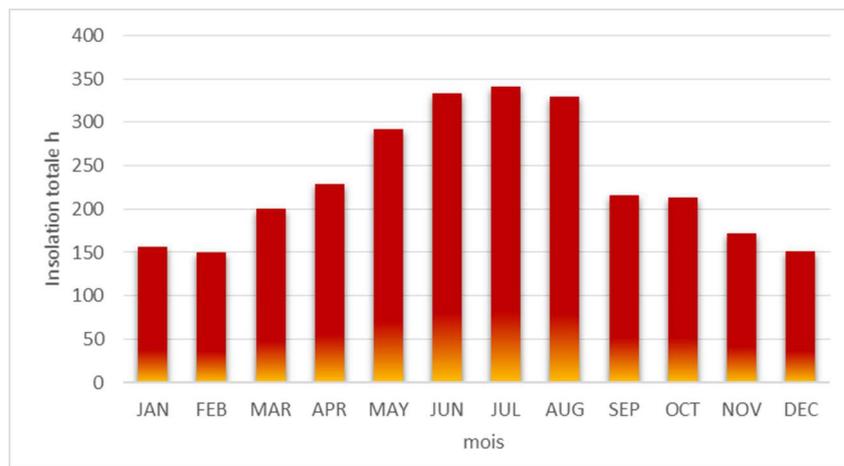


Figure III- 18: l'Insolation mensuelles enregistrées de la période entre 2005 et 2018

### III.2.6 L'indice d'aridité

Un indice d'aridité est défini comme l'indicateur numérique du degré de sécheresse climatique à un endroit donné et il permet de classer le type de climat en fonction de la disponibilité de l'eau. L'indice d'aridité de (De Martonne) se calcule par la formule suivante :

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

P : désigne les précipitations totales annuelles.

T : la température moyenne annuelle.

Selon l'indice d'aridité De Martonne, les types de climat sont présentés de la façon suivante :

$I \leq 5$  : Climat hyper aride

$5 \leq I \leq 7.5$  : Climat désertique

$7.5 \leq I \leq 10$  : Climat steppique

$10 \leq I \leq 20$  : Climat semi-aride

$20 \leq I \leq 30$  : Climat tempéré

$I \leq 30$  : Climat humide

Le tableau ci-dessous présente les indices d'aridité établis sur la base des données climatiques de la période entre 2005 et 2018, récupéré de la station météorologique. On note que l'indice d'aridité a baissé d'une manière marquante, les dernières années, notamment 2017, 2018. Cela est dû à la diminution des précipitations durant ces années. En générale, si on calcule la moyenne de l'indice d'aridité pour la période entre 2005 et 2018 on le trouve égal à 21.3, ce qui indique que le climat d'Annaba est un climat tempéré ou subhumide.

Tableau III- 6: L'indice d'aridité de la période entre 2005 et 2018

Mois	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Indice d'aridité	30,182	20,488	26,125	15,685	33,961	21,032	23,765	18,666	19,975	22,606	24,630	16,613	10,605	13,484

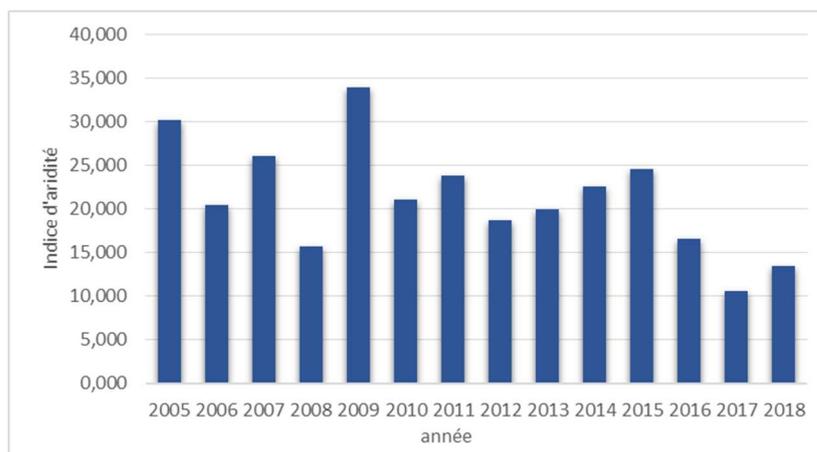


Figure III- 19: L'indice d'aridité de la période entre 2005 et 2018

### III.2.7 Détermination de l'isotherme

On a établi l'isotherme de la ville d'Annaba à l'aide du logiciel « climate consultant 06 » à partir des données climatique de 20 ans (entre 2000 et 2021). L'isotherme montre trois zones qui représentent trois périodes : sous-chauffe, confort et surchauffe (figure III-13).

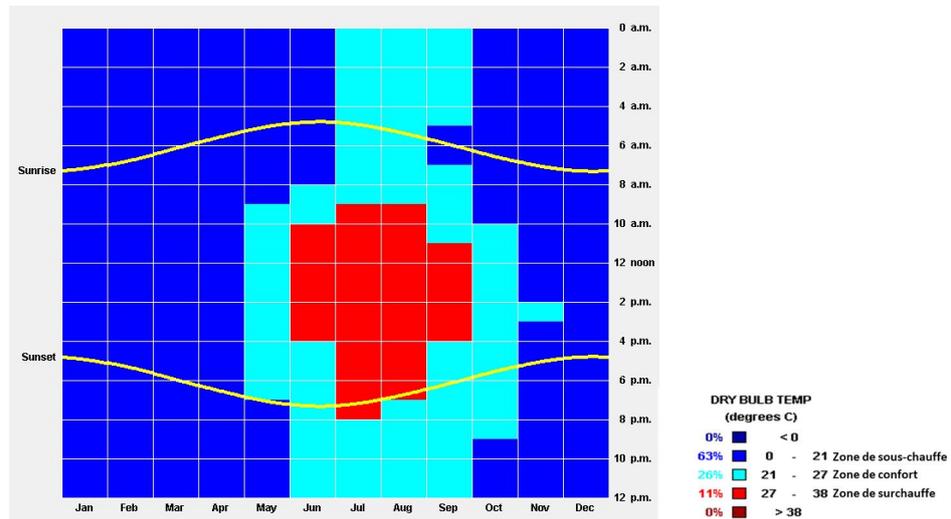


Figure III- 20: Isotherme de la ville d'Annaba. Source : Climate Consultant 6.0, adapté par l'Auteur

**Zone de surchauffe :** cette période s'étale du mois de juin de 10h00 jusqu'à 16h00, juillet de 09h00 jusqu'à 20h00, aout de 09h00 à 19h00, et septembre de 11h00 à 16h00. Donc, juillet et aout sont les mois qui se caractérisent par la plus longue période de surchauffe. Cette dernière se distingue par des températures élevées, dépassant le seuil du confort thermique.

**Zone de confort :** démarquée principalement par : les journées du mois de mai, et le mois d'octobre, ainsi que les soirs les matins du mois de juin et le mois de septembre. Cette zone offre une période de neutralité ou satisfaction thermique.

**Zone de sous-chauffe :** elle comprend les mois de janvier, février, mars, avril, novembre et décembre. C'est la période la plus froide de l'année, dans laquelle les températures sont sous la limite du confort thermique, ce qui nécessite l'utilisation de chauffage.

Dans cette recherche, nous nous intéressant à la période de surchauffe, donc notre étude s'est déroulée pendant la fin du mois de juillet et le début du mois d'aout de l'année 2019.

### III.3 Choix et présentation du cas d'étude

Parmi les espaces publics, nous avons choisi particulièrement la place publique comme un objet de recherche. Le choix de la place se justifie par sa situation dans la ville d'Annaba, on la trouve

dans tous les tissus urbains (tissu médiévale, tissu coloniale, tissu contemporain). Nous avons choisi cinq places publiques : la place du Cours de la Révolution, la placette de la vieille ville, la placette Alexis Lambert, la place du Cours d'El-Bouni et la placette d'El-Bouni (Figure III-14).

Le choix du cas d'étude s'est basé sur les critères suivant :

**- la fréquentation et l'importance urbaine et architecturale de l'espace ;** La place du cours de la révolution, très fréquentée et connue à l'échelle de la ville et même à l'échelle de la région, grâce à son importance historique et architecturale. La placette de la vieille ville, située au cœur de la vieille ville, elle est d'une valeur historique importante. La placette Alexis Lambert, pas loin de la place du Cours de la révolution, elle se distingue par une architecture haussmannienne et une forte densité végétale. La place du Cours d'El-Bouni, elle a été construite à la manière de la place du Cours de la Révolution, mais avec une architecture totalement différente. C'est une place très fréquenté par les habitants de la ville ou même les visiteurs. La place d'El-Bouni, elle se situe à quelques mètres de La place du Cours, c'est un espace fréquenté surtout par les habitants.

**-la diversité dans la morphologie urbaine ;** les cinq places choisies sont situées dans trois tissus urbains de morphologie différente : la place de la vieille ville se situe dans un tissu de l'époque ottomane, qui se caractérise par une densité bâtie très élevée et des rues sinueuses et arborescentes. La place du cours de la révolution et la placette Alexis Lambert, situées dans un tissu haussmannien, qui se caractérise par un tracé régulier avec une implantation rigoureuse de constructions néoclassique. La place du cours d'El-Bouni et la placette d'El-Bouni, situées dans un tissu contemporain moins dense, qui de caractérise par la présence de plusieurs espaces ouverts et des bâtiments isolés.



Figure III- 21: Situation des places choisies. Source : Google Earth

### III.3.1 La place du cours de la révolution

Le Cours de la révolution se situe au cœur du centre-ville, à quelques dizaines de mètres du port d'Annaba (environs 90m). C'est le lieu préféré pour les habitants ou les visiteurs de la ville. Il est délimité sur ces deux cotés (Est et Ouest) par des bâtiments imposants de style néoclassique, ornés de galeries avec des colonnades taillées de marbres raffinés tout le long de leurs façades, avec une hauteur qui varie entre 18 et 12 m. Parmi ces bâtiments, on trouve : l'hôtel de ville, œuvre achevée en 1888 et le théâtre régional inauguré le 26 Avril 1856, reconstruit en 1954, et l'hôtel d'Orient. Entouré par des routes bitumées d'une largeur comprise entre 09 m et 15 m. la place elle-même, est essentiellement un espace pavé de forme rectangulaire ( $415 \times 30$ ) m<sup>2</sup> aménagé en trois parties : une partie sud implantée d'arbres de ficus très denses, et des kiosques de cafétéria et crémeries sur ses bords. Partie centrale découverte, sans aucune végétation, avec deux kiosques à tabac, elle est utilisée parfois pour faire des manifestations culturelles et des expositions temporaires. Et une partie nord implantée d'arbres centenaires moins denses et variables en matière d'espèces. La géométrie du Cours est donc linéaire, avec une orientation nord sud, et un rapport H/W  $\approx 0.28$  pour l'ensemble du cours.

La végétation constitue un élément identitaire du Cours. La partie sud du cours comprend une seule espèce qui est l'arbre du Ficus tandis que la partie nord comprend plusieurs espèces. Le ficus dans la partie sud se présente sous forme d'un parasol avec un seul tronc et plusieurs branches avec un couvert végétale dense, et des feuilles persistantes de forme ovale. Contrairement à la partie sud, la partie nord du cours abritent plusieurs espèces de végétation

moins dense qui varient entre gazon, haies, fleurs arbustes et arbres à savoir, Palmier phoenix, Palmier washingtonia, Ficus retusa, ficus elastica, Araucaria, Caoutchou, Eucalyptus acacias. En plus le traitement du sol dans la partie nord est différent, où on trouve des petits espaces non pavés gazonnés et clôturés avec des barres d'acier.

### III.3.2 La placette de la vieille ville

Situé au cœur de la vieille ville (la place d'arme), relié avec une rue perpendiculaire au cours de la révolution. Elle a occupé une fonction commerciale à l'époque Ottomane et elle était la place du marché. Elle avait une forme organique et irrégulière en harmonie avec la morphologie arborescente de la ville à cette époque. Ensuite, avec l'arrivée des français, et les travaux d'alignement et de destruction, sa forme et sa fonction ont été transformées pour devenir une placette de forme orthogonale implantée d'arbre avec une fontaine au centre. Aujourd'hui, la place de la vieille ville garde la forme droite de l'époque française, mais contrairement au cours, elle est mal entretenue et non aménagée, malgré cela elle est fréquentée par les habitants de la ville et surtout les habitants du quartier grâce à sa situation centrale et sa proximité à la mosquée Salah Bey.

La placette est délimitée par des bâtiments de l'époque coloniale, construites sur les traces de la ville ottomane après la démolition des bâtiments ottomans qui entouraient la placette. Le seul bâtiment qui reste jusqu'à présent et qui donne sur la placette est la mosquée de Salah Bey, qui a été construite entre 1791 et 1792 par le bey de Constantine « Salah Bey ». Elle est construite en pierre, bois, enduit, brique, métal, moellons et décorée en marbre et céramique. La mosquée est dotée de plusieurs galeries latérales. Aussi, parmi les bâtiments qui entourent la placette, on trouve l'hôtel Safsaf, avec une architecture coloniale et une façade ornée d'une galerie en arcade. La place est entourée par des voies bitumées d'une largeur entre 08m et 09 m, et des bâtiments avec une hauteur qui varie de 07 à 19 m. La placette est constituée d'un espace pavé de forme rectangulaire ( $49 \times 39$ ) m<sup>2</sup> d'une orientation nord sud et un rapport H/L  $\approx 0.22$ . Elle est dotée de kiosques et implantée en arbres éparpillés et moins dense.

### III.3.3 La placette Alexis Lambert

La placette est située à proximité du Cours de la Révolution, dans le même tissu colonial qui se caractérise par la régularité et la géométrie orthogonale. L'orientation et la forme de la place

obéissent aux tracés des voies. Elle est limitée par des immeubles haussmanniens d'une hauteur qui varie de 10 à 16. Parmi ces bâtiments, on trouve le CEM George Ishak qui a été l'école des sœurs à l'époque française. La géométrie de la place est rectangulaire ( $54 \times 72$ ) m<sup>2</sup>, avec une orientation (nord-ouest, sud-est) et un rapport  $H/L \approx 0.14$ . Elle est limitée par des voies goudronnées étroites de 05 à 06 mètres de large. Le sol de la placette possède des espaces non pavés (gazonné et parfois de terre nue) d'une forme géométrique régulières et symétrique. Cet espace est borné par des barres en acier et des bancs et planté d'arbres de Ficus très dense sous forme de parasol qui rappelle l'image du Cours de la Révolution. On trouve aussi trois Kiosques cafétéria sur les coins de la placette, et un espace central pavé relié aux angles par des passages pavés.

### III.3.4 La place du Cours d'El-Bouni

Le Cours d'El-Bouni est situé dans la ZHUN d'El-Bouni, qui est une zone d'habitat, planifiée et conçue sous la forme de « ville nouvelle ». L'idée du gouvernement, était de concevoir une copie du Cours de la Révolution, mais ce dernier est situé au centre d'un tissu orthogonal, dense et continu, contrairement à celui d'El-Bouni, qui est un tissu dilué caractérisé dans son ensemble par des blocs isolés de logements et des espaces résiduels. En effet le Cours d'El-Bouni est d'une forme linéaire avec des dimensions de ( $225 \times 24$ ) m<sup>2</sup>, orienté (nord-sud). Il est délimité à l'est par des bâtiments jumelés, sur une longueur de 225 m, parfois pénétré par des passages piétons. Le rez-de-chaussée de ces bâtiments est muni de galerie en arcade et consacré au commerce. Sur son côté ouest, on trouve des blocs de bâtiments résidentiels isolés et situés en retrait par rapport à la route. la hauteur du bâti varie entre 10 et 16 m. Entouré par des routes bitumées d'une largeur d'environ 07 m, et deux ronds-points aux deux extrémités. La place du cours est essentiellement pavée et aménagée en trois parties : une partie sud conçue à la manière du Cours de la révolution, Elle est implantée d'arbres de ficus plus ou moins denses, et deux palmiers aux deux extrémités, avec quelques kiosques de crémeries sur ses bords. Partie centrale découverte, sans aucune végétation. Et une partie nord implantée d'arbres de ficus jeune, et deux kiosques à Tabac. En comparaison avec le cours de la révolution, on remarque que la végétation est moins riche, où on trouve que l'arbre de ficus et le palmier, en plus les arbres sont plus jeunes et donc plus petits.

### **III.3.5 La placette d'El-Bouni**

Située à quelques mètres du Cours d'El-Bouni, dans un même tissu, moins dense, caractérisé par des espaces ouverts et des blocs de bâtiments résidentiels séparés, d'une hauteur qui varie de 07 à 23 m La place est de forme rectangulaire ( $66 \times 76$ ) avec un rapport  $H/L \approx 0.13$ . Elle est entourée par des voies mécaniques goudronnées, d'une largeur de 07 m. Le sol de la placette possède des espaces non pavés borné par des barres en acier (gazonné et parfois de terre nue) d'une forme géométrique, et un espace centrale et des passages pavés. La végétation dans cette placette est presque absente sauf deux ou trois arbres aux angles, cependant, on remarque la présence de la végétation dans les ilots et entoure la placette.

### **III.4 Mesure des paramètres climatiques**

Des mesures in-situ des paramètres climatiques (Température de l'air, Vitesse du vent, et humidité relative) ont été effectuées sur six journées pendant la période de surchauffe. Des mesures ont été prises le 29, 31 juillet et le 02 août 2019 au niveau de la placette d'El-Bouni et le Cours d'El-Bouni, et d'autres le 28, 30 juillet et 01 août 2019 au niveau de la placette de la vieille ville, la placette Alexis Lambert, et le Cours de la révolution. Nous expliquons dans ce qui suit le protocole, les instruments utilisés et les paramètres mesurés.

#### **III.4.1 Protocole et campagnes de mesure**

Les mesures de terrain ont été prise toutes les deux heures de 8h00 à 18h00 pendant les quatre jours, à l'aide d'une station de mesure mobile positionné à 1,50 m au-dessus du terrain, et en se déplaçant entre les espaces étudiés. On a fixé des points de mesure pour chaque espace public. Les cartes ci-dessous (figure III-15) montrent la répartition de ces points. Le choix des campagnes de mesure s'est basé sur le critère de la variation dans la morphologie et la densité de la végétation. Au niveau du Cours de la révolution et Cours El-Bouni, on a choisi quatre points répartis le long de l'espace : un point à l'extrémité proche du trafic routier, un point au centre de la partie végétalisée, un point situé dans la zone non végétalisée, et un dernier point dans la zone qui présente une petite densité végétale. Pour les trois autres placettes, on a fixé deux points de mesures, un point au centre de la placette, et un autre point au bord de la placette.

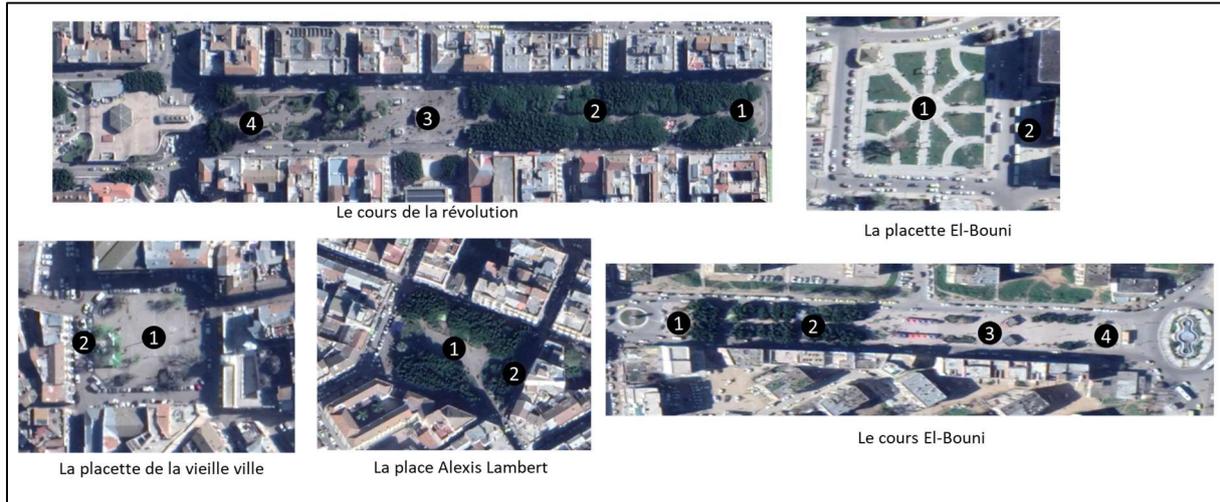


Figure III- 22: Les points de mesure dans les cinq places

### III.4.2 Instruments utilisés

Les mesures sur le terrain à l'aide d'une station de mesure mobile : appareil Testo 480 (figure III-16) positionné à 1,50 m au-dessus du terrain. Testo 480 est un Anémomètre multifonction, qui permet de procéder les mesures de plusieurs paramètres climatiques, avec une grande précision à savoir, la température, l'humidité relative, la pression, la chaleur rayonnante, intensité lumineuse, PMV/PPD et valeur WBGT... etc. Il est muni de plusieurs sondes et d'autres accessoires qui facilitent la démarche de mesure et l'analyse des données. Nous avons utilisé dans cette recherche, deux sondes : une Sonde d'humidité et de température ; Ø 12 mm ; pour la mesure extrêmement précise de l'humidité, avec une précision de 1 %, et une Sonde de mesure à hélice ; Ø 16 mm ; pour la mesure de la vitesse de l'air.



Figure III- 23: appareil Testo 480

### III.4.3 Paramètres climatiques mesurés

Les paramètres climatiques mesurés dans cette investigation sont : la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Ces paramètres sont considérés parmi les facteurs directs qui influencent le confort thermique.

- **la température de l'air** : Le paramètre climatique le plus couramment utilisé dans les études climatiques est la température de l'air. Elle se définit comme une grandeur intensive qui traduit la sensation de chaud ou de froid. Pratiquement, tous les paramètres météorologiques, à savoir : la vitesse de l'air, l'humidité relative, les précipitations et le taux d'évaporation dépendent de la température de l'air. Lorsque l'air est frais, il devient plus dense, avec une masse volumique supérieure à celle de l'air chaud. De ce fait l'air à haute pression se déplace vers la zone de l'air dense, provoquant ainsi la pluie. Le ciel sera ensoleillé lorsque l'air à basse pression entrera dans la zone, où l'air dense est présent (Ali et al., 2019). La température de l'air a un impact remarquable sur le confort thermique.

- **l'humidité relative** : L'humidité est définie comme "le nombre de vapeurs d'eau dans l'atmosphère". RH est un rapport entre la quantité de vapeur d'eau existante dans l'air et la vapeur d'eau maximale que l'air contient à cette température. L'air est dit saturé si l'humidité relative est de 100 % (Hadjioannou, 1987). L'humidité relative affecte le niveau de confort des usagers en affectant leur taux d'évaporation corporelle. L'HR est inversement proportionnelle à la température de l'air (Ali et al., 2019).

- **la vitesse de l'air** : Lorsque l'air se déplace d'une région de haute pression à une région de basse pression en raison d'un changement de température, il provoque ainsi la circulation des vents. La température de la surface de la terre augmente et diminue de manière inégale, générant différentes zones de pression atmosphérique qui fait circuler l'air de la zone de haute à basse pression atmosphérique (Ali et al., 2019). La vitesse de l'air est l'un des paramètres qui influent sur le niveau de confort thermique. Un mouvement d'air n'est en moyenne ressenti par une personne que si sa vitesse est supérieure à 0,25 m/s en été, à ce moment, il est considéré comme un courant d'air.

### **III.5 Résultats des mesures in situ**

Les mesures in-situ permettent de comparer dans un premier temps, les paramètres climatiques des cinq espaces urbains et déterminer l'espace présentant les meilleurs effets microclimatique. Ensuite comparer le microclimat de ces espaces avec les données prises au niveau de la station météorologique, afin de voir la variation climatique de la ville par rapport à la zone rurale. Enfin, nous utilisons ces mesures pour la validation du modèle de la simulation numérique (Envi-met), dans le chapitre suivant.

Les résultats des mesures in situ seront présentés sous forme de graphes. Pour chaque paramètre climatique, nous allons présenter dans un premier temps une comparaison entre les données mesurées dans le milieu urbain et les données de la station météorologique, qui se situe à 14 km de la zone d'étude. Ensuite nous allons faire une comparaison entre les espaces étudiés. Enfin, une comparaison entre les stations de mesure pour chaque espace public.

#### **III.5.1 Comparaison entre les points de mesure**

L'objectif de cette partie est de comparer entre les données mesurées au niveau de chaque point de mesure (voir 5.1) pour le même espace public, pour voir la variation des paramètres climatiques dans cet espace. On constate une différence notable au niveau du même espace public dans la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Cette différence n'est pas constante et varie dans la même journée de mesure et aussi change d'une journée à une autre. Cette variation est due à la multitude de facteurs incontrôlables influençant le microclimat à savoir ; la chaleur anthropique dégagée des véhicules...etc.

##### **III.5.1.1 Température de l'air**

Les graphes ci-dessus (graphe III-4 et graphe III-5) montrent la variation de la température de l'air et la différence entre les points de mesure, pour chaque placette. Le graphe III-4 présente les résultats d'El-Bouni. On voit qu'au niveau du cours d'El-Bouni, pendant les trois journées (le 29, 31 juillet et le 02 août 2019), les températures d'air les plus élevées sont enregistrées dans le premier point avec une moyenne de 32.3 °C , malgré la présence de la végétation, cela est peut-être dû à la proximité du trafic routier (rond-point). Alors que les points 03 et 04 enregistrent des températures plus basses (entre 31.5 °C et 31.4°C). Le deuxième point, là où on trouve une végétation plus dense, on remarque que la température est moyenne (31.8 °C). Dans

la placette El-Bouni, on note que la température du point de mesure 01 est supérieure à celle du point 02, sauf à 14h00

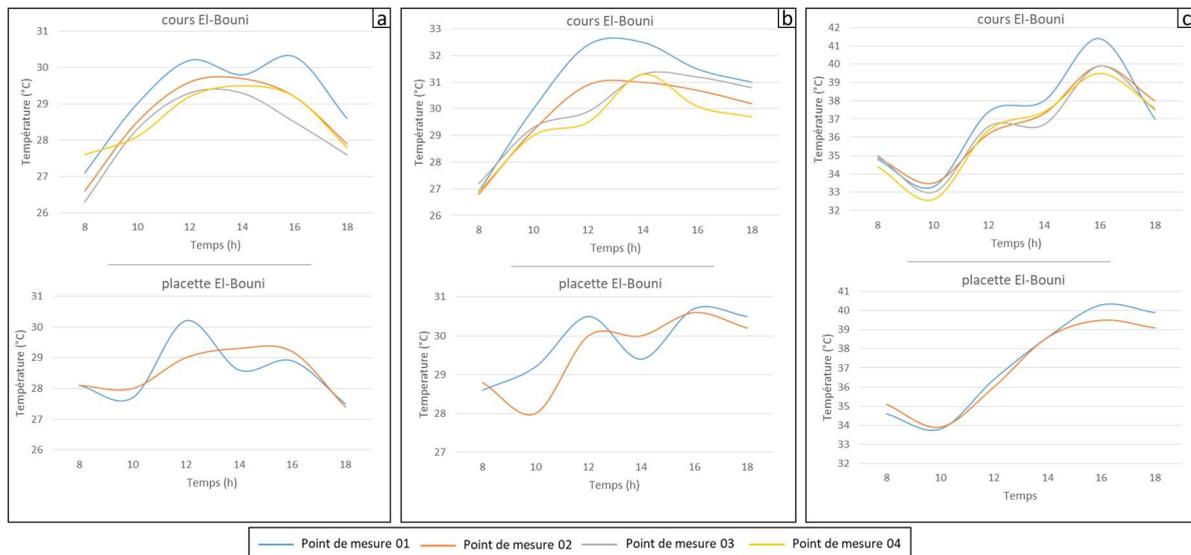


Figure III- 24: Graphe présentant une comparaison entre les températures enregistrées au niveau des points de mesures d'El-Bouni : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019

Le graphe III-5 montre les températures mesurées au niveau du centre-ville pendant les trois journées (le 28, 30 juillet et 01 août 2019). Dans le cours de la révolution, on voit que la température au niveau point 04 est la plus basse, on enregistre une différence atteignant 2.9 °C à midi entre les points 04 et 02 pendant le 30 juillet, et 1.8 °C entre les points 04 et 03 pendant le 28 juillet. On note aussi que le point 03 est le plus chaud pendant les trois journées de mesure, avec des températures qui peut arriver à 36°C. Le point 02, où on trouve une couverture végétale très dense, présente des températures d'air plus élevées que le point 04. Ce dernier comprend une végétation différente à celle du point 02, qui se caractérise par des arbres avec un tronc plus haut permettant une bonne circulation d'air et donc une température plus basse. Concernant la placette Alexis Lambert, pendant le 28 juillet et le 01 août, on voit qu'avant midi, le point 01 est plus chaud que le point 02 (une différence moyenne de 0.5°C), alors qu'après 13h00, le point 02 est le plus chaud (une différence moyenne de 0.4°C), et on remarque pendant le 30 juillet que le point 02 est plus chaud que le point 01 avec un écart moyen de 0.9°C. Au niveau de la placette de la vieille ville, on enregistre une légère différence entre les deux points, pendant le 28 juillet et le 01 août, contrairement au 30 juillet, où on note une différence significative à 12h00 d'environ 1.5 °C

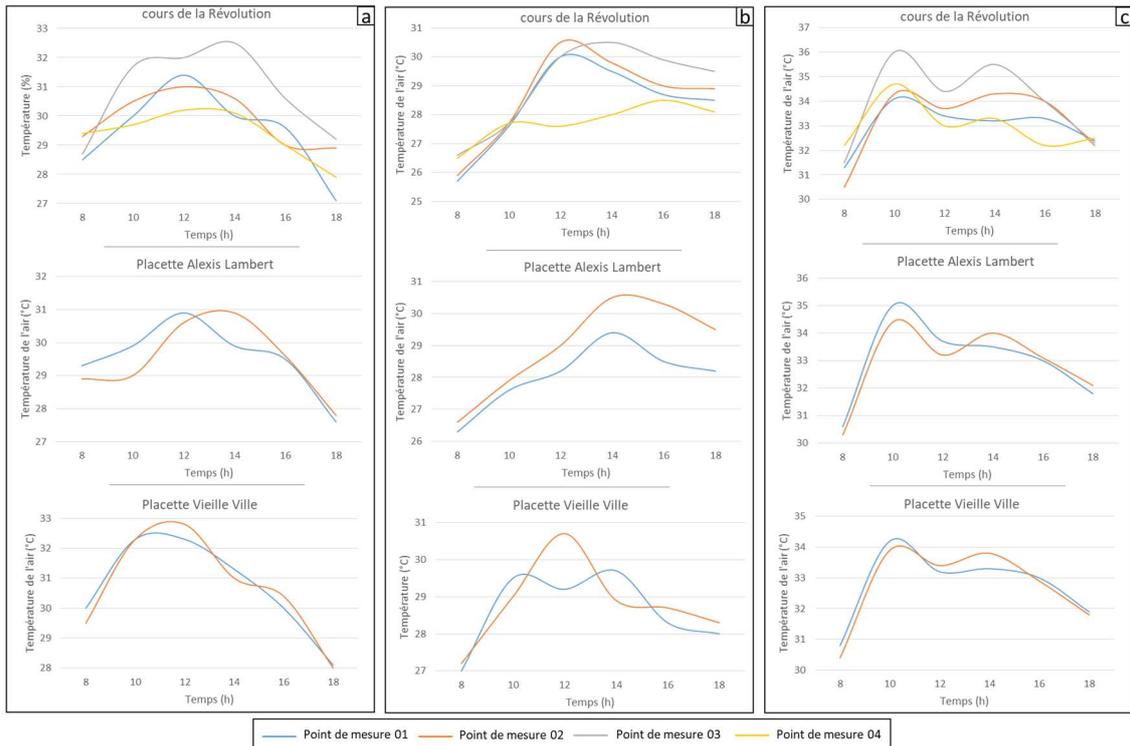


Figure III- 25: Graphe présentant une comparaison entre les températures enregistrées au niveau des points de mesures du Centre-Ville : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019

### III.5.1.2 L'humidité relative

Les graphes ci-dessus (graphe III-6 et graphe III-7) montrent la variation de l'humidité relative et la différence entre les points de mesure, pour chaque espace public. Le graphe III-6 présente les résultats d'El-Bouni. On voit au niveau du cours El-Bouni, que l'humidité relative du point 04 est la plus élevée pendant les trois journées de mesure, et malgré la présence de la végétation au niveau du point 02 mais on remarque que l'humidité est moins dense par rapport au point 04. Le point de mesure 01 bien qu'il est près de la végétation mais il présente des valeurs d'humidité les plus basses, cela s'explique par sa proximité aux surfaces bitumées embouteillées par le trafic routier. Au niveau de la placette El-Bouni, on note que dans le point 02, l'humidité est plus élevée que dans le point 01, à cause de la présence de la végétation et des surfaces en terre nu dans le point 02, alors que dans le point 01 on trouve moins de végétation.

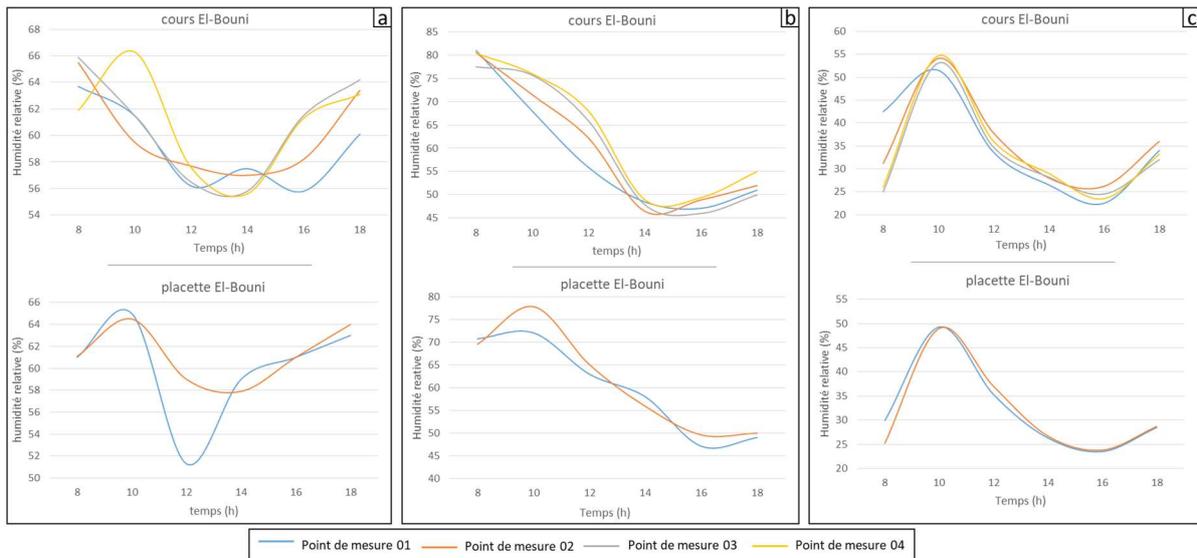


Figure III- 26: Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative enregistrées au niveau des points de mesure d'El-Bouni : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019

Le graphe III-7 affiche la variation de l'humidité relative mesurée au niveau du centre-ville pendant les trois journées (le 28, 30 juillet et 01 août 2019). Dans le cours de la révolution, durant la première journée, le 28 juillet, on voit que l'humidité relative au niveau du point 04 est la plus élevée même par rapport au point 02 qui se caractérise par une forte densité végétale, et on mesure des niveaux d'humidité plus bas au niveau du point 03 à cause de l'absence du végétal et la grande surface de béton dans cette partie du cours. Pendant la deuxième et la troisième journée de mesure, la différence entre les points de mesure n'est pas régulière, mais avec des valeurs élevées au niveau du point 04 surtout la période du midi, et des valeurs basses au niveau du point 03.

Au niveau de la placette Alexis Lambert, on remarque que le taux d'humidité dans le point 01 est plus élevé que celui dans le point 02 l'après-midi, et le contraire pendant le matin où l'humidité dans le point 02 est la plus élevée, mais pendant toute la journée du 30 juillet, le point 01 présente une humidité d'air plus élevée que le point 02. Dans la placette de la vieille ville, on note légère différence presque nulle pendant la première journée de mesure, et durant le 01 août, l'humidité au niveau du point 01 est plus élevée que dans le point 02.

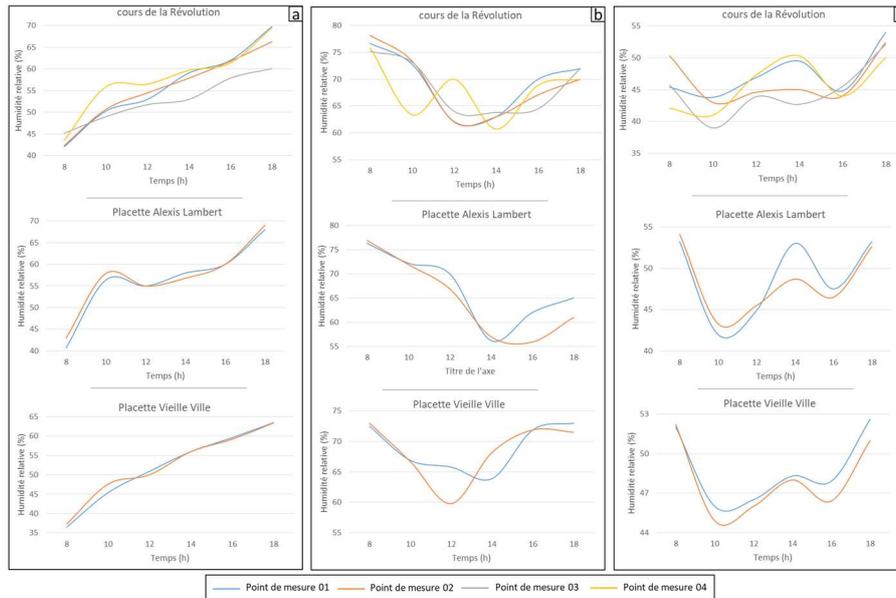


Figure III- 27: Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative enregistrées au niveau des points de mesure du centre-ville : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019

### III.5.1.3 La vitesse de l'air

Les graphes ci-dessus (graphe III-8 et graphe III-9) montrent la variation de la vitesse de l'air et la différence entre les points de mesure, pour chaque espace public. Graphe III-8 présente les résultats d'El-Bouni. On voit au niveau du cours El-Bouni, que la vitesse de l'air au niveau du point 01 et 02 est toujours la plus basse, cela est dû à la densité végétale. Alors que dans les points 03 et 04, on enregistre des vitesses d'air plus élevées à cause de l'absence des obstacles. Quant à la placette d'El-Bouni, on remarque que la vitesse du vent dans le point 02 est haute par rapport au point 01, pendant la première journée de mesure, et concernant les deux autres jours la différence dans la vitesse du vent devient chaotique.

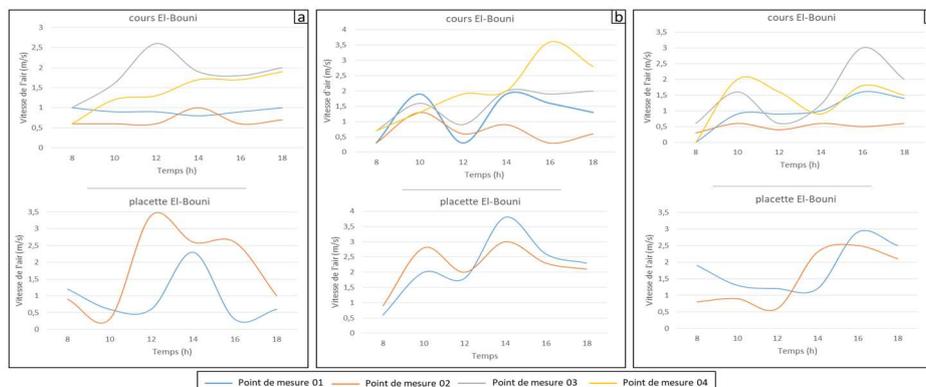


Figure III- 28: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent enregistrées au niveau des points de mesure d'El-Bouni : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019

Le graphe III-9 affiche la variation de la vitesse du vent mesurée dans les placettes du centre-ville pendant les trois journées (le 28, 30 juillet et 01 août 2019). Dans le cours de la révolution, la vitesse de l'air est plus élevée au niveau des points 04, et faibles au niveau du point 02 à cause de la présence de la végétation. Bien que le point 03 se situe dans un espace dégagé (absence de végétation et obstacles), mais la vitesse enregistrée dans ce point est faible par rapport au point 04 qui se caractérise par la présence des arbres. Concernant la placette Alexis Lambert, on enregistre des vitesses de vent plus élevées au niveau du point 02 par rapport au deuxième point, sauf à 14h00 où la vitesse de du vent au niveau du premier point devient plus faible. Pour la placette de la vieille ville pendant la première journée de mesure, on remarque que la vitesse du vent du deuxième point est plus élevée que celle du premier point. Il est important aussi de noter que la vitesse de l'air est en changement continu, et on ne peut pas la mesurer d'une façon très précise, mais on a essayé de déterminer approximativement les endroits les plus ventilé au niveau des espaces étudiés.

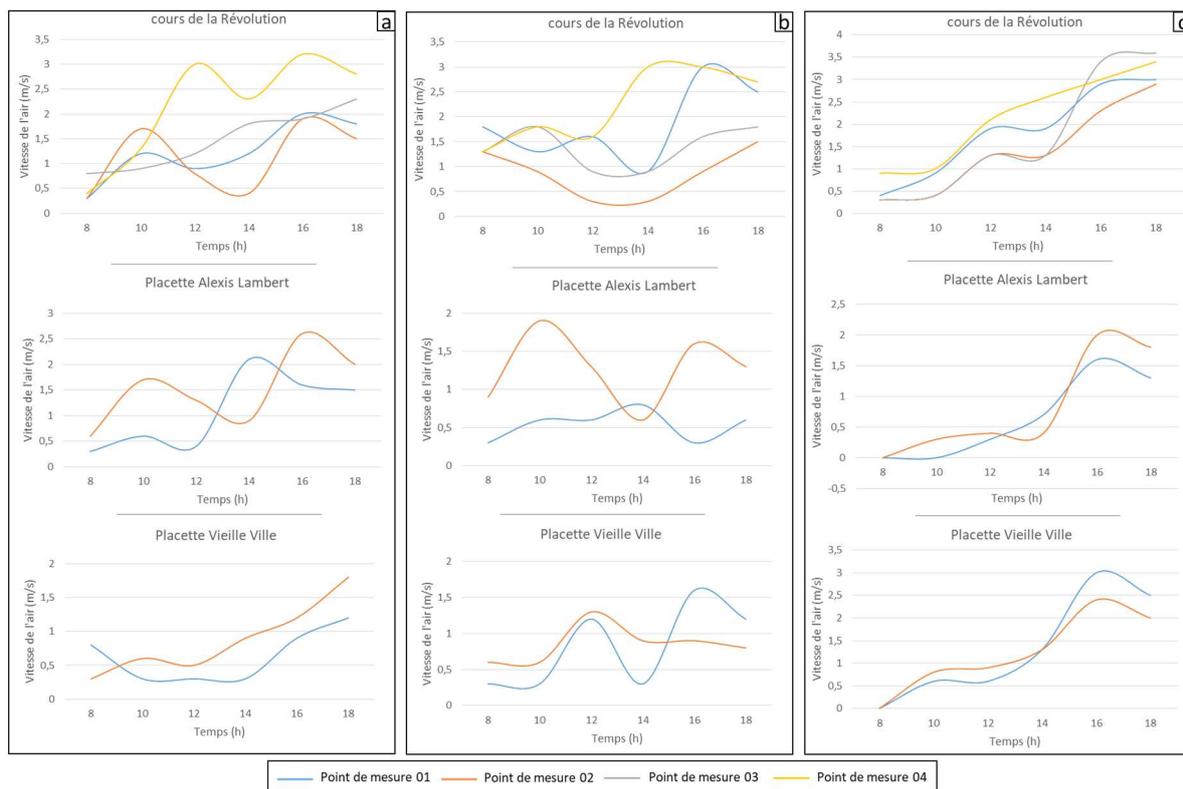


Figure III- 29: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent enregistrées au niveau des points de mesure du centre-ville : a) Vitesse de l'air mesurée le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019

### **III.5.2 Comparaison entre les espaces étudiés et la station météorologique**

L'objectif de cette partie est de comparer dans un premier temps entre les placettes étudiées, afin de déterminer la placette la plus confortable thermiquement. Ensuite comparer entre les placettes et les données de la station météorologique. Pour chacune des placettes, nous avons calculé la moyenne pour chaque paramètre climatique à partir des données mesurées sur terrain (les points de mesure sont expliqués dans 5.1). Il est important de mentionner que la comparaison est faite pendant trois jours de mesures et que chaque jour se caractérise par des conditions climatiques différentes (journées fraîches et journées chaudes). Nous avons constaté d'après la lecture des résultats, que la différence dans les paramètres climatiques entre les placettes étudiées varie d'une journée à une autre. On remarque que les placettes les plus favorables pendant les journées fraîches, deviennent les plus défavorables pendant les journées chaudes, et inversement. En plus on a constaté que les espaces denses sont plus confortables pendant la journée chaude que les espaces moins denses, et le contraire pendant les journées moins chaudes. Nous présentons dans ce qui suit, plus de détails, pour les trois paramètres climatiques.

#### **III.5.2.1 Température de l'air**

Les graphes ci-dessous (graphe III-10) montrent les températures enregistrées au sein d'El-Bouni et au niveau de la station météorologique, pour les trois journées de mesure. On remarque que pendant les deux journées fraîches (le 29 et le 31 juillet), les températures enregistrées au niveau de la placette et le cours sont supérieures aux températures de la station météorologique, avec un écart moyen de 2°C pendant le 31 juillet et 1.1°C le 29 juillet. On remarque aussi pendant ces deux journées que les températures enregistrées dans la placette El-Bouni sont plus basses que celles enregistrées dans le cours El-Bouni avec une différence moyenne de 0.2°C. Tandis que durant la journée chaude, on note que le cours El-Bouni présente des températures d'air plus basses que la placette, surtout à 14h00, où on enregistre une différence de 1.25 °C. On remarque aussi que lorsque la température d'air est très élevée au niveau de la station météorologique, on enregistre des températures plus basses au niveau de la placette et du cours.

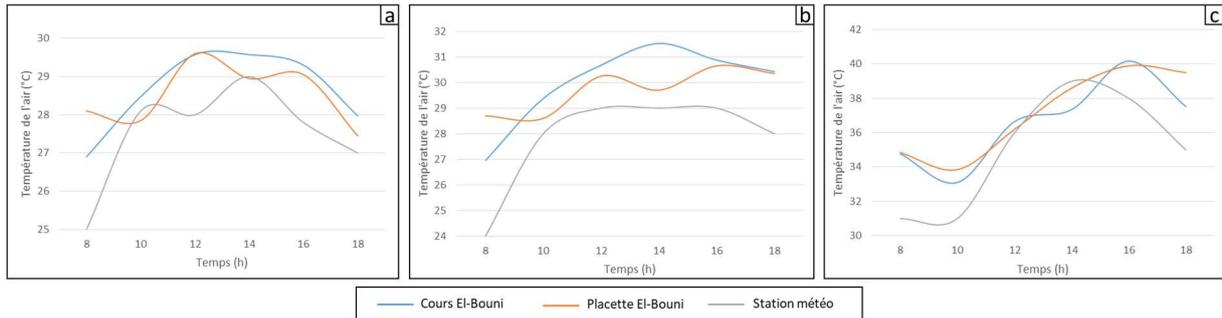


Figure III- 30: Graphe présentant une comparaison entre les Températures mesurées au niveau d'El-Bouni et les données de la station météorologique : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019

Concernant le centre-ville, les mesures ont été effectuées pendant une journée fraîche (le 30 juillet), une journée chaude (le 28 juillet) et une journée très chaude (le 02 Aout). Les graphes ci-dessous (graph III-11) présentent les températures enregistrées au niveau des placettes du centre-ville et la station météorologique. Durant la journée fraîche, on remarque que les températures d'air au niveau des placettes sont supérieures à celles de la station météorologique, où on note une différence moyenne de  $1.54^{\circ}\text{C}$  au niveau de la placette de la vieille ville et  $1.33^{\circ}\text{C}$  au niveau de la placette Alexis Lambert et  $1.26^{\circ}\text{C}$  au niveau du cours de la révolution par rapport aux données météorologique. Lorsque la température d'air est très élevée au niveau de la station météo, on enregistre des températures plus basses dans le milieu urbain, et inversement. Si on prend l'exemple de la journée du 28 juillet, où la température est basse le matin, on remarque que les placettes présentent des températures plus élevées, surtout au niveau de la placette de la vieille ville, où on enregistre un écart atteignant  $2.75^{\circ}\text{C}$  à 08h00. En outre, l'après-midi et pendant la même journée (le 28 juillet), où la température de la station météo commence à augmenter, on voit que la température des placettes commence à baisser avec  $-2.95^{\circ}\text{C}$  à 18h00. La journée du 01 Aout confirme cette observation. On remarque clairement que les températures enregistrées au niveau des placettes, sont plus basses que les températures de la station météo avec une différence atteignant  $2.7^{\circ}\text{C}$  à 12h00 au niveau de la vieille ville. La placette qui présente des températures plus basses est la placette de la vieille ville (température moyenne  $32.7^{\circ}\text{C}$ ) ensuite la placette Alexis Lambert (température moyenne  $32.9^{\circ}\text{C}$ ), ensuite le cours de la Révolution (température moyenne  $33.3^{\circ}\text{C}$ )

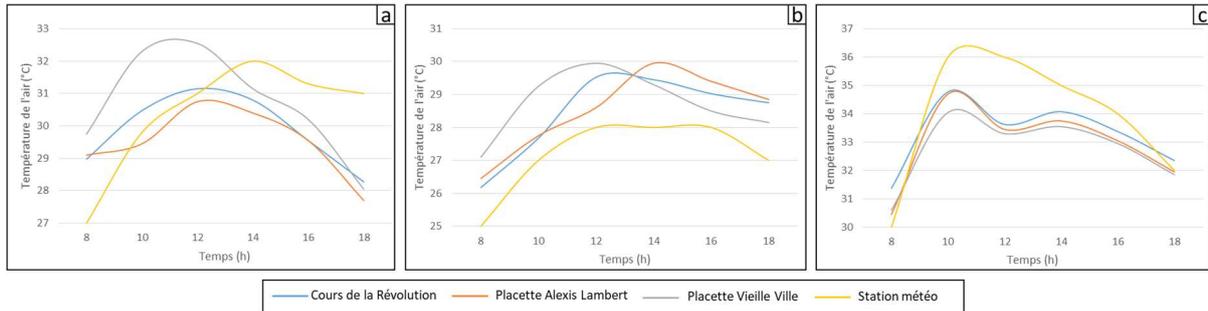


Figure III- 31 : Graphe présentant une comparaison entre les Températures mesurées au niveau du centre-ville et les données de la station météorologique : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019

### III.5.2.2 L'humidité relative

Les graphes ci-dessous (graphe III-12) montrent les valeurs de l'humidité relative enregistrées au sein d'El-Bouni et au niveau de la station météorologique, pour les trois journées de mesure. On remarque, pendant les deux journées fraîches (le 29 et le 31 juillet), que l'humidité de la station météo est supérieure à l'humidité enregistrée dans les deux placettes, et que l'humidité au niveau de la placette El-Bouni est supérieur à celle du cours, malgré que ce dernier possède une couverture végétale dense par rapport à la placette. Pendant la journée chaude (le 02 Aout), on note que le taux d'humidité relative au niveau du cours est supérieur à celui de la placette, mais reste toujours inférieur aux valeurs de la station météo, sauf pendant la période de 12h00 à 15h00, où on remarque que l'humidité est plus élevée dans les placettes que dans la station météorologique. La variation des taux d'humidité est liée au changement de température de l'air, lorsque la température baisse le taux d'humidité augmente, et vice versa.

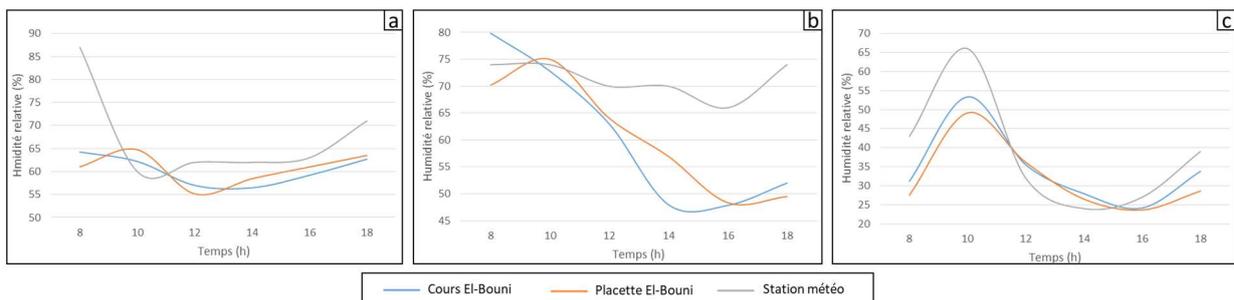


Figure III- 32: Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative mesurées au niveau d'El-Bouni et les données de la station météorologique : a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019

Concernant le centre-ville, les mesures ont été effectuées pendant une journée fraîche (le 30 juillet), une journée chaude (le 28 juillet) et une journée très chaude (le 02 Août). Les graphes ci-dessous (graph III-13) présentent les taux d'humidité relative enregistrés au niveau des

placettes du centre-ville et la station météorologique. Durant la journée fraîche et la journée moyennement chaude, on remarque que l'humidité de la station météo est supérieure à celle des placettes étudiées. Le 28 juillet, on voit que l'humidité dans la placette Alexis Lambert est la plus élevée par rapport au cours et la placette de la vieille ville. Et que cette dernière présente le taux d'humidité le plus bas. Alors que pendant le 30 juillet, l'après-midi, on remarque que l'humidité de la placette de la vieille ville est la plus élevée, et que dans la placette Alexis Lambert, l'humidité est la plus basse. En ce qui concerne la journée la plus chaude (le 01 Août), on voit clairement que le niveau d'humidité enregistré dans les placettes est plus élevé que celui de la station météo, et que la placette de la vieille ville maintient un niveau plus élevé que les deux autres placettes, sauf à 14h00, où on enregistre un taux d'humidité plus élevé dans la placette Alexis Lambert.

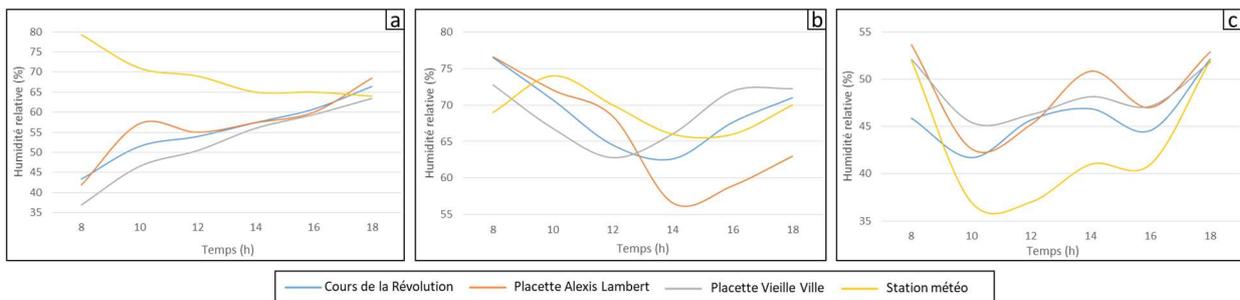


Figure III- 33 : Graphe présentant une comparaison entre l'humidité relative mesurée au niveau du centre-ville et les données de la station météorologique : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019

### III.5.2.3 La vitesse du vent

La vitesse de l'air, est un paramètre climatique important dans l'étude du confort thermique, mais reste difficile à mesurer sur le terrain. Notre objectif ici est de déterminer d'une manière approximative quel est la placette qui se caractérise par une vitesse d'air plus élevée. Dans notre cas, on ne peut pas comparer les données mesurées au niveau des placettes avec celles de la station météorologique, car la vitesse du vent au niveau de la station est prise à une hauteur de 10m. Donc Nous allons présenter ci-dessous (graphes III-14 et graphe III-15) les valeurs de la vitesse du vent enregistrées au sein d'El-Bouni et du centre-ville. Nous commençons par d'El bouni, on remarque que la vitesse du vent dans la placette est plus haute que celle au niveau du Cours, pendant les trois journées de mesure. On peut expliquer ça par la présence des obstacles au niveau du cours tel que ; les arbres, et le bâtiment en forme de barre, contrairement à la placette où on trouve moins d'obstacle (bâtiments isolés et peu d'arbres)

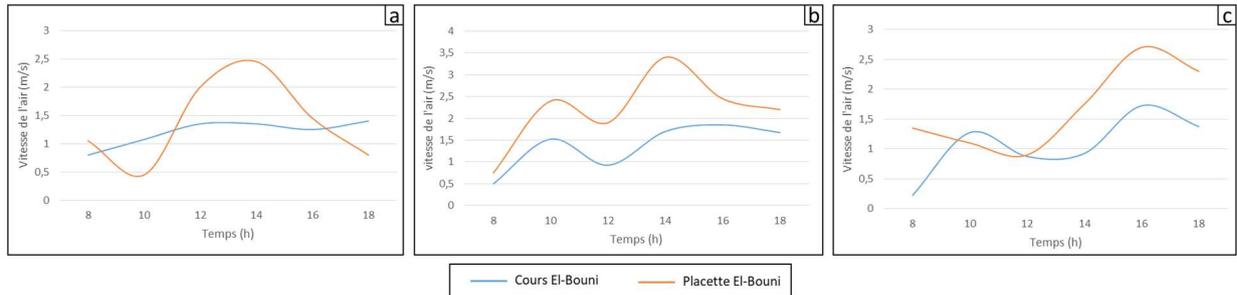


Figure III- 34: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent mesurée au niveau d'El-Bouni: a) le 29/07/2019, b) le 31/07/2019, c) le 02/08/2019

Concernant le centre-ville, on voit que la placette de la vieille ville présente des vitesses du vent basses, à cause de la densité du bâti et la sinuosité des rues qui donnent sur la placette. La même chose pour la placette Alexis Lambert, la vitesse du vent est basse par rapport au cours de la révolution, en raison de la forte densité végétale de cette placette. La présence d'un espace non végétalisé et dégagé ainsi que des arbres avec un tronc haut tel que le palmier dans la partie nord du cours permet une bonne circulation d'air et donc une vitesse plus élevée.

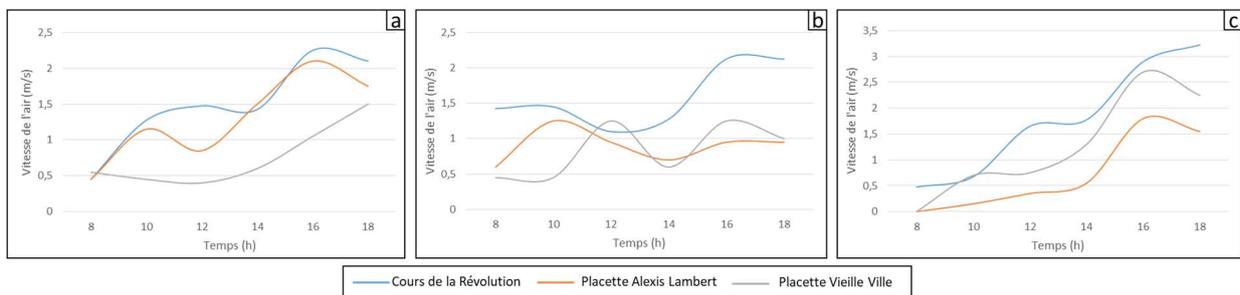


Figure III- 35: Graphe présentant une comparaison entre la vitesse du vent mesurée au niveau du centre-ville : a) le 28/07/2019, b) le 30/07/2019, c) le 01/08/2019

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le cas d'étude qui représente cinq places publiques situées dans la ville d'Annaba. Le Protocole et compagnes de mesure ont été présentés en détail. Des mesures de terrain ont été effectuées toutes les deux heures, de 8h00 à 18h00, pendant quatre jours. Une station de mesure mobile (Testo 480) a été utilisée, positionnée à 1,50 m au-dessus du sol. Les mesures ont été réalisées dans différents espaces publics, en tenant compte de la morphologie et de la densité de la végétation.

Pour les places de la Révolution et El-Bouni, quatre points de mesure ont été choisis le long de l'espace, représentant différents contextes tels que la proximité du trafic routier, les zones végétalisées et non végétalisées, ainsi qu'une zone avec une faible densité végétale. Pour les autres espaces étudiés, deux points de mesure ont été définis, un au centre de la placette et un autre au bord.

Les paramètres climatiques mesurés dans cette étude sont la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent, qui sont des facteurs directs influençant le confort thermique.

Les mesures montrent une différence notable au niveau du même espace public dans la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Cette différence n'est pas constante et varie dans la même journée de mesure et aussi change d'une journée à une autre. Cette variation est due à la multitude de facteurs incontrôlables influençant le microclimat.

En outre la comparaison entre les différentes places montre une différence dans les paramètres climatiques, cette différence varie d'une journée à une autre. On remarque aussi que les placettes les plus favorables pendant les journées fraîches, deviennent les plus défavorables pendant les journées chaudes, et inversement. En plus on a constaté que les espaces denses sont plus confortables pendant la journée chaude que les espaces moins denses, et le contraire pendant les journées moins chaudes.

Afin de comparer d'une manière plus précise entre ces places, nous avons eu recours à la simulation numérique qui permettra de fixer les conditions climatiques aux limites de l'espace. Le modèle utilisé dans cette recherche est Envi-met V5.0.2 qui sera présenté avec plus de détail dans le chapitre qui suit.

# **Chapitre IV : simulation numérique**

## Introduction

Les avancées dans le domaine des outils informatiques ont simplifié l'intégration de la simulation numérique de la dynamique des fluides (CFD) dans le processus de conception architecturale et urbaine, grâce à l'utilisation de plug-ins compatibles avec les logiciels de CAO. Ces plug-ins ont été regroupés en trois catégories distinctes : les simulations à objectif unique, les simulations à objectifs multiples et les simulations couplées. Les simulations à objectif unique ont été employées pour étudier la relation entre des conditions de microclimat spécifiques et les variables de conception. Les simulations à objectifs multiples se sont concentrées sur les flux d'air, la lumière naturelle et le rayonnement solaire, qui ont une incidence sur le confort thermique et la santé humaine. Les simulations couplées ont permis d'évaluer le confort thermique extérieur et la performance énergétique des bâtiments en combinant les données relatives au microclimat, à la vitesse du vent, à la température et à l'irradiante solaire à l'aide de plug-ins CFD et d'outils de simulation énergétique spécialisés (Hu et al., 2023)

La méthode de simulation numérique utilisée dans cette étude repose sur le modèle Envi-met V5.0.2. Dans ce chapitre nous présentons en premier temps le logiciel Envi-met, sa structure, son interface. Ensuite Nous expliquons le processus et la méthode de simulation.

La première phase de la simulation vise à valider le modèle en confrontant les données mesurées sur le terrain aux résultats de la simulation numérique, afin d'établir des lignes de régression et de calculer le coefficient de corrélation linéaire. Cette validation permet de vérifier l'exactitude du modèle.

La simulation numérique nous permet également de comparer entre les paramètres climatiques des espaces étudiés en fixant les mêmes paramètres d'entrée, tels que les conditions météorologiques et les matériaux de construction et de revêtement. En plus Nous comparons aussi les indices du confort thermique qui sont : le PET, le SET et l'UTCI.

## **IV.1 Présentation du modèle Envi-met**

ENVI-met est un modèle de dynamique des fluides computationnelle (CFD) qui s'appuie sur les équations RANS (équations de Navier-Stokes moyennées de Reynolds) pour résoudre le flux atmosphérique et le transfert de chaleur en milieu urbain. Ce modèle a été initialement développé par Bruse lors de son travail de thèse en Allemagne à la fin des années 1990 (Bruse et Fler, 1998). Le logiciel est basé sur un modèle de microclimat holistique en trois dimensions. Il génère des calculs de microclimat et analyse les effets des mesures d'aménagement sur le climat urbain.

Les équations RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) représentent un système d'équations essentiel pour décrire le mouvement des fluides turbulents. Elles sont au cœur de la mécanique des fluides numérique, permettant ainsi de simuler de manière précise les écoulements turbulents. Ces équations fournissent le cadre de référence indispensable pour modéliser les phénomènes turbulents dans ce domaine. Pour les résoudre, diverses techniques numériques sont utilisées, telles que les méthodes des différences finies, des éléments finis ou des volumes finis, souvent associées à des modèles de turbulence pour intégrer les effets turbulents dans les calculs. Dans l'industrie, l'approche basée sur les équations RANS est privilégiée dans les logiciels de simulation en raison de sa rapidité de calcul comparativement à d'autres méthodes disponibles.

L'outil ENVI-met a été choisi à cause de sa capacité de simuler le microclimat urbain tout en tenant compte d'un éventail relativement complet de facteurs (formes de construction complexes, différents types de végétation et matériaux, etc.). Le rendement à haute résolution généré par cet outil qui peut arriver à 0.5 m, et qui comprend la température de l'air, du sol et de la surface, l'humidité de l'air et du sol, la vitesse et la direction du vent, la température moyenne radiante, les flux de rayonnement à ondes courtes et à ondes longues, les particules de gaz et de nombreux autres facteurs météorologiques importants. Aussi on peut calculer à l'aide du Bio-met les indices de confort thermique tel que PET, SET, UTCI, PMV et PET. Nous avons utilisé dans cette recherche, la version ENVI-met 5.0.2.

### **IV.1.1 Structure générale du logiciel**

ENVI-met est un modèle non hydrostatique tridimensionnel adapté à la simulation des interactions surface-plante-air dans les environnements urbains. Il s'agit d'un modèle à petite

échelle avec un pas de temps compris entre 1 et 10 secondes et une résolution qui varie de 0,5 à 10 m, pour la longueur de la grille (x) et la largeur (y). La hauteur des grilles (z) peut être supérieure à 10 m. ENVI-met calcule la dynamique du microclimat pendant un cycle diurne (24 à 48 heures) en utilisant les lois fondamentales de la dynamique des fluides et de la thermodynamique (Hussein ELNABAWI et al., 2013). La figure IV-1 donne un aperçu du flux de données au sein de l'ENVI-met (Maleki et al., 2014).

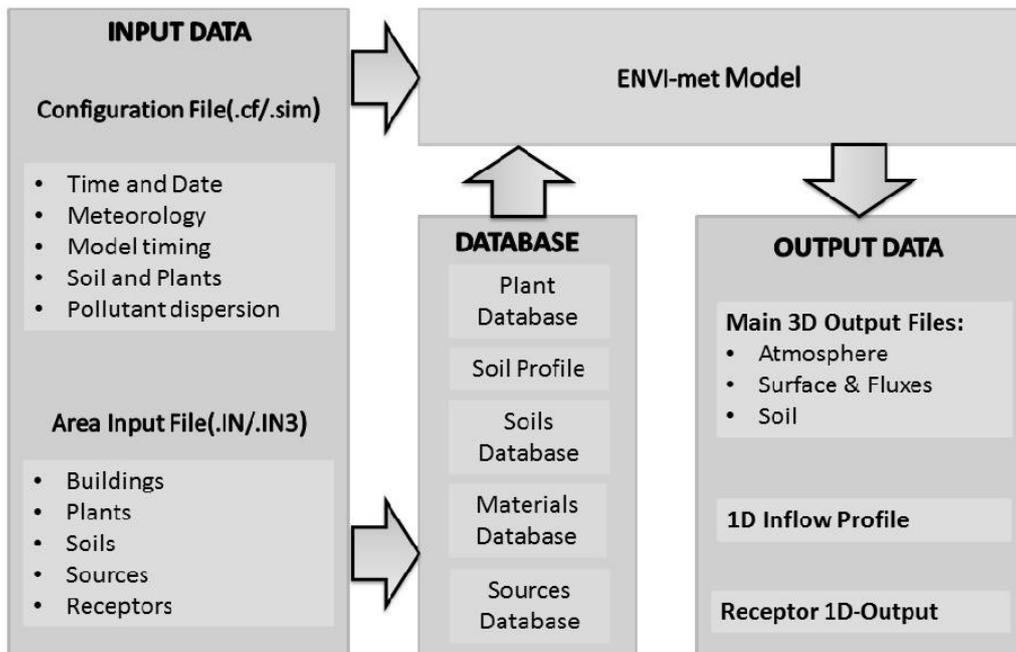


Figure IV- 1: Vue d'ensemble du flux de données au sein de l'ENVI-met. Source : (Maleki et al., 2014).

#### IV.1.2 Interface et mise en page du logiciel (Envi-met 5.0.2)

Envi-met se compose de plusieurs Applications, principales et complémentaires. Le démarrage de ces applications se fait à partir de « Headquarter » figure IV-2 le Headquarter est une sorte de base qui permet un accès facile aux différents programmes d'Envi-met. A partir de là, on peut naviguer vers tous les programmes dont on pourrait avoir besoin dans le processus de modélisation et de simulation, commençant par la configuration du projet, la création de base de données de matériaux personnalisée, la numérisation de la zone de modèle, le démarrage de la simulation, et enfin, la visualisation et le traitement des résultats .

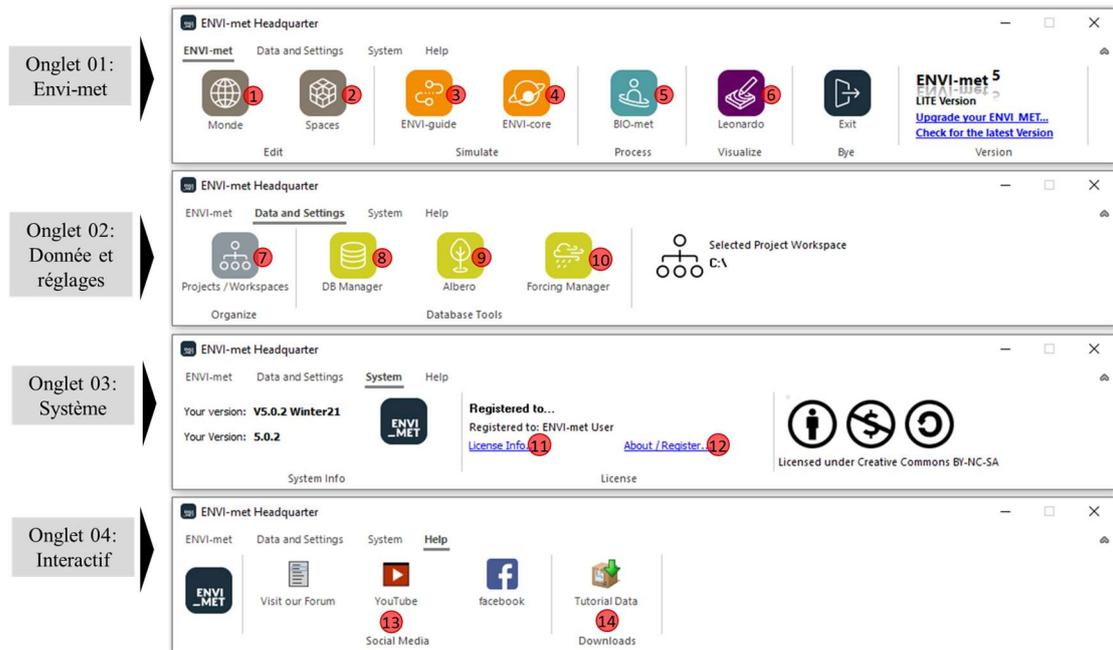


Figure IV- 2: les composants du Headquarter d'Envi-met 5.0.2. Source : Logiciel Envimet, traité par l'auteur

L'interface du Headquarter est divisée en quatre onglets : ENVI-met, Données et réglages, Système et Interactif :

**L'onglet 01 (ENVI-met)**, comprend les outils essentiels pour simuler, éditer, visualiser et post-traiter le modèle de simulation :

-**MONDE (1) et SPACES (2)** sont les outils utilisés pour numériser la zone d'étude. MONDE permet de charger des fichiers de forme ou créer des propres formes pour la zone d'étude. L'outil SPACES permet de créer et d'éditer la zone de modèle dans la structure cellulaire typique de l'environnement ENVI-met. Dans notre cas, le modèle 3D de la zone d'étude a été modélisé à l'aide du logiciel (Sketch-up) puis converti à l'aide de l'extension (ENVI-metINX plugin<sup>6</sup>).

-**L'ENVI-guide (3)** ; permet de définir les paramètres de la simulation selon trois niveaux différents. Le niveau de base qui permet d'ajuster les conditions météorologiques initiales, tandis que les niveaux supérieurs permettent de choisir parmi une multitude de paramètres avancés. En sortie, ce programme crée le fichier de simulation (\*.SIMX) nécessaire pour lancer une simulation.

-**ENVI\_core (4)** ; est le cœur du logiciel ENVI-met. Avec ce programme, la simulation est lancée en fonction des options définies dans les autres programmes. Les résultats de ce programme sont sauvegardés au format EDX/EDT.

<sup>6</sup> ENVI-metINX est le plugin Sketchup mis à jour pour la modélisation 2.5D avec ENVI-met V5, qui a été développé dernièrement par Antonello di Nunzio.

-**BIO-met (5)** ; L'outil de post-traitement offre des options pour calculer les Indices de Confort Thermique Humain à partir des fichiers de sortie du modèle ENVI-met. Différentes options sont disponibles en fonction du type de licence.

-**Leonardo (6)** ; La dernière application de cet onglet, permet de créer des cartes 2D ou 3D et de traiter et analyser les résultats de la simulation.

**L'onglet 02 (Donnée et réglages)**, fournit un raccourci vers les programmes dont on peut avoir besoin avant de commencer le processus de numérisation et/ou de simulation.

-**Le gestionnaire d'espace de travail (7)** ; permet de définir un espace de travail différent ou d'organiser les projets actuels.

-**Le gestionnaire de base de données (8)** ; permet de créer et de modifier des matériaux personnalisés et de consulter les attributs des éléments dans la base de données du système. Tous les éléments utilisés dans la modélisation, tels que les matériaux, les murs, les sols, les plantes simples, les sources, etc. peuvent être trouvés et adaptés ici.

-**Albero (09)** ; utilisé pour la modélisation des plantes en 3D. On peut rechercher des modèles existants ou créer des nouvelles plantes.

-**La fonction du gestionnaire de forçage (10)** ; est de créer des fichiers de forçage complets à partir de données mesurées ou de fichiers météorologiques courants tels que les fichiers \*.EPW- ou \*.TRY. Le fichier de forçage créé peut ensuite être utilisé dans la simulation en définissant le forçage complet comme condition limite latérale dans le fichier \*.SIMX.

**L'onglet 03 (Système)**, comporte des informations sur la version actuelle d'ENVI-Met et le type de licence sont données. On peut également y enregistrer une nouvelle licence **(11)** et gérer la licence actuelle **(12)**.

**L'onglet 04 (interactif)**, permet de se connecter aux réseaux sociaux, et rejoindre le forum d'utilisateurs afin de naviguer, de discuter avec d'autres utilisateurs et l'équipe de développement du logiciel, aussi il donne accès à la chaîne YouTube **(13)** et il donne un accès rapide à la zone de téléchargement du site web **(14)**.

## **IV.2 Processus et méthode de simulation**

Nous allons présenter dans cette partie le processus, et la méthode de simulation adoptée pour la présente étude. La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Envi-met pour calculer les paramètres microclimatiques (température, humidité, température radiante moyenne) et les indices de confort thermique les plus appropriés (PET, SET et UTCI).

L'objectif de la simulation numérique, dans un premier temps, était de comparer les données de mesure sur le terrain avec les résultats de la simulation afin de vérifier la précision du logiciel et de valider le modèle numérique. Puis de comparer entre les placettes étudiées (présentées dans le chapitre précédent) lors de la journée la plus chaude qui est le 01 août 2019. Une simulation avec et sans végétation a été réalisée dans le but d'évaluer l'impact de la géométrie urbaine et de la végétation au niveau de ces espaces, sur le microclimat et le confort thermique. Le processus de simulation est résumé dans un diagramme présenté dans la figure IV-3.

Le diagramme synthétise les étapes de la simulation. Ces étapes peuvent être regroupées sous trois étapes principales : première étape est la préparation des données d'entrée, qui se base sur la modélisation 3D de la zone d'étude et la préparation du fichier de configuration. Deuxième étape qui est la simulation et la dernière étape traitement des données de sortie et l'analyse des résultats.

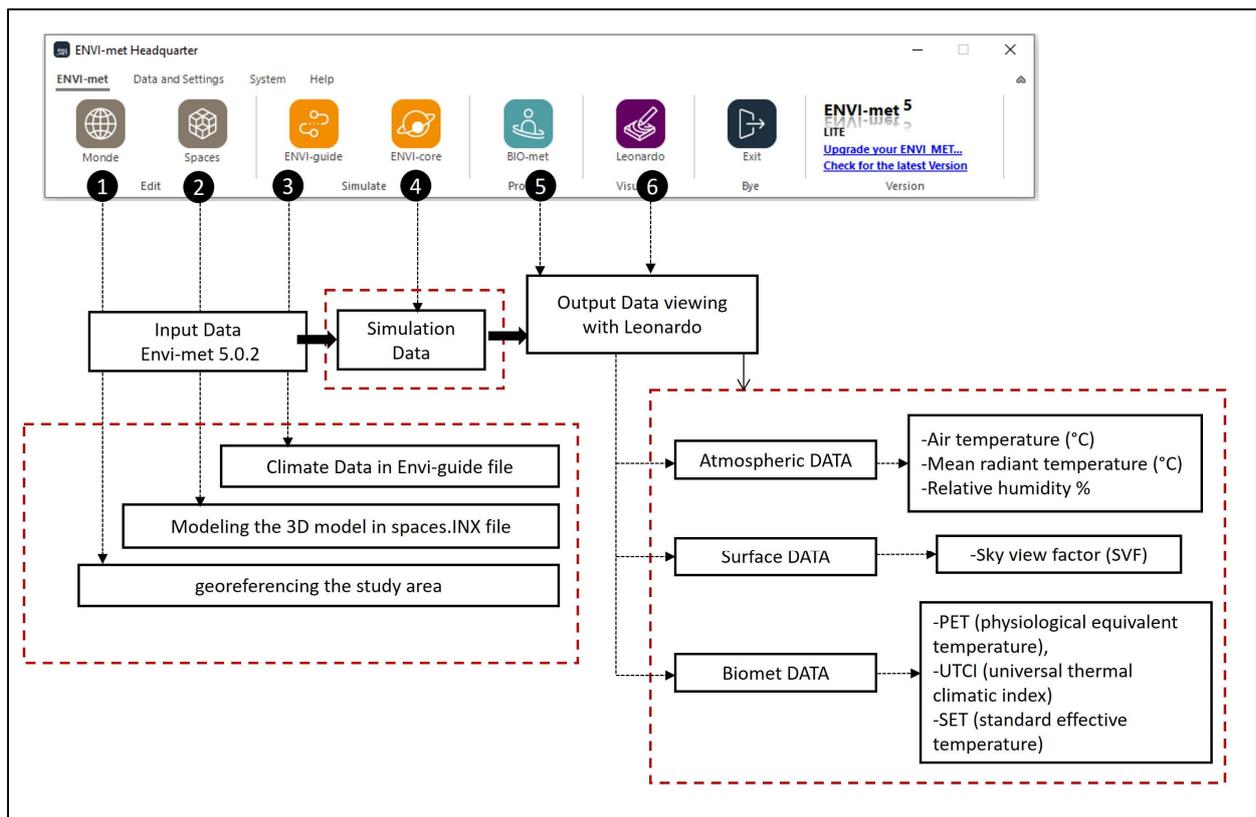


Figure IV- 3: Diagramme du processus de simulation Envi-met

### IV.2.1 Données d'entrée : modèle 3D et fichier de configuration

Les données d'entrée regroupent le modèle 3D et le fichier de configuration. La modélisation 3D de l'état de lieu des placettes est faite à l'aide du logiciel Sketchup 2021. Toutes les données

concernant la hauteur de bâtiments et l'occupation de sol ont été récupéré des POS de la commune d'Annaba et d'El Bouni. En plus, des cartes Autocad et des images satellitaires récupérées de Google Earth, ont été insérées dans Sketch-up. Dans cet étape on a déterminé la taille est la résolution de la grille, le type et les dimensions de la végétation, traitement du sol, et l'emplacement des récepteurs, ainsi que le géo-référencement de la zone d'étude pour déterminer la bonne orientation. La figure IV-4 montre l'interface du logiciel Sketch-up avec le plugin ENVI-metINX, utilisé dans la modélisation du cours El-Bouni.



Figure IV- 4:L'interface du Logiciel Sketch-up avec le plugin ENVI-met INX. Source : Auteur

Concernant le fichier de configuration qui se trouve au niveau de l'onglet «Envi-guide» présenté dans la figure IV-5, on a intégré les données suivantes : Nom de la simulation, noms des fichiers entrées/sorties et emplacement des fichiers de sorties, la date et le temps de la simulation. Les conditions limites météorologiques utilisé dans cette simulation est le « Simple Forcing» les données sont récupérées de la station météorologique : vitesse du vent, température de l'air, et l'humidité relative le tableau IV-1 montre les données d'entrée de cette simulation.

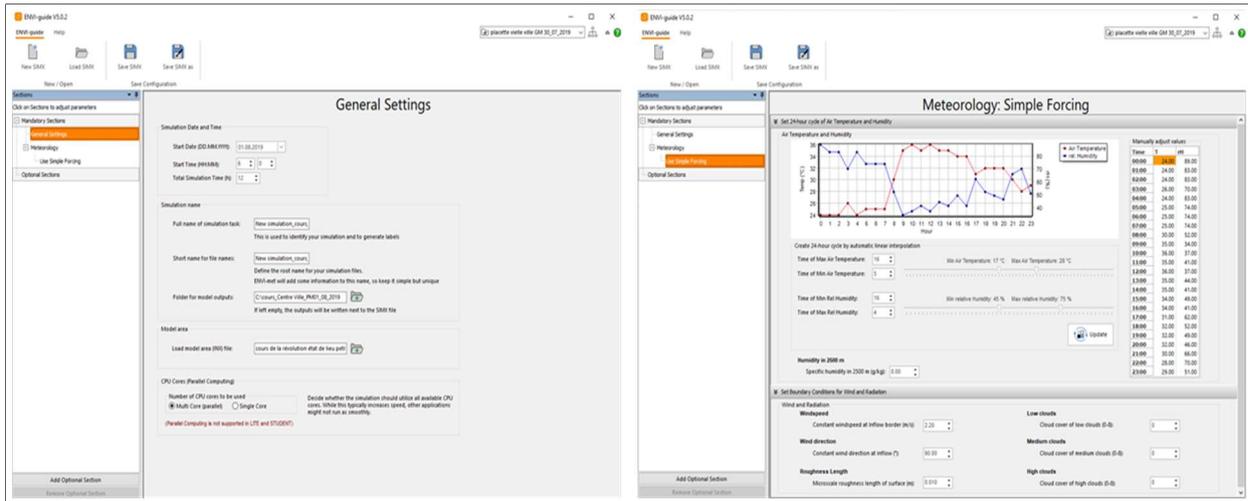


Figure IV- 5: exemple de données d’entrée dans le fichier de configuration. Source : Auteur

Tableau IV- 1: les données d’entrée de la simulation. Source : Auteur

Input file	Settings	Le cours El-Bouni	La placette El-Bouni	Le cours de la révolution	La placette Alexis Lambert	La placette Vieille ville
ENVI-guide	simulation date	29/07/2019 et 02/08/2019			28/07/2019 et 01/08/2019	
	Simulation time	06h:00 ~ 18h:00				
	Conditions météorologiques aux limites	« Simple forcing » en intégrant les données de la station météorologique du 29/07/2019 et 02/08/2019			« Simple forcing » en intégrant les données de la station météorologique du 29/07/2019 et 02/08/2019	
Spaces	Grille	Dimension: (117×227×40) m Résolution: (1×1×2) m	Dimension: (112×110×40) m Résolution: (1×1×2) m	Dimension: (108×319×40) m Résolution: (1×1×2) m	Dimension: (84×82×20) m Résolution: (1×1×2) m	Dimension: (83×82×20) m Résolution: (1×1×2) m
	Matériau de pavage	Road: Asphalt (0100 ST) Curb: Pavement concrete used/dirty (0100 PP) Ground: loamy soil (000000)		Road: Asphalt (0100 ST) Curb: Pavement concrete used/dirty (0100 PP) Ground: loamy soil (000000)		Road: Asphalt (0100SF) Curb: Pavement concrete used/dirty (0100PP) and Concrete pavement gray (0100PG)
	Matériau de Batiment	Wall: default brick aerated (0100B1) Roof: concrete wall (0100C1)		Wall: Brick reinforced (0100B3) Roof: tuile roofing terracotta (0100R2)		Wall: default brick burned (0000B2) Roof: tuile roofing terracotta (0100R2)
	Végétation	Ficus, deciduous tree and palm	deciduous tree and Ficus	Ficus and palm	Ficus	deciduous tree and Ficus
	récepteur	04	02	04	02	02

### IV.2.2 Fichiers de sortie

Les fichiers de sortie exploités dans cette simulation sont : « Atmospheric DATA » contenant les données des paramètres climatiques étudiés, et qui sont la température et la vitesse de l’air, l’humidité relative, et la température moyenne radiante. « Surface DATA » fournissant le facteur de vue du ciel (SVF). « Bio-met DATA », pour le calcul des indices de confort thermique qui sont le PET, le SET et l’UTCI. Le fichier « RECEPTOR » pour récupérer toutes ces données sous forme de tableaux Excel. Ensuite, nous avons utilisé LEONARDO pour la visualisation et le traitement des cartes.

### IV.3 Validation du modèle Envi-met

La confrontation des résultats de mesure avec les résultats de la simulation, permet de vérifier l'exactitude du modèle Envi-met. Nous allons comparer dans un premier temps les résultats de la simulation et les résultats mesurés pendant quatre jours de mesure pour chaque placette indépendamment : le 28 juillet et le 01 Août au niveau du centre-ville, le 29 et le 02 Aout au niveau d'El-Bouni. Ensuite, Nous calculons le coefficient de détermination R2, afin de mesurer la précision du modèle. D'après les résultats on remarque qu'au niveau des placettes d'El-Bouni le modèle donne des valeurs plus précises par rapport au centre-ville. On remarque aussi, que l'écart entre les données mesurées et les données de la simulation diminue au fur et à mesure que le temps de simulation avance.

#### IV.3.1 Place du cours de la révolution

Au niveau du cours de la révolution, pendant la journée du 28 juillet, on remarque que le modèle ENVI-met surestime la température de l'air après 12h00 pour le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> point de mesure, où on remarque un écart moyen de 1.1°C. Dans le 3<sup>ème</sup> point, on note que les températures simulées sont inférieures à celles mesurées avec une moyenne de 1.4°C. Pour l'humidité, on remarque que les valeurs mesurées sont supérieur à celles du modèle Envi-met sur tous les points de mesure et tout en long de la journée, cette différence est d'une moyenne de 4.2%. Cela peut être expliqué par la proximité étroite de la mer du cours. Pendant 01 aout 2019 qui est une journée plus chaude que la précédente, les températures d'air simulées sont supérieures à celles mesurées dans les points de mesure 01, 02 et 04 à partir de 10h00, la différence est de 1°C en moyenne. Au niveau du récepteur 03, à partir du 14h00 la température mesurée est presque la même température prévue par ENVI-met. D'autre part on note que l'humidité relative mesurée est supérieure à celle de la simulation sur tous les récepteurs et pendant toute la journée. On remarque aussi, que l'écart entre les données mesurées et les données de la simulation diminue au fur et à mesure que le temps de simulation avance (figureIV-6).

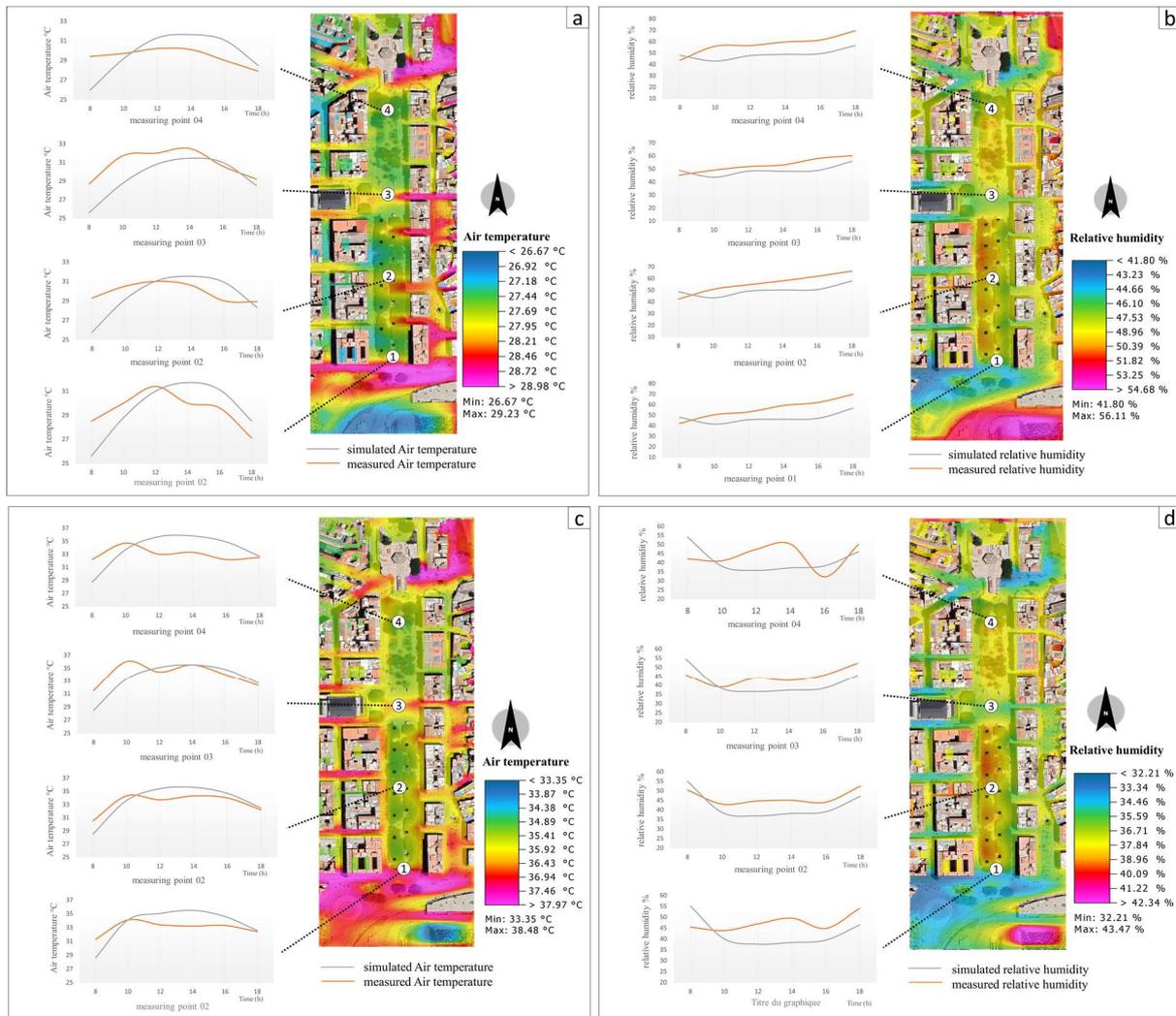


Figure IV- 6: Comparaison entre données mesurées et simulées dans le cours de la Révolution : a) Tair le 28 juillet 2019. b) HR le 28 juillet 2019. c) Tair le 01 Aout 2019. d) HR le 01 Aout 2019.

### IV.3.2 Place Alexis Lambert

Au niveau de la placette Alexis Lambert, pendant la journée du 28 juillet 2019, on remarque que le modèle ENVI-met surestime la température de l'air après 12h00, où on remarque un écart moyen de 0.9°C. Pour l'humidité, on remarque que les valeurs mesurées sont supérieures à celles du modèle Envi-met sur tous les points de mesure et tout en long de la journée, cette différence est d'une moyenne de 6.5%. Cela peut être expliqué aussi par la proximité étroite à la mer et la négligence des autres sources d'humidité dans la simulation. Pendant le 01 août 2019 (journée plus chaude que la précédente), après 11h00, on remarque que les températures d'air simulées sont supérieures à celles mesurées sur les deux points de mesure 01 et 02, la différence est de 1.3°C en moyenne. D'autre part on note que l'humidité relative mesurée est supérieure à celle de la simulation sur tous les récepteurs et pendant toute la journée avec une différence moyenne de 6.4 °C (figure IV-7).

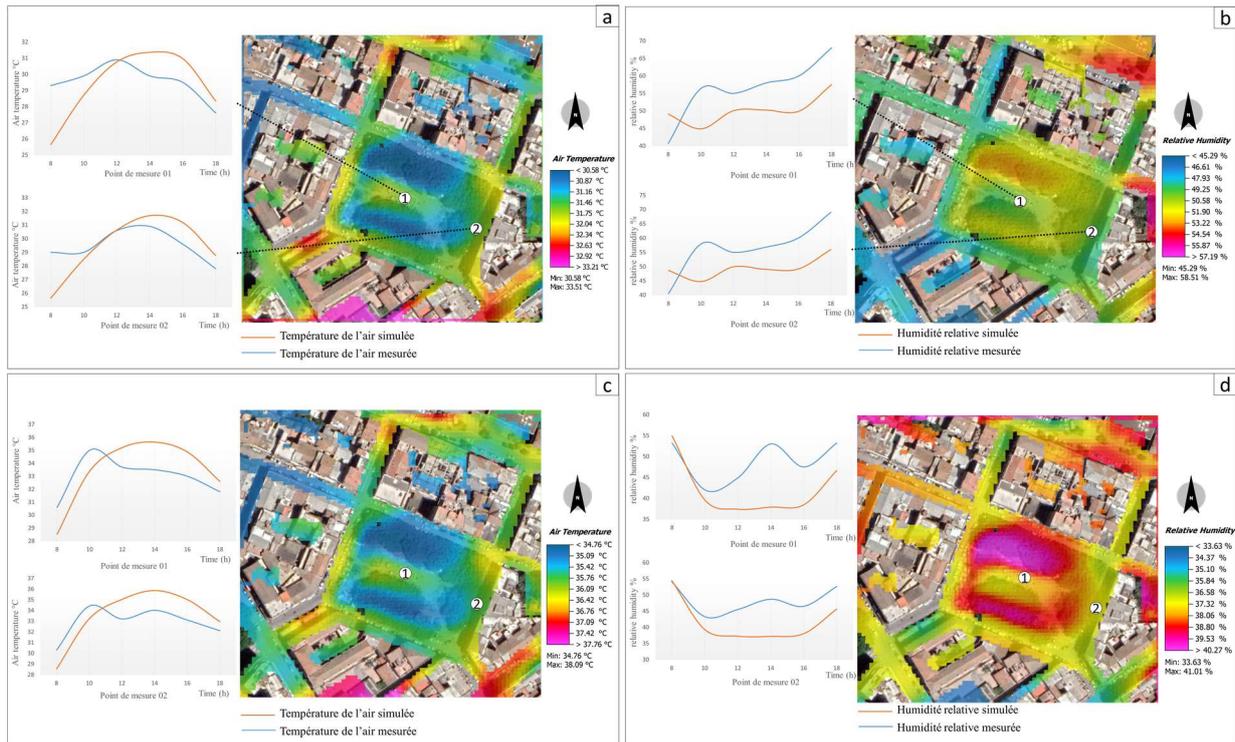


Figure IV- 7: Comparaison entre données mesurées et simulées dans la placette Alexis Lambert : a) Tair le 28 juillet 2019. b) HR le 28 juillet 2019. c) Tair le 01 Aout 2019. d) HR le 01 Aout 2019.

### IV.3.3 Placette de Vieille Ville

Concernant la placette de la Vieille ville, durant la journée du 28 juillet 2019 qui est une journée plus fraîche que celle du 01 Aout, on remarque que le modèle ENVI-met Sous-estime la température de l'air avant midi, où on remarque un écart moyen de  $1.7^{\circ}\text{C}$ , et pendant l'après-midi de la même journée il surestime la température de l'air avec une différence moyenne de  $0.6^{\circ}\text{C}$ . Pour la deuxième journée (le 01 Aout) à partir de 10h00 Envi-met surestime la température de l'air avec un écart de  $1.8^{\circ}\text{C}$ . On constate donc, que pendant la journée fraîche les résultats d'envi-met sont plus proche aux résultats de mesure. En ce qui concerne l'humidité, on remarque que les valeurs mesurées sont supérieur à celles du modèle Envi-met sur les deux points de mesure et tout en long de la journée, cette différence est d'une moyenne de  $3.1\%$  pour la première journée et  $6.8\%$  durant la deuxième journée de mesure. Cela peut être expliqué la négligence de la proximité de la placette à la mer dans le processus de la modélisation (figure IV-8).

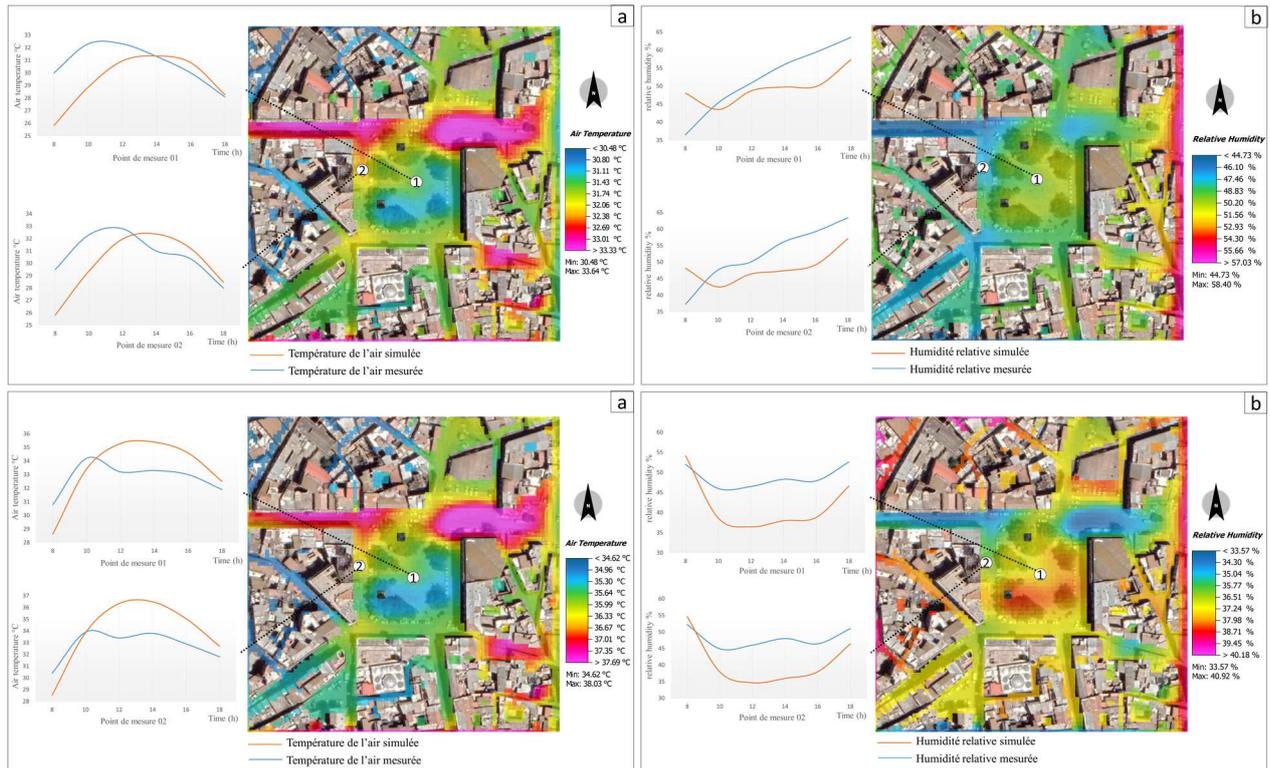


Figure IV- 8: Comparaison entre données mesurées et simulées dans la placette de la vieille ville: a) Tair le 28 juillet 2019. b) HR le 28 juillet 2019. c) Tair le 01 Aout 2019. d) HR le 01 Aout 2019.

### IV.3.4 Place du Cours El-Bouni

Après avoir comparé la valeur de la température de l'air du modèle ENVI-met et la valeur de la température de l'air mesuré au niveau du cours El-Bouni, nous avons constaté que, pour les mesures avant 13h00 pendant la journée du 29 juillet 2019, la Tair des mesures in situ, au niveau du point de mesure 03 était plus élevée que la température simulée avec une moyenne 1.3 °C, mais après 13 :00 le modèle ENVI-met surestime la Tair avec une moyenne de 0.5°C. Au niveau du point de mesure 02 et 04 avant 14h00 on remarque que la température enregistré est supérieure à celle de la simulation avec une moyenne de 1.6 °C, cet écart devient nul après 14h00. Concernant le premier point de mesure, les Tair de la simulation est toujours inférieur aux Tair mesurées. Pour l'humidité relative pendant la même journée, on note qu'après 10h00 le modèle ENVI-met sous-estime l'humidité relative sur les quatre point de mesure avec une moyenne de 2.2 % pour les points de mesure 01 et 02, et une moyenne de 3.3% pour les points de mesure 03 et 04. Pendant la deuxième journée de mesure au niveau de la placette d'El-Bouni (02 Aout 2019) qui est une journée relativement plus chaude que celle du 29 juillet (10°C de différence), on remarque que, les températures de l'air enregistrées sur tous les points de mesure, sont supérieures à celles du modèle envi-met avec un écart moyen de 1.8°C. Cet écart devient presque nul à 14h00 et atteint ses sommets à 08h00 et à 16h00. En

contrepartie, on voit que les résultats de la simulation concernant l'humidité relative sont plus proches des données de mesures pendant cette journée sur tous les points de mesure sauf pour le 3eme point. On remarque que l'écart entre les données mesurées et les données de la simulation diminue au fur et à mesure que le temps de simulation avance (figure IV-9).

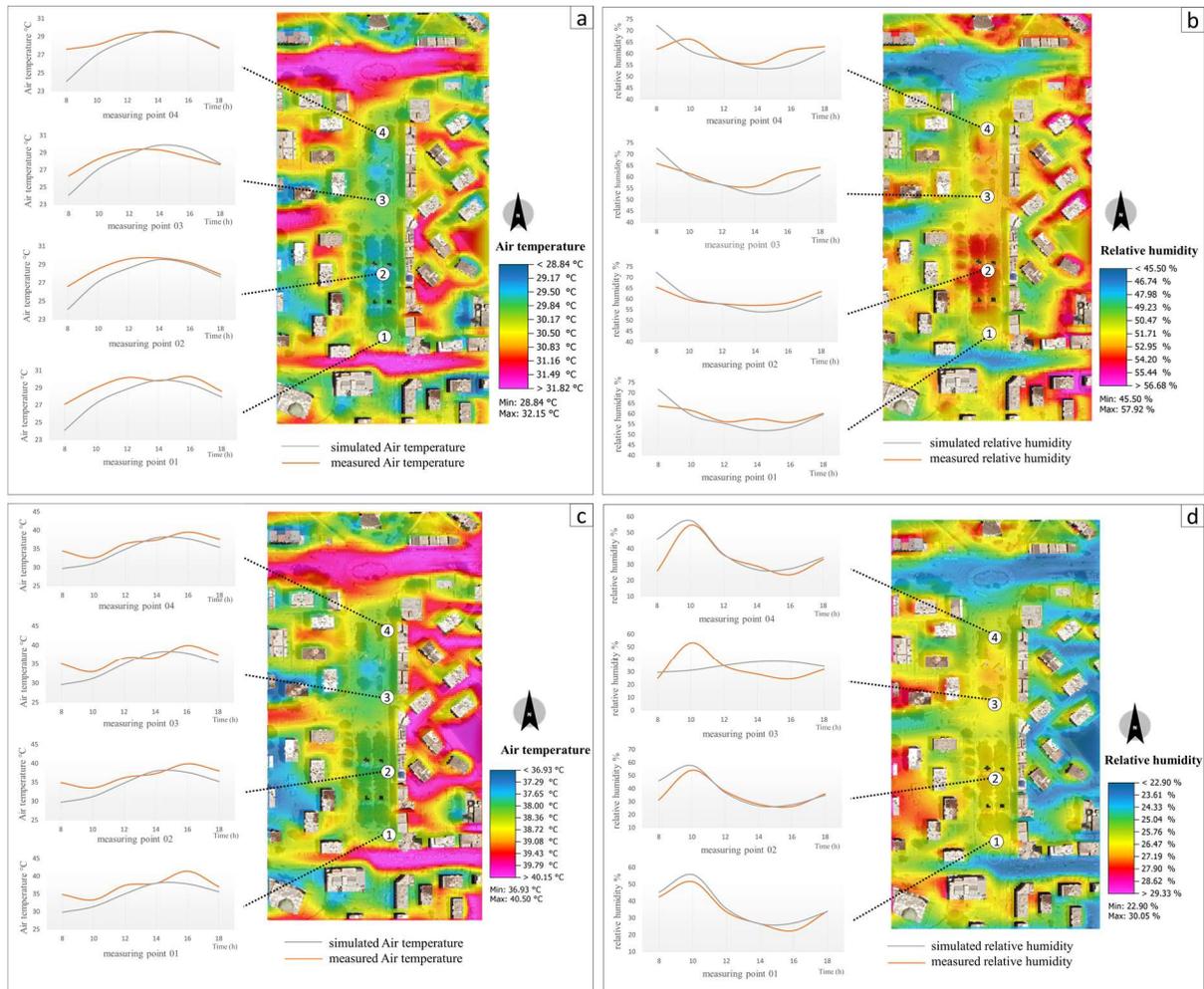


Figure IV- 9: Comparaison entre données mesurées et simulées dans le cours El-Bouni: a) Tair le 29 juillet 2019. b) HR le 29 juillet 2019. c) Tair le 02 Aout 2019. d) HR le 02 Aout 2019.

### IV.3.5 Placette El-Bouni

Dans la placette d'El-Bouni, on note qu'au début de la journée du 29 juillet 2019, que la Tair des mesures in situ, au niveau des deux points de mesure était plus élevée avec une moyenne de 1.4 °C, que les Tair du modèle ENVI-met. Mais l'après-midi le modèle ENVI-met surestime la Tair avec une moyenne de 0.9°C. Pour l'humidité relative pendant la même journée, on note que le modèle ENVI-met sous-estime l'humidité relative tout au long de la journée et sur les deux points de mesure avec une différence moyenne de 2.1 %. Pendant la deuxième journée de mesure (02 Aout 2019) qui est une journée relativement plus chaude que celle du 29 juillet

(10°C de différence), on remarque que, les températures de l'air enregistrées sur tous les points de mesure, sont supérieures à celles du modèle envi-met avec un écart moyen de 2°C. Cet écart devient presque nul à 14h00 et atteint ses sommets à 08h00 et à 16h00. L'humidité relative. Par contre les résultats de la simulation concernant l'humidité relative sont plus précis sur tous les points de mesure et pendant toute journée sauf son début. On remarque aussi que la précision du modèle concernant l'humidité relative augmente au fur et à mesure que le temps de simulation avance (figure IV-10).

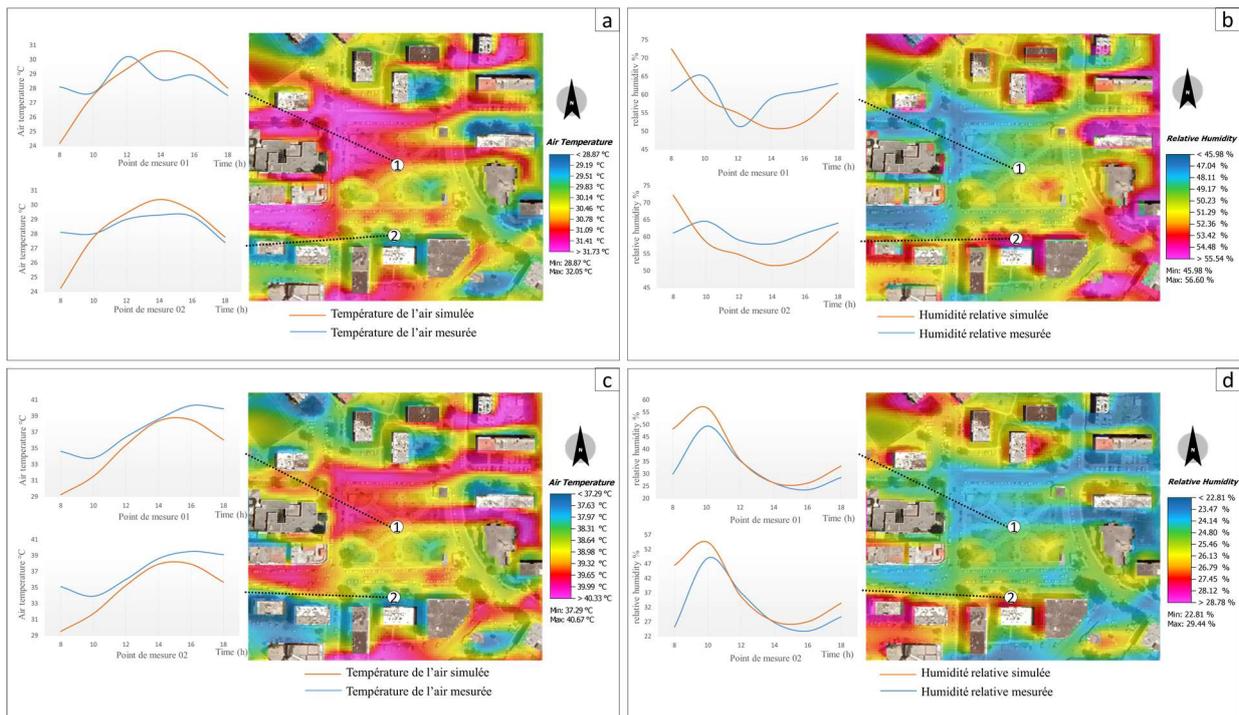


Figure IV- 10: Comparaison entre données mesurées et simulées dans la placette El-Bouni: a) Tair le 29 juillet 2019. b) HR le 29 juillet 2019. c) Tair le 02 Aout 2019. d) HR le 02 Aout 2019.

### IV.3.6 Calcul du coefficient de corrélation $R^2$

Pour récapituler, un coefficient de détermination  $R^2$  a été calculé pour la température de l'air et l'humidité relative dans les cinq placettes, pour voir la précision du modèle Envi-met (Tableau IV-2). On constate que le modèle donne des résultats plus ou moins proche des mesures sur terrain, surtout pour la placette et le cours d'El-Bouni,  $R^2= 0.80$  et  $R^2= 0.87$ , respectivement. Cette précision diminue pour les placettes situées au centre-ville,  $R^2= 0.70$  pour le cours de la révolution,  $R^2= 0.71$  pour la placette Alexis Lambert, et la placette de la vieille ville. En ce qui concerne l'humidité relative on enregistre une précision moins. Le tableau ci-dessous montre les graphes de régression linéaire pour chaque placette.

Tableau IV- 2: récapitulatif des graphes de régression linéaire pour chaque placette

	Température de l'air	Humidité relative
cours de la Révolution	<p><math>y = 0,9147x + 3,2259</math> <math>R^2 = 0,7003</math></p>	<p><math>y = 0,5753x + 15,743</math> <math>R^2 = 0,6304</math></p>
cours El-Bouni	<p><math>y = 0,9051x + 1,6223</math> <math>R^2 = 0,8703</math></p>	<p><math>y = 0,8426x + 8,4126</math> <math>R^2 = 0,8188</math></p>
placette El-Bouni	<p><math>y = 0,82x + 4,5792</math> <math>R^2 = 0,8085</math></p>	<p><math>y = 0,7618x + 12,784</math> <math>R^2 = 0,7553</math></p>
placette Vieille ville	<p><math>y = 1,0685x - 2,335</math> <math>R^2 = 0,7131</math></p>	<p><math>y = 1,0179x - 7,3216</math> <math>R^2 = 0,6796</math></p>
placette Alexis Lambert	<p><math>y = 1,2164x - 6,5714</math> <math>R^2 = 0,7103</math></p>	<p><math>y = 0,6085x + 15,286</math> <math>R^2 = 0,6022</math></p>

#### **IV.4 Résultats de la simulation :**

Les résultats de la simulation seront présentés sous forme de cartes et graphes pour chaque placette, complétés par des commentaires analytiques, visant à assimiler le microclimat au niveau des placettes étudiées. Ensuite Nous allons comparer entre des différents points, répartis sur l'ensemble de la placette. Ces points (récepteurs) sont situés au même endroit des points de prise de mesure sur terrain, expliqué dans le chapitre précédent. Nous commençons par les paramètres climatiques, ensuite les indices de confort thermique.

##### **IV.4.1 Les paramètres climatiques**

Comme on a expliqué préalablement dans la méthode de simulation, les paramètres climatiques sélectionnés pour la lecture du microclimat sont : la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température moyenne radiante. Chaque placette sera abordée indépendamment.

###### **IV.4.1.1 Place du cours de la révolution :**

Les cartes ci-dessous, montrent les résultats de la simulation numérique dans le cours de la révolution à 14h00.

**-La vitesse du vent :** d'après la carte (Figure IV- 11 (a)), on remarque que les rues orientées Est-Ouest, sont plus exposé aux vents, contrairement aux rues orientées Nord-Sud. Les rues orientées Est-Ouest et qui donnent sur la placette, constituent des ouvertures d'aération pour le cours. On note aussi une différence dans la vitesse du vent au niveau du cours, c'est-à-dire que la vitesse du vent est plus élevée aux les endroits ouvert vers les rues orienté Est-Ouest. Le graphe Figure IV- 12 (a) montre la variation de la vitesse du vent pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que le point 04 présente la plus grande vitesse, ensuite le point 03, à cause de l'absence des obstacles. On enregistre aussi au niveau du point 01 une vitesse élevée malgré la présence de la végétation, ceci est dû à l'ouverture de cet espace vers une rue (Est-Ouest).

**-La température de l'air :** selon la carte présenté dans la Figure IV- 11 (b) on voit que la partie nord de la place est plus fraîche que la partie sud, bien que la densité végétale au niveau de cette partie soit plus élevée que la partie nord. Cette différence est due à la variation dans la morphologie du tissu qui entoure la placette, là où il y a plus d'espace ouvert, on trouve des

températures plus élevées, ce qui influe sur la température de la placette. On remarque aussi que les rues orienté est-ouest sont plus chaudes que les rues orienté Nord-Sud, ce qui modifie aussi la température au niveau de la place. Il est clair que l'orientation des rues et l'ouverture de l'espace au niveau du tissu ont un impact sur la température de l'air de la place. Le graphe Figure IV- 12 (b) montre aussi la variation de la température de l'air pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que les points qui présentent des températures plus élevées sont les points 02 et 04, alors que les températures basses sont enregistrées au niveau des points 01 et 03.

**-L'humidité relative :** la carte (Figure IV- 11 (c)) montre le taux d'humidité simulé au niveau du cours de la révolution à 14h00. On voit que la présence de la végétation a participé fortement à l'augmentation du niveau d'humidité et surtout au niveau de la partie sud de la place. On remarque aussi que le côté Est de cette partie présente un taux d'humidité plus bas, à cause de son ouverture sur un espace urbain moins dense que le côté ouest. Cette ouverture est faite par des petits tronçons de rues perpendiculaires à la place. Le graphe Figure IV- 12 (c) montre la variation du taux d'humidité pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que les points 01 et 02 présentent un taux d'humidité plus élevé que les deux autres points

**-La température moyenne radiante :** la carte (Figure IV- 11 (d)) montre la température moyenne radiante simulée au niveau du cours de la révolution à 14h00. On remarque clairement l'impact de la végétation sur la diminution de la Tmrt. Dans les espaces non ombragés la température moyenne radiante peut atteindre 61°C. La baisse de température est beaucoup plus importante là où se situe la végétation, où on enregistre une baisse de 16°C. On constate que la Tmrt varie en fonction de l'ombre que ce soit créé par la végétation ou par l'ombre portée des bâtiments. Le graphe Figure IV- 12 (d) montre la variation de la Tmrt pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que la Tmrt dans le point 01 et 02 reste la plus basse le long de la journée, grâce à l'ombre créé par la végétation, alors que le point 03 présente des niveau de Tmrt très élevé durant toute la journée, à cause de l'exposition permanente au soleil, et concernant le point 04, on voit que la température baisse et augmente au cours de la journée, suivant la présence ou non de l'ombre.

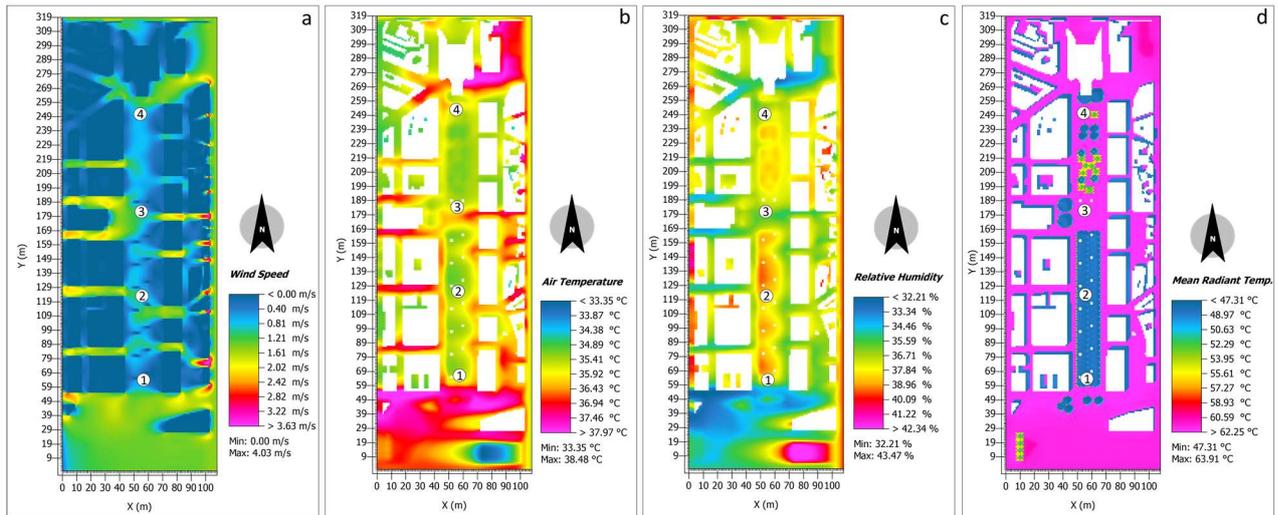


Figure IV- 11: Carte des paramètres climatiques au niveau du cours de la révolution. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

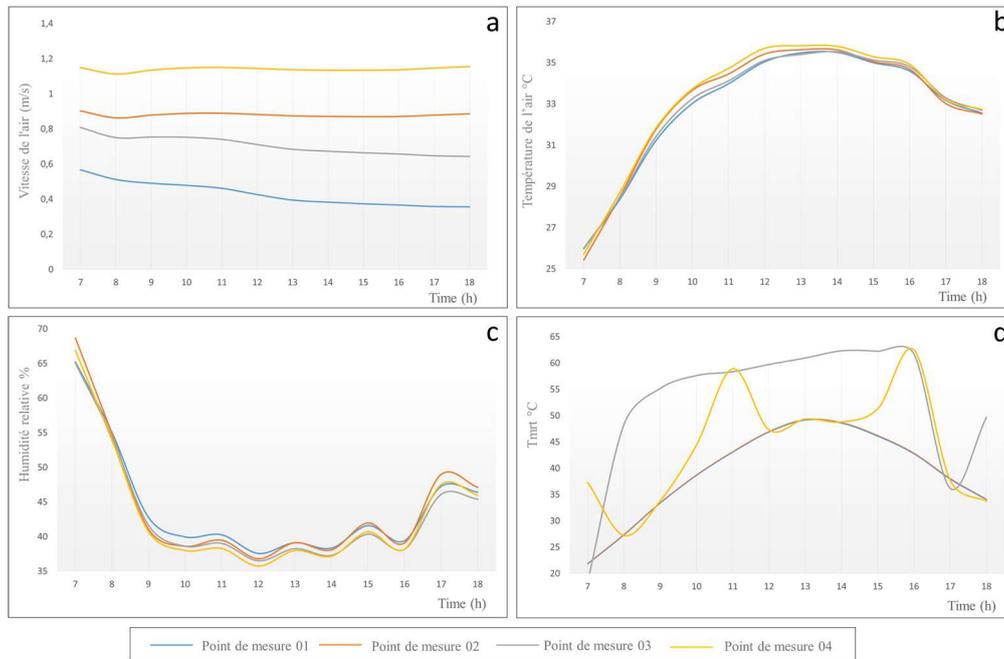


Figure IV- 12: Graphe de la variation des paramètres climatiques au niveau du cours de la révolution. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

#### IV.4.1.2 Placette Alexis Lambert

La carte (Figure IV- 13), montre les résultats de la simulation numérique dans Placette Alexis Lambert à 14h00.

**-La vitesse du vent :** d'après la carte (Figure IV- 14 (a)), on remarque que la vitesse de l'air est presque nulle au niveau de toutes les rues qui entourent la placette, à cause de la densité du bâti. Ce dernier constitue un obstacle pour le vent, diminuant ainsi sa vitesse. En outre, la vitesse

du vent au centre de la placette la vitesse du vent est plus importante malgré la forte présence de l'arbre du Ficus très dense, mais il permet une certaine circulation d'air. Le graphe (Figure IV- 14 (a)) montre la variation de la vitesse du vent pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que le point 01 qui se situe au centre de la placette présente la une vitesse élevée, alors que le point 02 qui se trouve à l'extrémité de la placette enregistre une vitesse très basse.

**-La température de l'air :** selon la carte présentée dans la figure IV- 15 (b) on voit que la zone végétalisée de la placette est plus fraîche que les autres espaces. En plus, on remarque que les rues orientées NO-SE sont plus fraîches que les rues orientées NE-SO (à 14h00). Donc l'élément qui participe à l'amélioration de la température de l'air dans cette placette est bien la végétation et l'orientation des rues qui entourent la placette. Le graphe (Figure IV- 14 (b)) montre aussi la variation de la température de l'air pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque qu'avant 12h00 le point 01 présente des températures plus élevées que le point 02. Alors que l'après-midi, le point 02 est le plus chaud.

**-L'humidité relative :** la carte (Figure IV- 16 (c)) montre le taux d'humidité simulé au niveau de la placette Alexis Lambert à 14h00. On voit que la présence de la végétation a participé fortement à l'augmentation du niveau d'humidité au centre de la placette. On remarque aussi que les rues orienté NO-SE présentent un taux d'humidité plus élevé que les rues orienté NE-SO. Le graphe (Figure IV- 14 (c)) montre la variation du taux d'humidité pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que le point 01 présente un taux d'humidité plus élevé que le deuxième point.

**-La température moyenne radiante :** la carte (Figure IV- 17 (d)) montre la température moyenne radiante simulée au niveau de la placette Alexis Lambert à 14h00. On remarque nettement l'impact de la végétation et l'ombre sur les niveaux de la Tmrt. Dans les espaces non ombragés la température moyenne radiante peut atteindre 63°C. La baisse de température est beaucoup plus importante là où se situe la végétation, où on enregistre une baisse de 15°C. Le graphe (Figure IV- 14 (d)) montre la variation de la Tmrt pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque qu'au niveau du point 01 la Tmrt est très élevée durant toute la journée, à cause de l'exposition permanente au soleil. La Tmrt dans le point 02 reste la plus basse le long de la journée, grâce à l'ombre créé par le bâti, sauf de 13h00 à 15h00, elle devient plus haute que celle enregistré dans le point 01 à cause de la disparition de l'ombre.

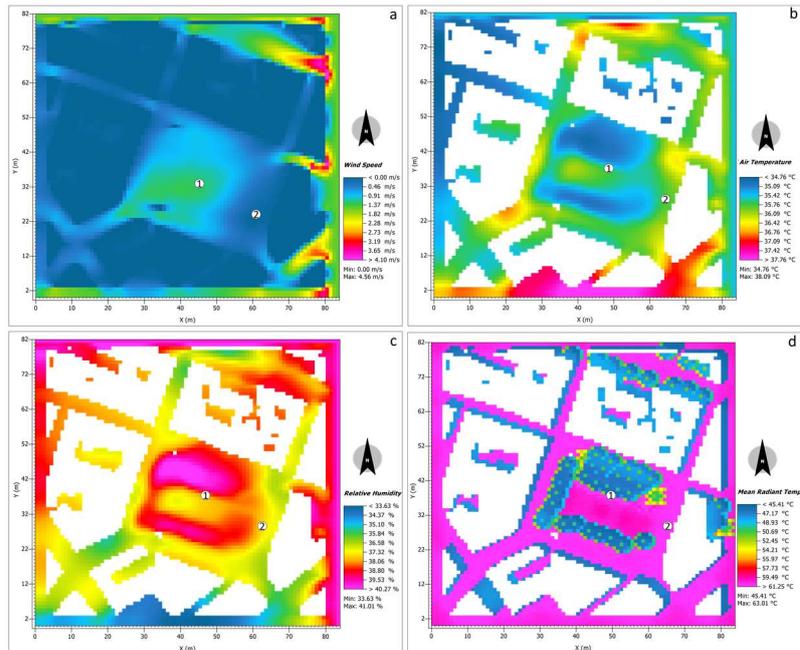


Figure IV- 18: Carte des paramètres climatiques au niveau de la placette Alexis Lambert. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

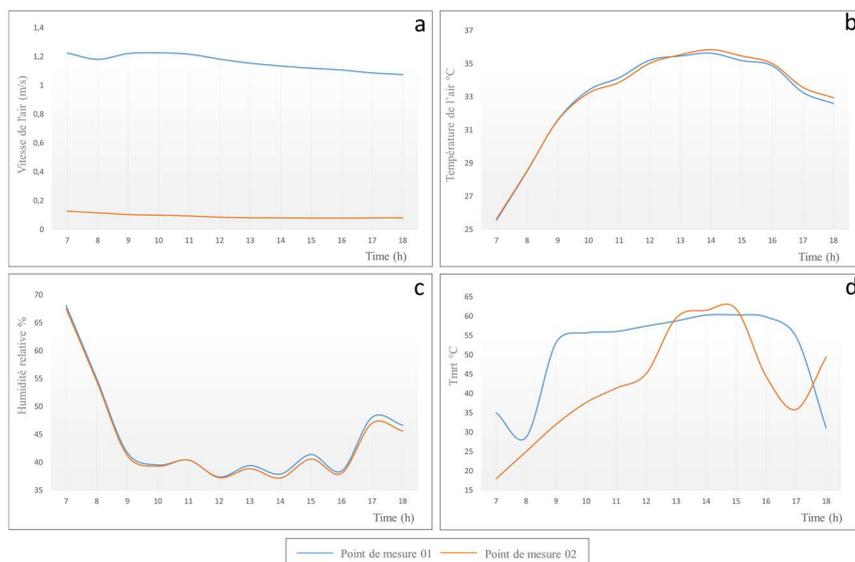


Figure IV- 19: Graphe présentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette Alexis Lambert. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

#### IV.4.1.3 Placette Vieille Ville

Les cartes (Figure IV- 15), montrent les résultats de la simulation numérique dans Placette de la vieille ville à 14h00.

**-La vitesse du vent :** d'après la carte (Figure IV- 15 (a)), on remarque que la vitesse de l'air est presque nulle au niveau toute les rues qui entourent la placette, et c'est à cause de la densité du bâti et à la sinuosité des rues, à l'exception d'une rue droite orientée Est-Ouest qui se

distingue par une vitesse de vent élevée. Au centre de la placette la vitesse du vent moyenne est presque nulle à son extrémité. Le graphe (Figure IV- 16 (a)) montre la variation de la vitesse du vent pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que le point 01 qui se situe au centre de la placette présente une vitesse élevée, alors que le point 02 qui se trouve à l'extrémité de la placette enregistre une vitesse plus basse.

**-La température de l'air :** selon la carte (Figure IV- 15 (b)) on remarque que les endroits qui se caractérisent par des températures d'air basses sont les espaces végétalisés au centre de la placette et les ruelles. En contrepartie, on voit que les espaces ouverts, enregistrent des températures plus élevées. On note aussi une température très élevée au niveau de la rue adjacente à la placette, qui est orientée Est-Ouest, constituant ainsi une source de chaleur pour la placette, ce qui influe sur son microclimat. Le graphe (Figure IV- 16 (b)) montre aussi la variation de la température de l'air pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que le point 01 situé au centre de la placette enregistre des températures plus basses que le point 02 situé à l'extrémité, durant toute la journée.

**-L'humidité relative :** la carte (Figure IV- 15 (c)) montre le taux d'humidité simulé au niveau de la placette de la vieille ville à 14h00. On voit que la présence de la végétation a participé à l'augmentation du niveau d'humidité au centre de la placette. On remarque aussi que le taux d'humidité est élevé au niveau des ruelles étroites. En revanche l'humidité est très basse au niveau des espaces plus ouverts et non végétalisés, ainsi que dans la rue tangente à la placette, qui se distingue par son orientation Est-Ouest. Le graphe (Figure IV- 16 (c)) montre la variation du taux d'humidité pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que le point 01 présente un taux d'humidité plus élevé que le deuxième point.

**-La température moyenne radiante :** la carte (Figure IV- 15 (d)) montre la température moyenne radiante simulée au niveau de la placette de la vieille ville à 14h00. On remarque l'impact de la végétation et l'ombre sur la Tmrt, surtout au niveau des ruelles et au centre de la placette. Dans les espaces non ombragés la température moyenne radiante peut atteindre 64°C. La baisse de température est remarquable dans la zone végétalisée, où on enregistre une baisse de 15°C. Le graphe (Figure IV- 16 (d)) montre la variation de la Tmrt pour les deux récepteurs durant la journée. Ce n'est pas évident de déterminer quel est le point qui enregistre une Tmrt plus basse, car la variation de la Tmrt dépend du changement de l'ombre le long de la journée. D'après le graph, on voit qu'au début et à la fin de journée, la Tmrt est plus basse au niveau du point 02, et que de 12h00 à 14h00, on note le contraire.

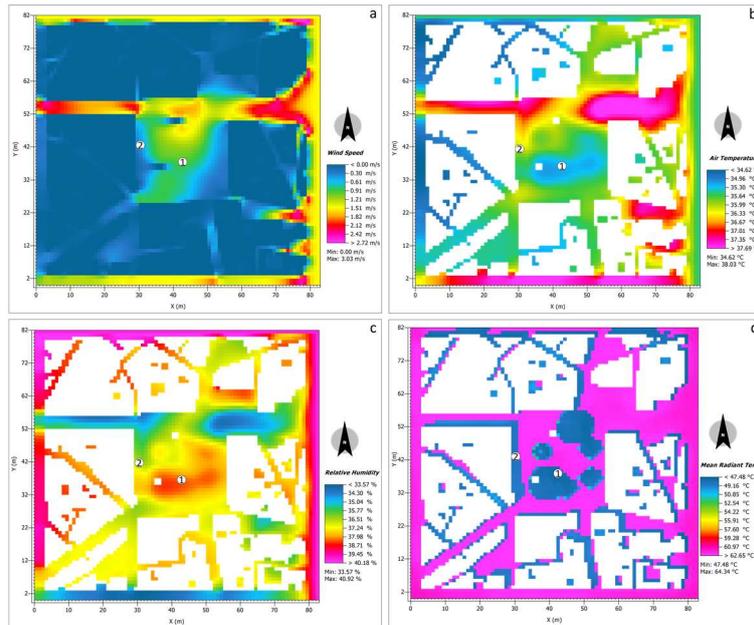


Figure IV- 20: Carte des paramètres climatiques au niveau de la placette de la vieille ville. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

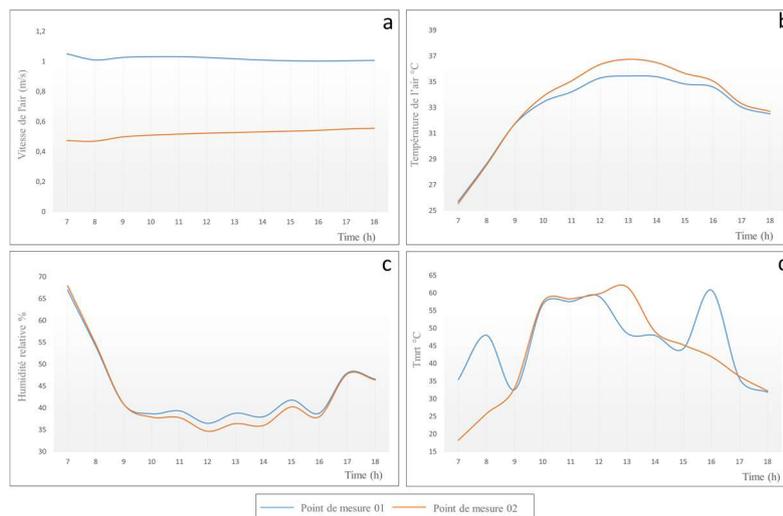


Figure IV- 21: Graphe représentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette de la vieille ville. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

#### IV.4.1.4 Place du Cours El-Bouni

Les cartes ci-dessous, montrent les résultats de la simulation numérique dans le cours d'El-Bouni à 14h00.

**-La vitesse du vent :** d'après la carte (Figure IV- 17 (a)), on remarque que la vitesse du vent au bord des bâtiments est très basses, presque nulle. Au niveau de la place, la vitesse est plus élevée, dans ses deux parties, malgré la présence d'une végétation dense dans la partie sud de la place. Le graphe (Figure IV- 18 (a)) montre la variation de la vitesse du vent pour les quatre

récepteurs durant la journée. On remarque que le point 03 présente la plus grande vitesse, ensuite le point 01, à cause de l'ouverture de la place au niveau de ces deux points. On enregistre une vitesse basse au niveau du point 02 qui se situe dans un espace végétalisé, et au niveau du point 04.

**-La température de l'air :** selon la carte (Figure IV- 17 (b)) on voit que la température de la place est plus basse que les autres espaces ouverts, à cause de la présence de la végétation au niveau de la place, et aussi son orientation Nord-sud, a participé à la diminution de la Tair, contrairement aux rues bitumé et orientée Est-ouest, qui se distinguent par des températures très élevées. Le graphe (Figure IV- 18 (b)) montre aussi la variation de la température de l'air pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que les points qui présentent des températures plus élevées sont les point 01 et 04, à cause de leur proximité d'un espace ouvert bitumé, non végétalisé et encombré par le trafic routier (rond-point). Alors que les températures basses sont enregistrées au niveau des points 02, situé dans un endroit végétalisé.

**-L'humidité relative :** la carte (Figure IV- 17 (c)) montre le taux d'humidité simulé au niveau du cours El-Bouni à 14h00. On voit que la présence de la végétation a participé fortement à l'augmentation du niveau d'humidité au niveau de la place. On remarque aussi que le taux d'humidité dans les rues bitumé et orientée Est-ouest, est très bas. Le graphe (Figure IV- 18 (c)) montre la variation du taux d'humidité pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que le point 02 présente un taux d'humidité plus élevé que les autres points, grâce à la végétation.

**-La température moyenne radiante :** la carte (Figure IV- 17 (d)) montre la température moyenne radiante simulée au niveau du cours El-Bouni à 14h00. L'impact de la végétation et l'ombre portée des bâtiments, sur la diminution de la Tmrt est notable. Dans les espaces non ombragés la température moyenne radiante peut atteindre 66°C. La baisse de la température d'air est beaucoup plus importante au niveau des espaces ombragés par les bâtiments, où on enregistre une baisse de 18°C, et une baisse de 14 °C au niveau des espaces végétalisés. Le graphe (Figure IV- 18 (d)) montre la variation de la Tmrt pour les quatre récepteurs durant la journée. On remarque que la Tmrt dans le point 02 reste la plus basse le long de la journée, grâce à l'ombre créé par la végétation, alors que le point 03 présente des niveau de Tmrt très élevé durant toute la journée, à cause de l'exposition permanente au soleil, et concernant les points 01 et 04, on voit que la température baisse et augmente au cours de la journée, suivant la présence ou non de l'ombre.

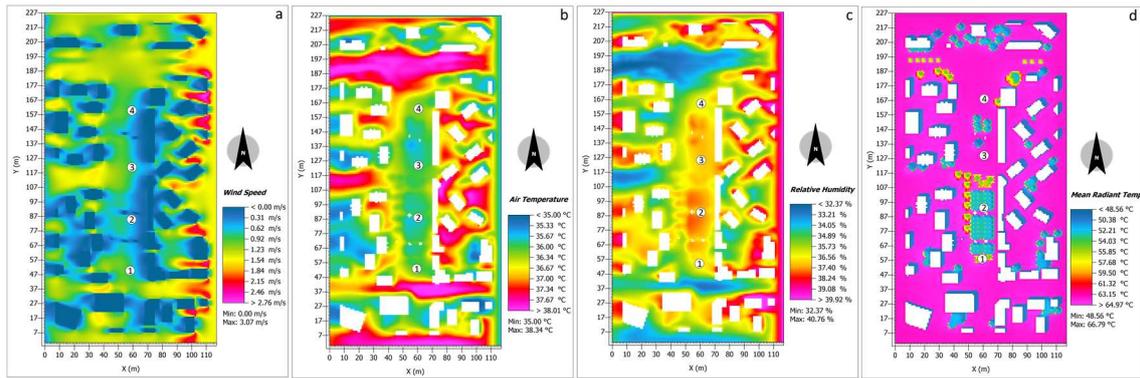


Figure IV- 22: Cartes des paramètres climatiques au niveau du cours El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

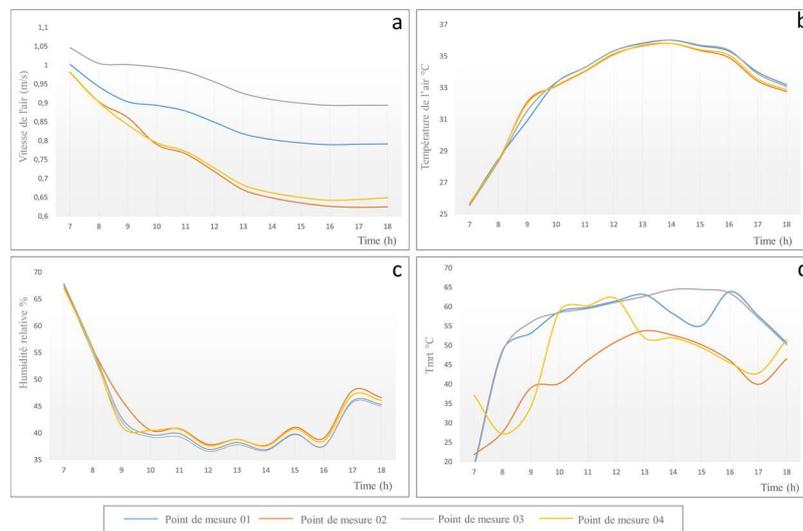


Figure IV- 23: Graphe représentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau du cours El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, b) température moyenne radiante.

#### IV.4.1.5 Placette El-Bouni

Les cartes ci-dessous, montrent les résultats de la simulation numérique dans la placette d'El-Bouni à 14h00.

**-La vitesse du vent :** d'après la carte (Figure IV- 19 (a)), on remarque que la vitesse du vent à côté des bâtiments est très basses, presque nulle. Au niveau des espaces ouverts et la placette, la vitesse est plus élevée. Le graphe (Figure IV- 20 (a)) montre la variation de la vitesse du vent pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que la vitesse au niveau du centre de la placette (point 01) est plus élevée que dans son extrémité (point 02)

**-La température de l'air :** selon la carte (Figure IV- 19 (b)) on voit que la température de la place est très élevée, à cause de son ouverture, et le manque de végétation, à part la présence de quelques arbres, qui ont participé à une légère baisse de température d'une façon ponctuelle.

On remarque aussi des endroits plus frais autour de la placette, grâce à la présence du bâti. Le graphe (Figure IV- 20 (b)) montre aussi la variation de la température de l'air pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que la  $T_{air}$  enregistrée au point 01 situé au centre de la placette est plus élevée que celle enregistrée au point 02 situé à son extrémité

**-L'humidité relative :** la carte (Figure IV- 19 (c)) montre l'humidité simulée au niveau de la placette El-Bouni à 14h00. On voit que le taux d'humidité est très bas au niveau de la placette, à cause de l'absence de la végétation. On remarque aussi que le taux d'humidité est élevé dans les endroits proches aux bâtiments. Le graphe (Figure IV- 20 (c)) montre la variation du taux d'humidité pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que le point 02 présente un taux d'humidité plus élevé que le point 01, grâce à la présence de végétation et sa proximité au bâti.

**-La température moyenne radiante :** la carte (Figure IV- 19 (d)) montre la température moyenne radiante simulée au niveau de la placette El-Bouni à 14h00. On remarque la diminution de la  $T_{mrt}$  au niveau des endroits Ombragés, par la végétation ou par le bâti. Dans les espaces non ombragés la température moyenne radiante peut atteindre  $66^{\circ}\text{C}$ . On enregistre une baisse de  $17^{\circ}\text{C}$  au niveau des endroits ombragés. Le graphe (Figure IV- 20 (d)) montre la variation de la  $T_{mrt}$  pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que la  $T_{mrt}$  dans le point 02 est plus basse que dans le point 01 à cause de l'ombre de la végétation et du bâti. Cependant, cette baisse n'est pas constante, et varie au cours de la journée, où on enregistre une augmentation de chaleur à 09h00, 17h00 et entre 11h00 et 13h00.

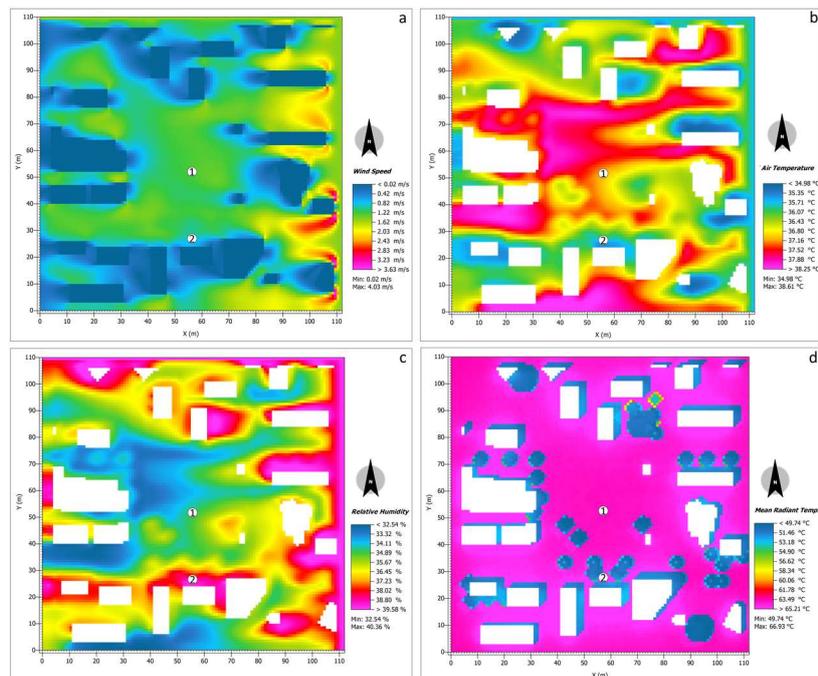


Figure IV- 24: Carte de la variation des paramètres climatiques au niveau de la placette El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

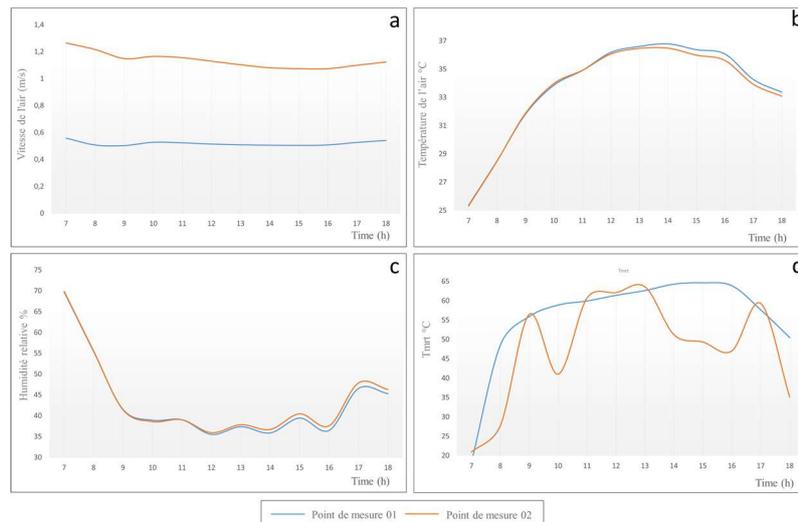


Figure IV- 25: Graphe représentant la variation des paramètres climatiques au niveau au niveau de la placette El-Bouni. a) vitesse de l'air, b) température de l'air, c) humidité relative, d) température moyenne radiante.

#### IV.4.2 Les indices de confort thermique

Nous allons présenter dans cette partie les indices de confort thermique (PET, SET, UTCI). L'objectif est d'analyser le niveau de confort thermique dans chaque placette, et voir sa variation au milieu du même espace.

##### IV.4.2.1 Place du cours de la révolution

**-PET :** d'après la carte (Figure IV- 21 (a)) on remarque que le PET est très élevé dans le côté Est de de la place, et il peut atteindre 56°C. Ce côté constitue la façade ouest des bâtiments qui limite la place. Ces façades sont exposées au soleil l'après-midi, et participe à l'augmentation du PET à cause du rayonnement solaire indirect, contrairement à la façade est (côté Ouest de la place), où le PET est plus bas grâce à la présence d'ombre. La présence de la végétation participe aussi à la diminution du PET, une diminution qui peut arriver jusqu'à 10°C dans les espaces végétalisés. Le graphe (Figure IV- 22 (a)) montre la variation du PET pour les quatre récepteurs le long de la journée. On remarque que le PET dans les points 01 et 02, est le plus bas. Dans le point 03 le PET est le plus élevé pendant toute la journée, alors que dans le point 04 est plus bas, mais enregistre une augmentation à 11h00 et une autre à 16h00.

**-SET :** d'après la carte (Figure IV- 21 (b)), on remarque que le SET est très élevé au côté Est de la place, et il peut arriver à 43 °C. Cette augmentation se trouve au niveau de l'espace adjacent aux façades ouest des bâtiments. Contrairement à la façade est, où le SET est plus bas grâce à la présence d'ombre. La présence de la végétation participe aussi à la diminution locale du SET, une diminution d'environ 4°C. Le graphe (Figure IV- 22 (b)) montre la variation du

SET pour les quatre récepteurs au cours de la journée. On remarque que le SET dans le point 02, est le plus bas, et que le SET du point 04 inférieur au SET du point 01, contrairement au PET. On constate donc que les indices du confort PET et SET ne donnent pas forcément les mêmes résultats.

-**UTCI** : la même chose concernant l'indice UTCI, on voit que la répartition de l'UTCI est semblable à la répartition du PET. On remarque que les valeurs basses de l'UTCI se situent dans les endroits végétalisés et ombragés (Figure IV- 21 (c)). Le graphe (Figure IV- 22 (c)) montre la variation de l'UTCI pour les quatre récepteurs au cours de la journée. On remarque que l'UTCI dans les points 01 et 02, est le plus bas. Dans le point 03 l'UTCI est le plus élevé pendant toute la journée, alors que dans le point 04 est plus bas, mais enregistre une augmentation à 11h00 et une autre à 16h00.

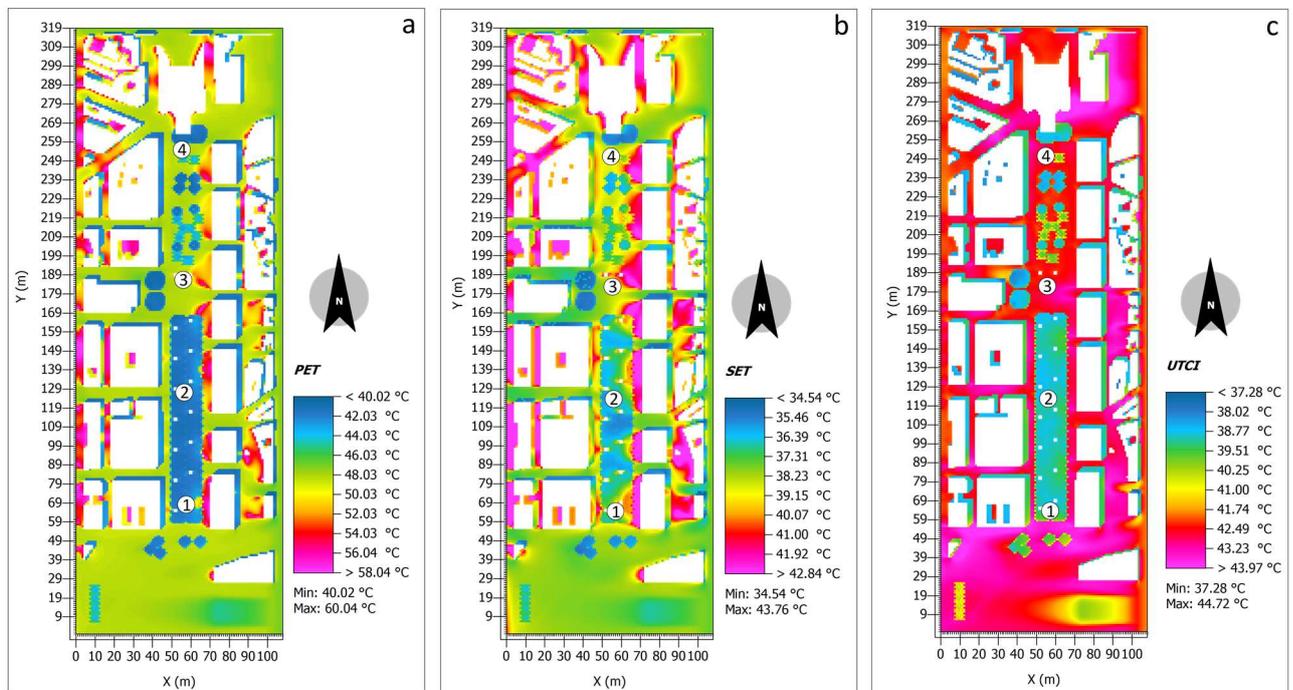


Figure IV- 26: Carte des indices du confort thermique au niveau du cours de la révolution. a) PET, b) SET, c)UTCI.

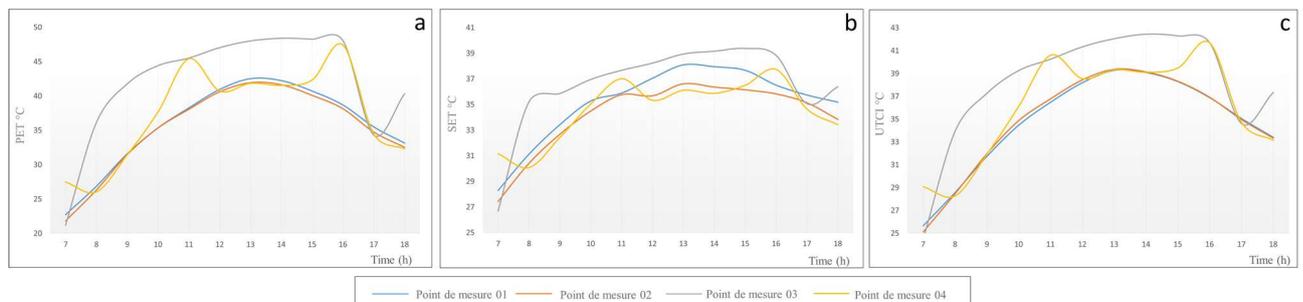


Figure IV- 27: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au niveau du cours de la révolution. a) PET, b) SET, c)UTCI.

#### IV.4.2.2 Place Alexis Lambert

**-PET :** d'après la carte (Figure IV- 23 (a)) on remarque que le PET est plus élevé aux niveaux des espaces adjacents aux façades Ouest des bâtiments, et il peut atteindre 57°C. Ces façades sont exposées au soleil l'après-midi, et participe à l'augmentation du PET, Contrairement à la façade Est le PET est plus bas grâce à la présence d'ombre. La présence de la végétation participe aussi à la diminution du PET, une diminution qui peut arriver jusqu'à 18°C. Le graphe (Figure IV- 24 (a)) montre la variation du PET pour les deux récepteurs au cours de la journée. On remarque que le PET dans le point 02, est plus bas que dans le point 01, sauf pendant la période entre 12h30 et 15h30, et après 18h00.

**-SET :** d'après la carte (Figure IV- 23 (b)), on remarque que le SET est très élevé aux niveaux des espaces adjacents aux façades Nord-Ouest des bâtiments, et il peut atteindre 42 °C. Ces façades sont exposées au soleil l'après-midi, et participe à l'augmentation du SET. Contrairement à la façade est, où le SET est plus bas grâce à la présence d'ombre. La présence de la végétation participe aussi à la diminution locale du SET, une diminution d'environ 6 °C. Le graphe (Figure IV- 24 (b)) montre la variation du SET pour les deux récepteurs au cours de la journée. On remarque que le SET dans le point 01, est le plus bas, et que le SET du point 02 pendant toute la journée. Donc on remarque que les résultats du PET et du SET ne se ressemblent pas.

**-UTCI :** On remarque que la répartition de l'UTCI est semblable à la répartition du PET, et que les valeurs basses de l'UTCI se trouvent aux endroits végétalisés et ombragés (Figure IV- 23 (c)). Le graphe (Figure IV- 24 (c)) montre la variation de l'UTCI pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que l'UTCI dans le point 02, est plus bas que dans le point 01, sauf pendant la période entre 12h30 et 15h30, où on note une légère différence. On constate l'UTCI donne des résultats proches aux résultats du PET et différents aux ceux du SET.

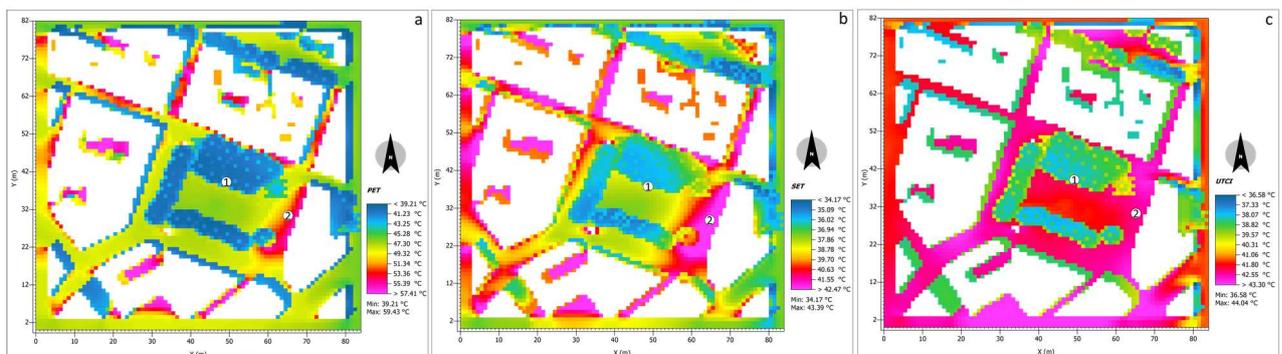


Figure IV- 28 : Cartes des indices du confort thermique au niveau de la placette Alexis Lambert. a) PET, b) SET, c) UTCI.

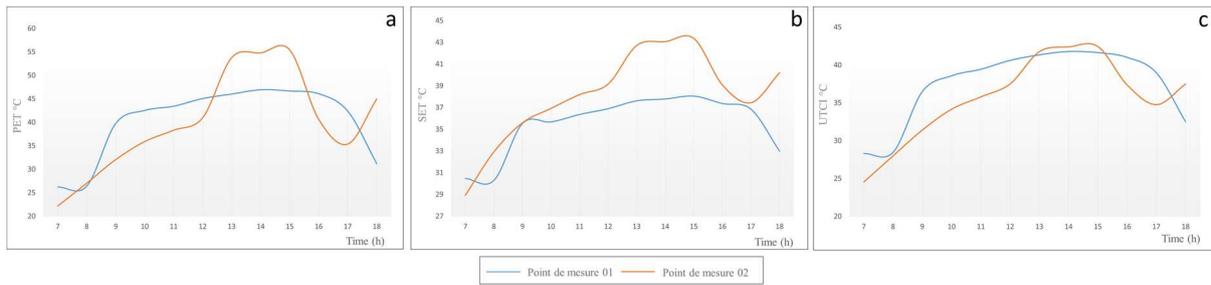


Figure IV- 29: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au niveau de la placette Alexis Lambert. a) PET, b) SET, c) UTCI.

#### IV.4.2.3 Place Vieille Ville

**-PET :** d’après la carte (Figure IV- 25 (a)) on remarque que la présence de la végétation et l’ombre portée des bâtiments participent à la diminution du PET, une diminution qui peut arriver jusqu’à 6 °C. Le graphe (Figure IV- 26 (a)) montre la variation du PET pour les deux récepteurs au cours de la journée. On remarque que le PET dans le point 01, est plus bas que dans le point 02, entre 10h00 et 15h00 et plus haut avant 09h00 et après 15h00.

**-SET :** d’après la carte (Figure IV- 25 (b)), on remarque que le SET est très élevé aux niveaux des espaces ayant une haute densité bâti, et il peut atteindre 42 °C, alors que le SET dans les espaces ouverts est plus bas (38 °C). Le graphe (Figure IV- 26 (b)) montre la variation du SET pour les deux récepteurs au cours de la journée. On remarque la même chose que le PET. Le niveau du SET dans le point 01, est plus bas que dans le point 02, entre 10h00 et 15h00 et plus haut avant 09h00 et après 15h00.

**-UTCI :** On remarque que la répartition de l’UTCI est semblable à la répartition du PET, et que les valeurs basses de l’UTCI se trouvent aux endroits végétalisés et ombragés (Figure IV- 25 (c)). Le graphe (Figure IV- 26 (c)) montre la variation de l’UTCI pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que l’UTCI dans le point 01, est plus bas que dans le point 02, entre 10h00 et 15h00 et plus haut avant 09h00 et après 15h00.

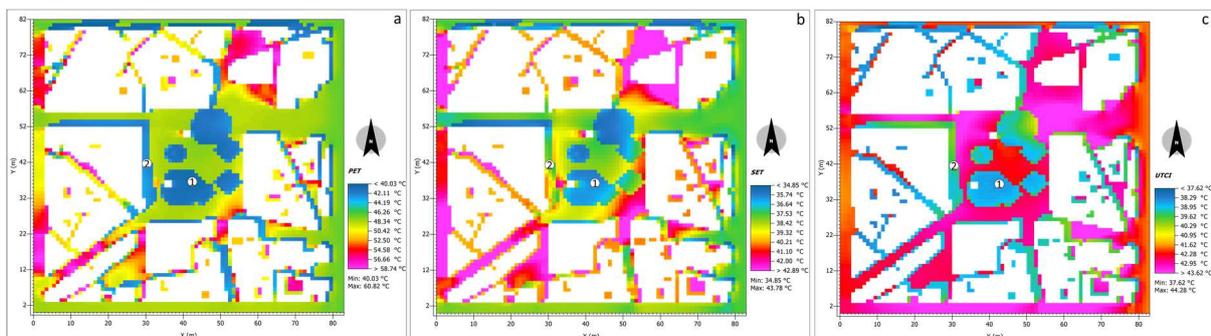


Figure IV- 30: Carte des indices du confort thermique au niveau de la placette de la vieille ville. a) PET, b) SET, c) UTCI.



Figure IV- 31: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au de la placette de la vieille ville. a) PET, b) SET, c)UTCI.

#### IV.4.2.4 Place du Cours El-Bouni

**-PET :** d'après la carte (Figure IV- 27 (a)) on remarque que le PET est plus élevé dans le côté Est de de la place, et il peut atteindre 58°C. Ce côté constitue la façade ouest des bâtiments qui limite la place. Ces façades sont exposées au soleil l'après-midi, et participe à l'augmentation du PET à cause du rayonnement solaire indirect, contrairement à la façade est (côté Ouest de la place), où le PET est plus bas grâce à la présence d'ombre. La présence de la végétation participe aussi à la diminution du PET, une diminution qui peut arriver jusqu'à 16°C dans les espaces végétalisés. Le graphe (Figure IV- 28 (a)) montre la variation du PET pour les quatre récepteurs le long de la journée. On remarque que le PET dans le point 01 est le plus bas. Dans le point 03 le PET est le plus élevé pendant toute la journée, alors que dans les points 04 et 01 le PET n'est pas constant et varie au cours de la journée.

**-SET :** d'après la carte (Figure IV- 27 (b)), on remarque que le SET est très élevé au côté Est de la place, et il peut arriver à 44 °C. Cette augmentation se trouve au niveau de l'espace adjacent aux façades ouest des bâtiments. Contrairement à la façade est, où le SET est plus bas grâce à la présence d'ombre. La présence de la végétation participe aussi à la diminution locale du SET, une diminution d'environ 4°C. Le graphe (Figure IV- 28 (b)) montre la variation du SET pour les quatre récepteurs au cours de la journée. On remarque que le SET dans le point 02, est le plus bas, alors que le SET du point 03 et le plus élevé.

**-UTCI :** la même chose concernant l'indice UTCI, on voit que la répartition de l'UTCI est semblable à la répartition du PET. On remarque d'après la carte (Figure IV- 27 (c)) que les valeurs basses de l'UTCI se situent dans les endroits végétalisés et ombragés. Le graphe (Figure IV- 28 (c)) montre la variation de l'UTCI pour les quatre récepteurs au cours de la journée. On remarque que l'UTCI dans le point 02 est le plus bas, alors que le point 03 enregistre les valeurs les plus élevées.

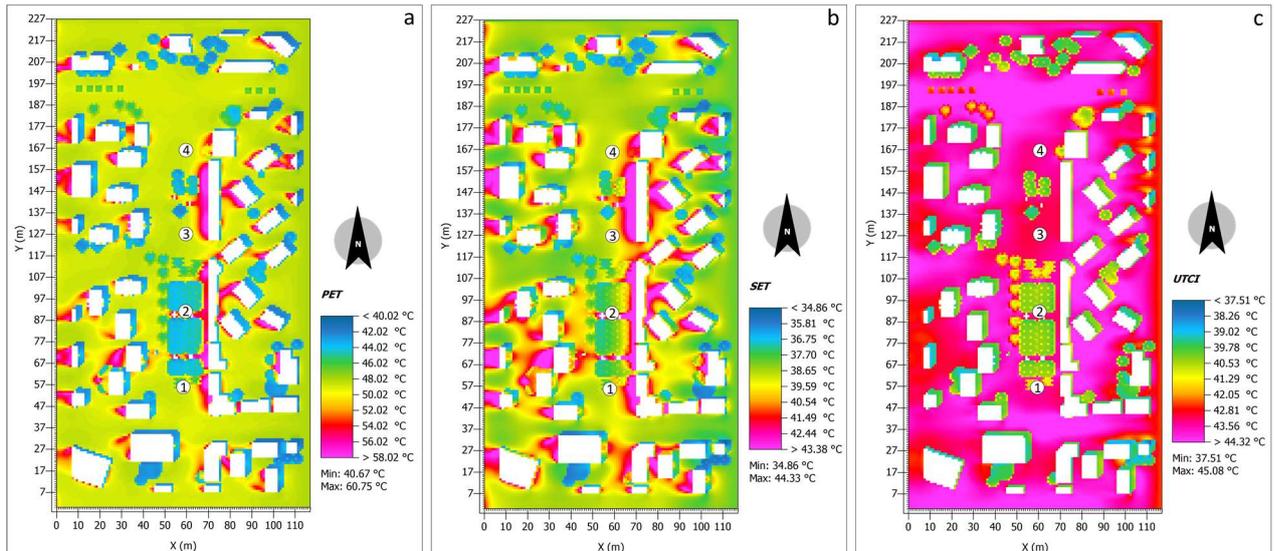


Figure IV- 32: Carte des indices du confort thermique au niveau du cours El-Bouni. a) PET, b) SET, c)UTCI.

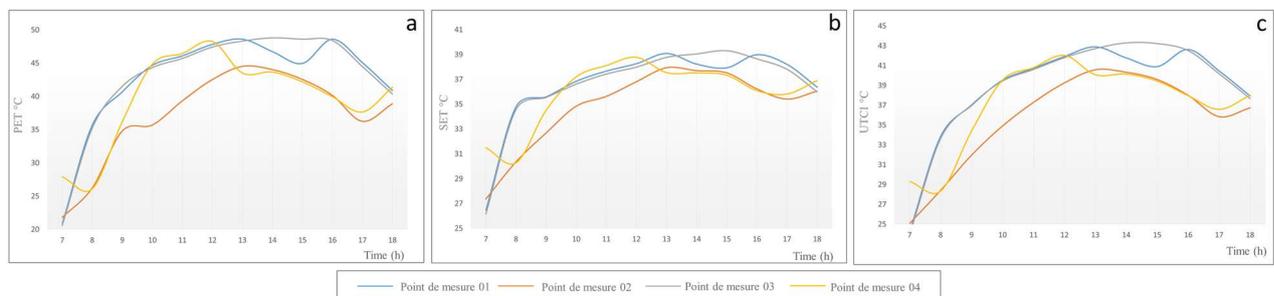


Figure IV- 33: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au niveau du cours El-Bouni. a) PET, b) SET, c)UTCI.

#### IV.4.2.5 Place El-Bouni

**-PET :** d'après la carte (Figure IV- 29 (a)) on remarque que la présence de la végétation et l'ombre portée des bâtiments participent à la diminution du PET, une diminution qui peut arriver jusqu'à 5 °C. Le graphe (Figure IV- 30 (a)) montre la variation du PET pour les deux récepteurs au cours de la journée. On remarque que le PET dans le point 02, est plus bas que dans le point 01. Cette différence est due à la présence de la végétation et l'ombre portée des bâtiments, dans le point 02.

**-SET :** on remarque d'après carte (Figure IV- 29 (b)) que le SET est très élevé aux niveaux des espaces limitrophe aux bâtiments, et il peut atteindre 43 °C, alors que le SET dans les espaces loin des bâtis est plus bas (38 °C). Le graphe (Figure IV- 30 (c)) montre la variation du SET pour les deux récepteurs au cours de la journée. On remarque la même chose que le PET, mais avec un écart un peu plus important. Le SET dans le point 02, est plus bas que dans le point 01.

**-UTCI :** On remarque que la répartition de l'UTCI est semblable à la répartition du PET, et que les valeurs basses de l'UTCI se trouvent aux endroits végétalisés et ombragés (Figure IV-29 (c)). Le graphe (Figure IV- 30 (c)) montre la variation de l'UTCI pour les deux récepteurs durant la journée. On remarque que l'UTCI dans le point 01, est plus haut que dans le point 02, sauf de 11h00 à 14h00, où on enregistre des valeurs égales.

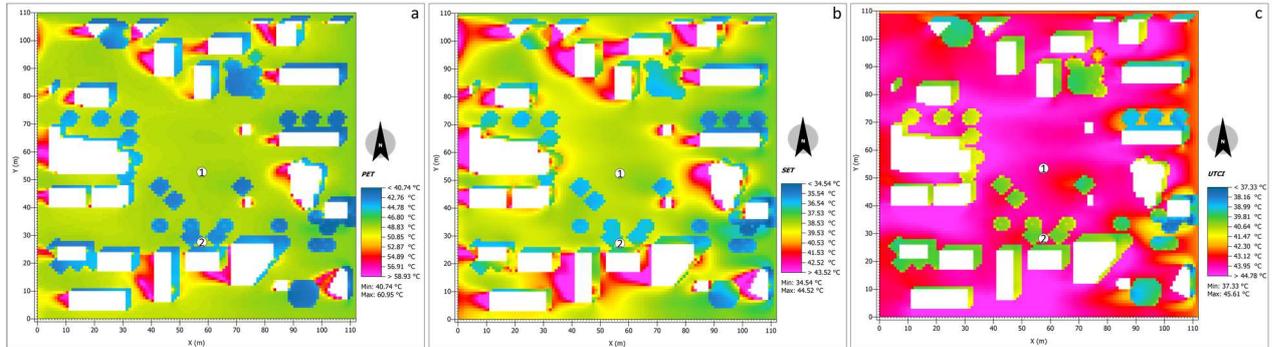


Figure IV- 34: Carte des indices du confort thermique au niveau de la placette El-Bouni. a) PET, b) SET, c)UTCII.



Figure IV- 35: Graphe représentant la variation des indices du confort thermique au de la placette El-Bouni. a) PET, b) SET, c)UTCII.

#### IV.5 Comparaison entre les placettes étudiées

Afin de comparer entre les cinq placettes étudiés, nous avons établi pour chaque placette des cartes climatiques présentant les quatre paramètres climatique à savoir : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température moyenne radiante, ainsi que des cartes des indices de confort : le PET, le SET et l'UTCI. L'heure choisie pour extraire les cartes est 14h00. Afin de comparer ces paramètres et les lire leur variation dans le temps, nous avons établi des graphes. Donc une moyenne a été calculée pour chaque placette à partir des données extraites des récepteurs placés lors de la simulation numérique (l'emplacement des récepteurs est le même des points de mesure présenté dans les cartes précédentes. La comparaison était faite de deux façons, la première constitue une comparaison de l'état de lieu avec la végétation, et une comparaison sans végétation pour évaluer l'impact de la forme urbaine hors l'impact du

végétal. Nous présentons ici les résultats de l'état de lieu, alors que les résultats de la comparaison sans végétation seront présentés en Annexe 01

## **IV.5.1 Les paramètres climatiques**

### **IV.5.1.1 Température de l'air**

La Figure IV- 31 présente les cartes de la température de l'air pour les cinq placettes, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. D'après les cartes, on voit clairement que le cours de la révolution et la placette Alexis Lambert sont les espaces qui présentent des températures d'air plus basses, surtout au niveau des endroits végétalisés, on remarque aussi que la placette de la vieille ville est plus fraîche par rapport au cours et la placette d'El-Bouni. Cette dernière constitue la placette la plus chaude, avec une température d'air qui dépasse 38.6 °C sur la majorité de son espace. Le graphe (Figure IV- 32) présente la variation de la température de l'air dans le temps pour les cinq placettes. De 07h00 à 09h00, on enregistre presque aucune différence entre les placettes, après 09h00 on voit que la température d'air la plus élevée est celle de la placette d'El-Bouni. Avant 14h00, on trouve qu'au niveau de la placette de la vieille ville la température est plus élevée par rapport aux autres placettes (une différence de 0.3°C), mais plus basse que celle de la placette d'El-Bouni (-). On note aussi que la placette Alexis Lambert est la placette la plus fraîche et que le cours d'El-Bouni présente des températures plus basses que le cours de la Révolution avant 14h00. Après 14h00, la placette El-Bouni reste toujours la plus chaude avec une moyenne de 34,8 °C, ensuite le cours d'El-Bouni avec une moyenne de 34.3°C, après la placette Alexis Lambert, avec une moyenne de 34.1 °C et finalement le Cours de la révolution et la placette de la Vieille ville avec des valeurs plus basse, environ 33.9°C

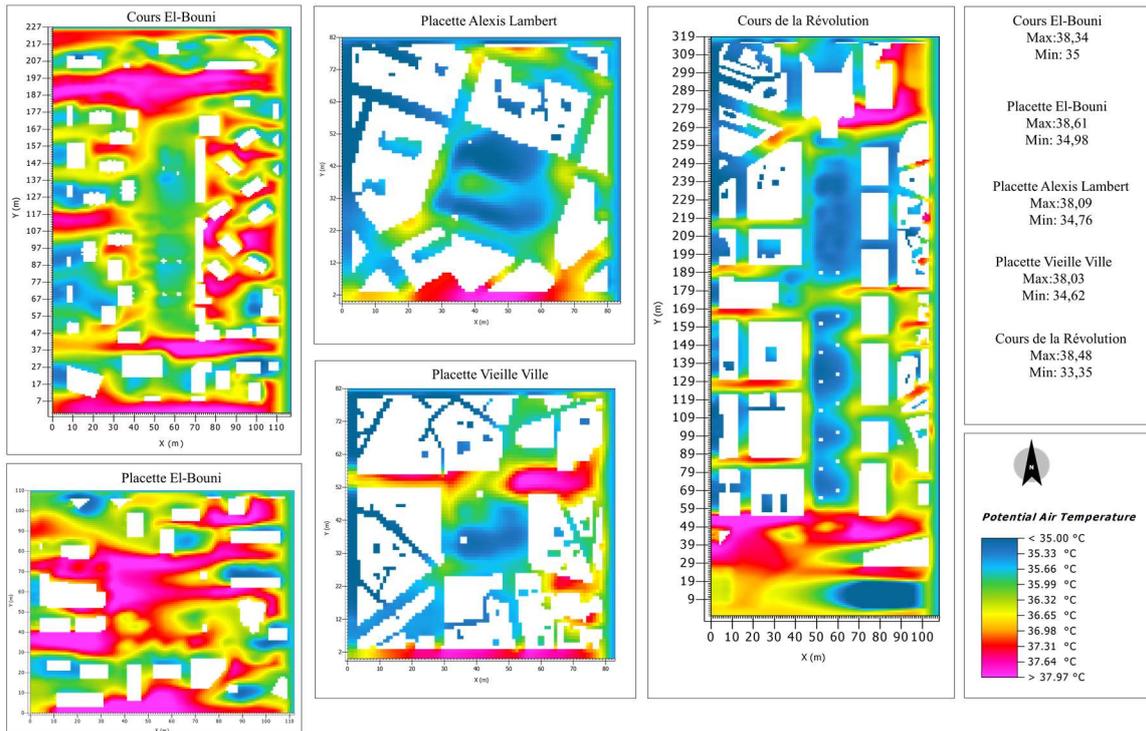


Figure IV- 36: Carte de la température de l'air pour les cinq placettes

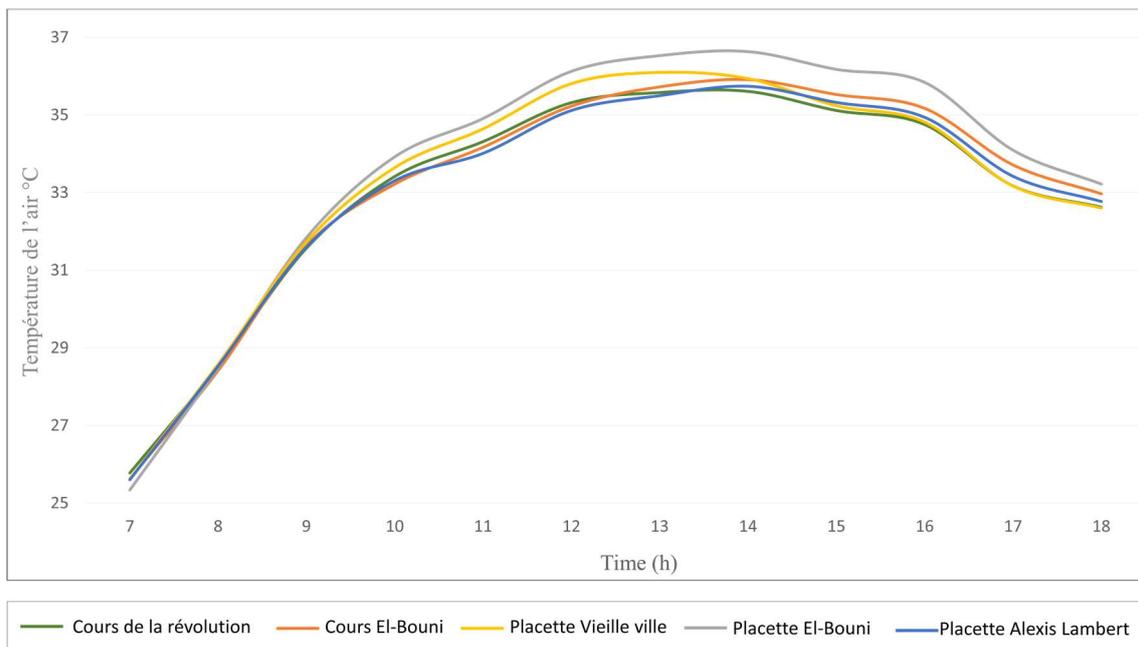


Figure IV- 37: Graphe représentant la variation de la température de l'air pour les cinq placettes

### IV.5.1.2 Vitesse de l'air

La Figure IV- 33 présente les cartes de la vitesse du vent pour les cinq placettes à 14h00, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. On remarque que la vitesse du vent au niveau du cours et la placette d'El-Bouni est plus élevée que celle du cours de la révolution, la placette Alexis Lambert et la placette de la vieille ville, à cause de la faible densité du bâti. Le graphe

(Figure IV- 34) présente la variation de la vitesse du vent dans le temps pour les cinq placettes. On remarque que la vitesse la plus faible est enregistrée au niveau de la placette Alexis Lambert pendant toute la journée. De 07h00 à 13h00, le cours de la révolution et la placette de la vieille ville présentent des vitesses plus basses que le cours et la placette El-Bouni. Après 13h00, on voit que la vitesse au niveau du cours El-Bouni baisse pour être inférieure à celle du cours de la révolution et la placette de la vieille ville.

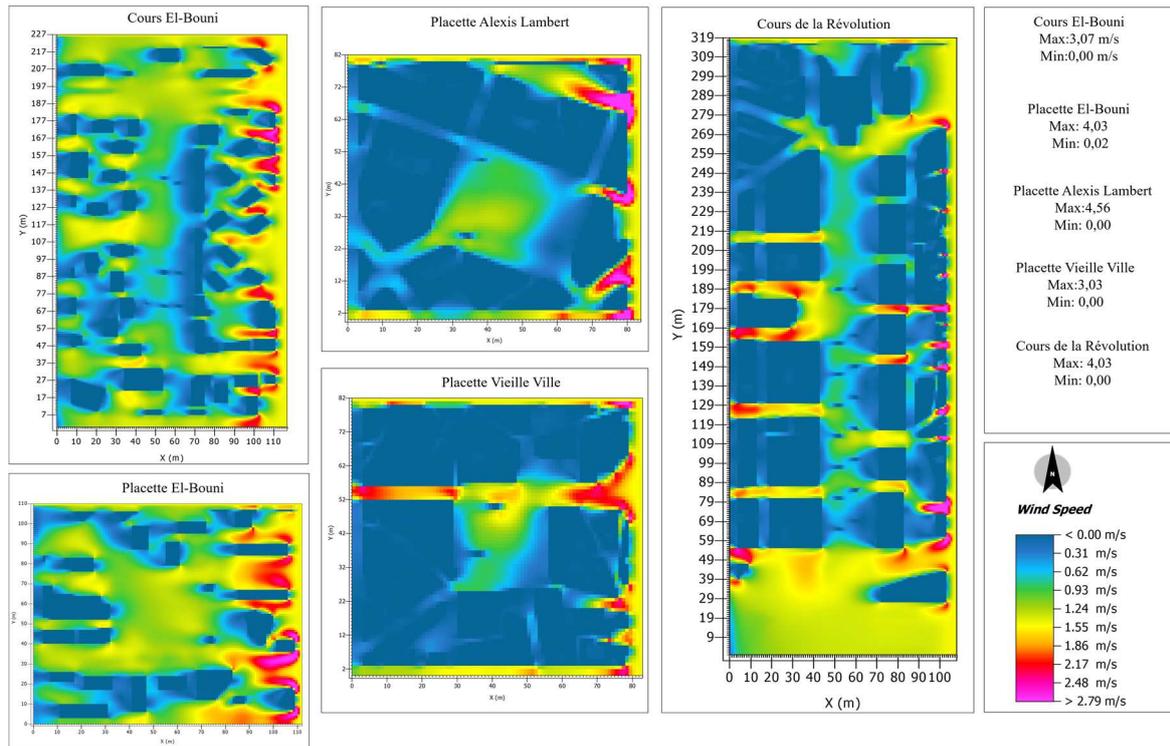


Figure IV- 38: Carte de la vitesse de l'air pour les cinq placettes

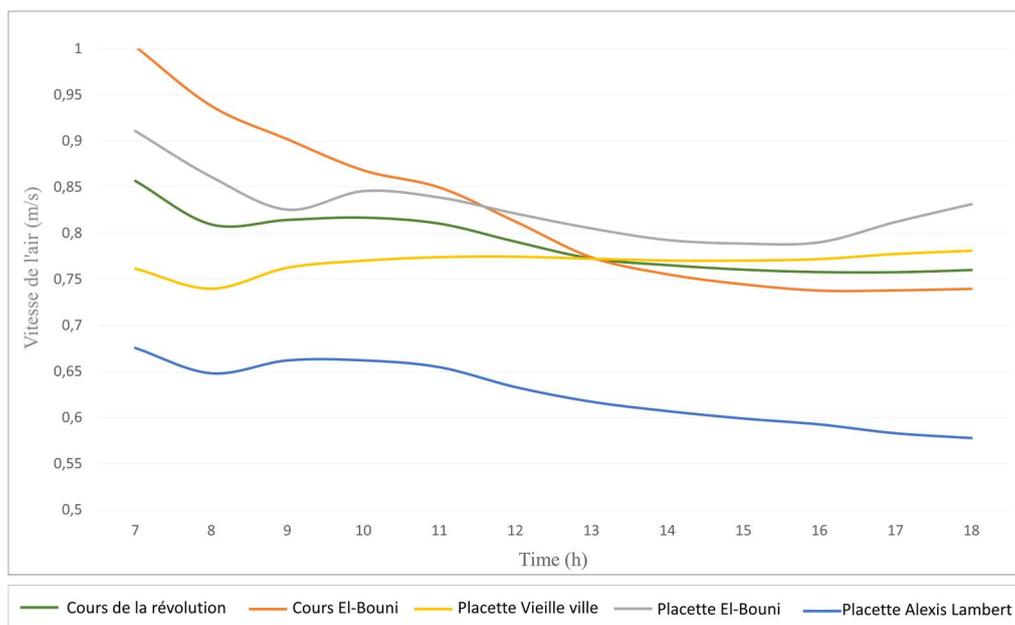


Figure IV- 39: Graphe représentant la variation de la vitesse de l'air pour les cinq placettes

### IV.5.1.3 Humidité relative

La figure ci-dessous (Figure IV- 35) présente les cartes de l’humidité relative pour les cinq placettes à 14h00, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. On remarque d’après ces cartes que le taux d’humidité est plus haut au niveau de la placette Alexis Lambert et au niveau du cours de la révolution, et c’est dû à la haute densité végétale dans ces espaces. Par contre, on enregistre un niveau d’humidité plus bas au niveau de la placette El-Bouni, à cause de l’absence de végétation. On note aussi que le taux d’humidité au niveau de la placette de la vieille ville est plus élevé que celui du cours El-Bouni, bien que ce dernier possède une densité végétale importante, mais la densité du bâti au niveau de la vieille ville a participé à l’augmentation du taux d’humidité avec un peu de végétation. Le graphe (Figure IV- 36) présente la variation de l’humidité relative durant la journée pour les cinq placettes. On remarque que l’humidité relative au début de journée est plus élevée au niveau du cours El-Bouni. Ensuite après 12h00 l’humidité baisse au niveau du cours El-Bouni et augmente dans la placette Alexis Lambert et le cours de la révolution, avec la fin de la journée, l’humidité dans la placette de la vieille ville devient la plus élevée, et placette El-Bouni présente le taux d’humidité le plus bas, tout au long de la journée.

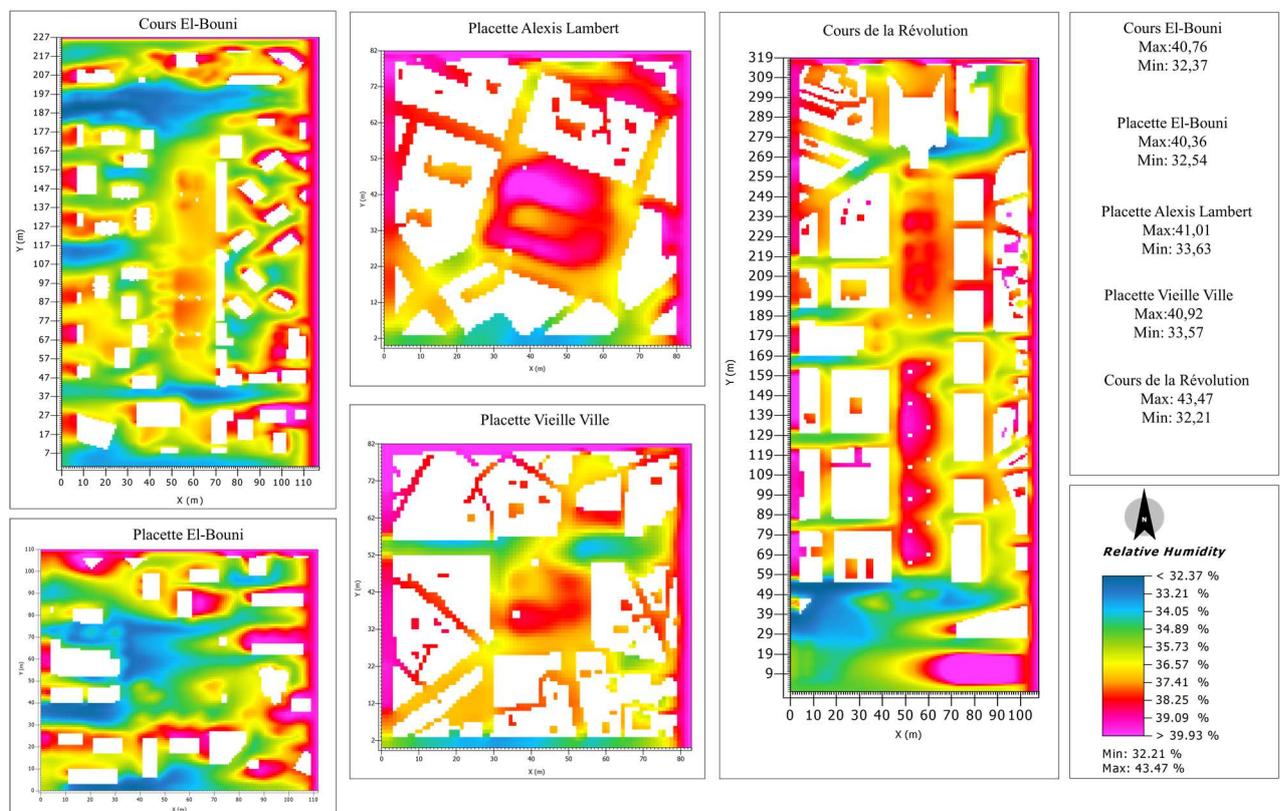


Figure IV- 40: Carte de l’humidité relative pour les cinq placettes

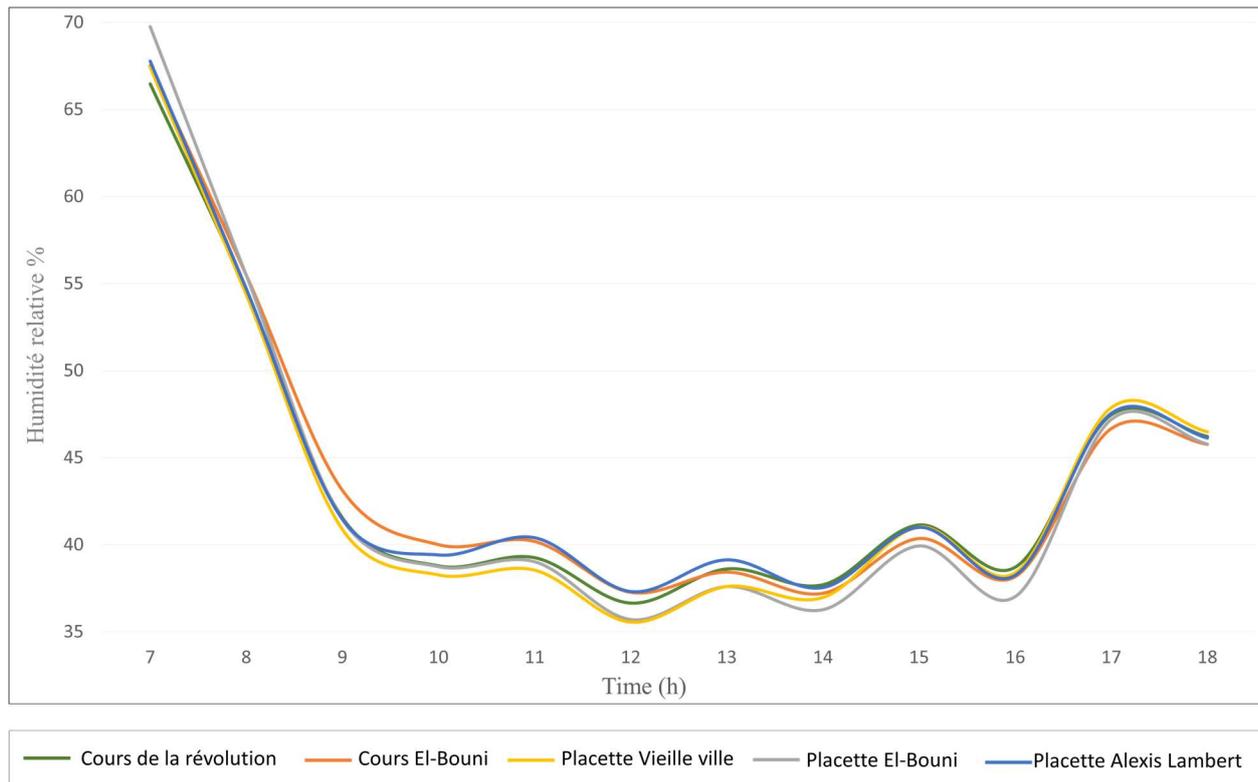


Figure IV- 41: Graphe représentant la variation de l'humidité de l'air pour les cinq placettes

#### IV.5.1.4 Température moyenne radiante

La Figure IV- 37 présente les cartes de la température moyenne radiante pour les cinq placettes à 14h00, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. On remarque d'après ces cartes une différence notable entre les placettes d'El-Bouni (Cours et placette El-Bouni) et les placettes du centre-ville (Cours de la révolution, placette Alexis Lambert et la placette de la vieille ville). La  $T_{mrt}$  au niveau des placettes du centre-ville est plus basse que celle d'El-Bouni. La  $T_{mrt}$  minimale se trouve au niveau de la placette Alexis Lambert ( $T_{mrt} = 45.4^{\circ}\text{C}$ ), alors que la  $T_{mrt}$  maximale est enregistré au niveau de la placette El-Bouni ( $T_{mrt} = 49.7^{\circ}\text{C}$ ). Bien que le cours El-Bouni présente une densité végétale plus élevée que la placette de la vieille ville mais sa  $T_{mrt}$  reste plus élevée que celle de la placette de la vieille ville, cette différence est due à la densité du bâti. Le graphe (Figure IV- 38) présente la variation de la température moyenne radiante durant la journée pour les cinq placettes. On remarque que la  $T_{mrt}$  du cours de la révolution maintient un niveau bas pendant presque toute la journée, et la  $T_{mrt}$  au niveau de la placette El-Bouni est la plus haute. La placette Alexis Lambert présente des températures plus basses pendant la première partie de la journée, et la placette de la vieille ville pendant l'après-midi enregistre une baisse de température, au-dessous même de la  $T_{mrt}$  du cours de la révolution.

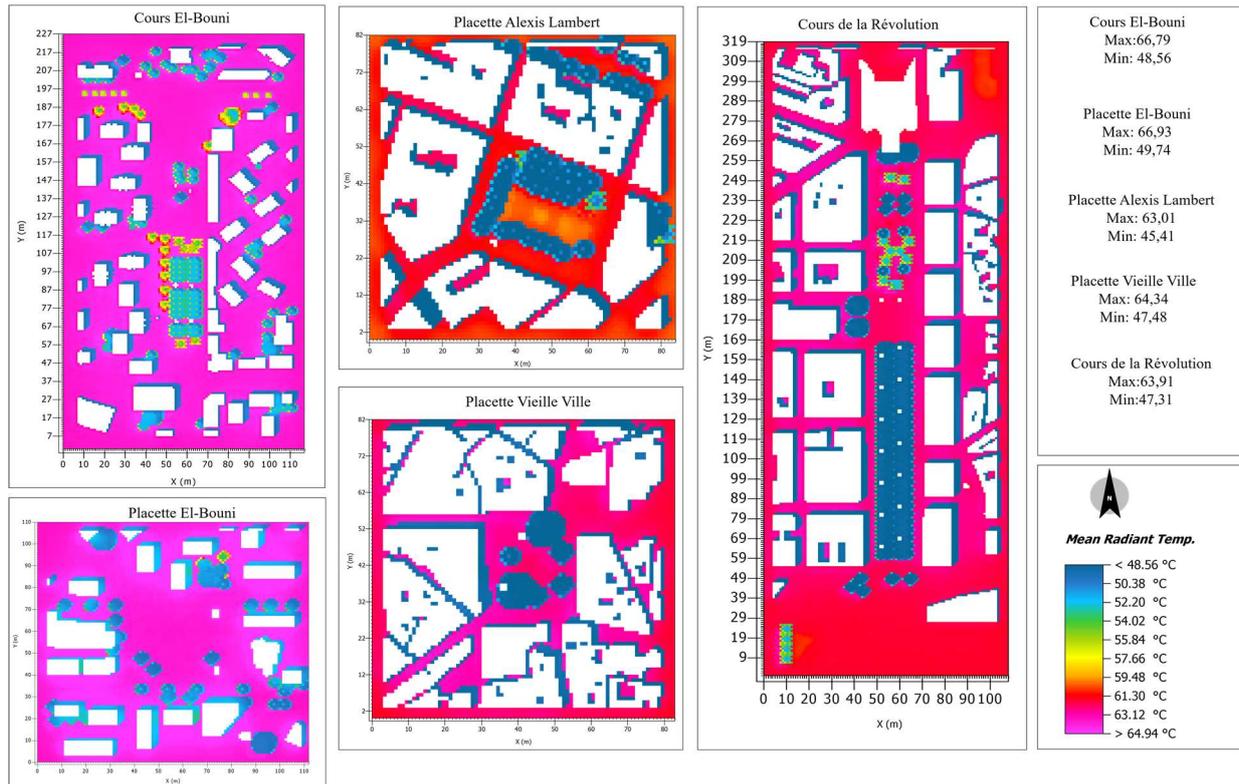


Figure IV- 42 : Carte de la température de moyenne radiante pour les cinq placettes

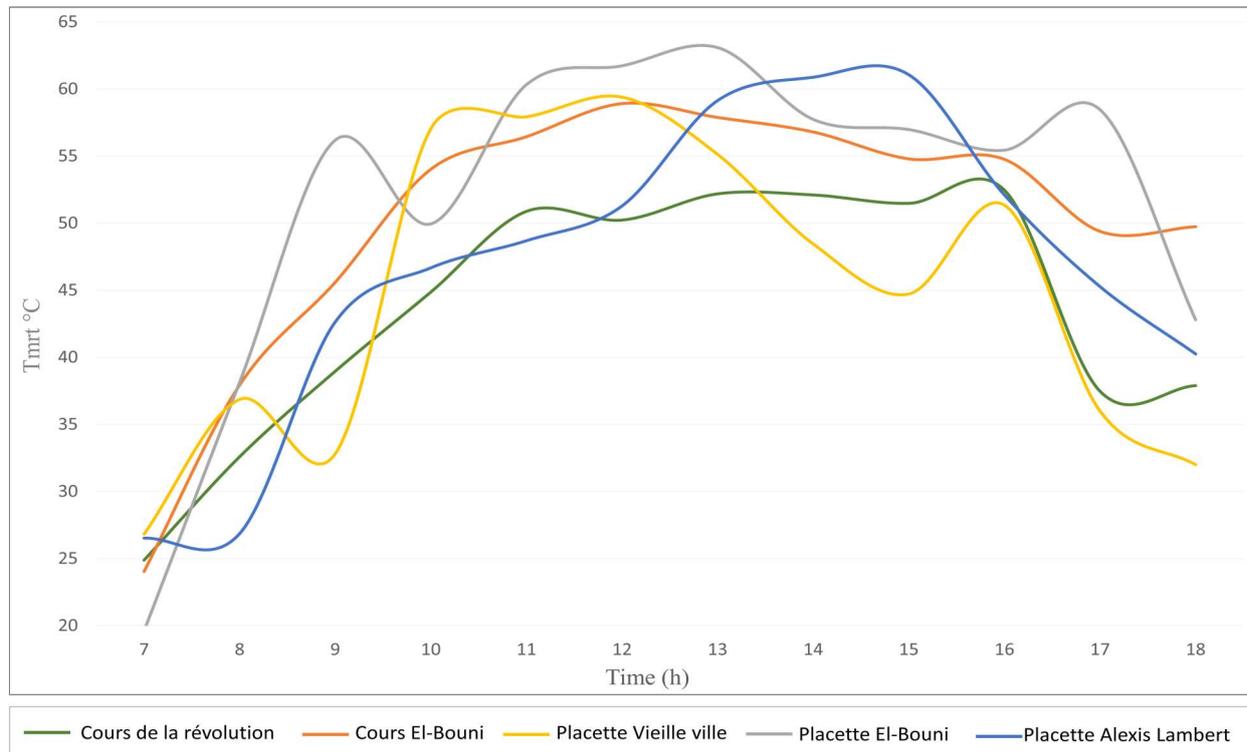


Figure IV- 43: Graphe représentant la variation de la température de moyenne radiante pour les cinq placettes

## IV.5.2 Les indices de confort

### IV.5.2.1 PET

La Figure IV- 39 présente les cartes de l'indice de confort PET pour les cinq placettes à 14h00, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. On remarque d'après ces cartes une différence entre les placettes d'El-Bouni (Cours et placette El-Bouni) et les placettes du centre-ville (Cours de la révolution, placette Alexis Lambert et la placette de la vieille ville). Le PET des placettes du centre-ville est plus bas que celui d'El-Bouni. Le PET minimal à 14h00, se trouve au niveau de la placette Alexis Lambert (PET= 39.2°C), alors que le PET maximal est enregistré au niveau de la placette El-Bouni (PET= 40.7°C). Le PET au niveau du cours El-Bouni est plus élevé que la placette de la vieille ville malgré la présence de la végétation, cette différence est due à la densité du bâti. Le graphe (Figure IV- 40) présente la variation de PET pendant la journée pour les cinq placettes. On remarque que le PET du cours de la révolution est le plus bas pendant presque toute la journée, et le PET au niveau de la placette El-Bouni est le plus haut. Avant 12h00, la placette Alexis Lambert présente des valeurs de PET proches à celles du cours de la révolution, mais entre 12h00 et 16h00, ces valeurs augmentent d'une façon remarquable.

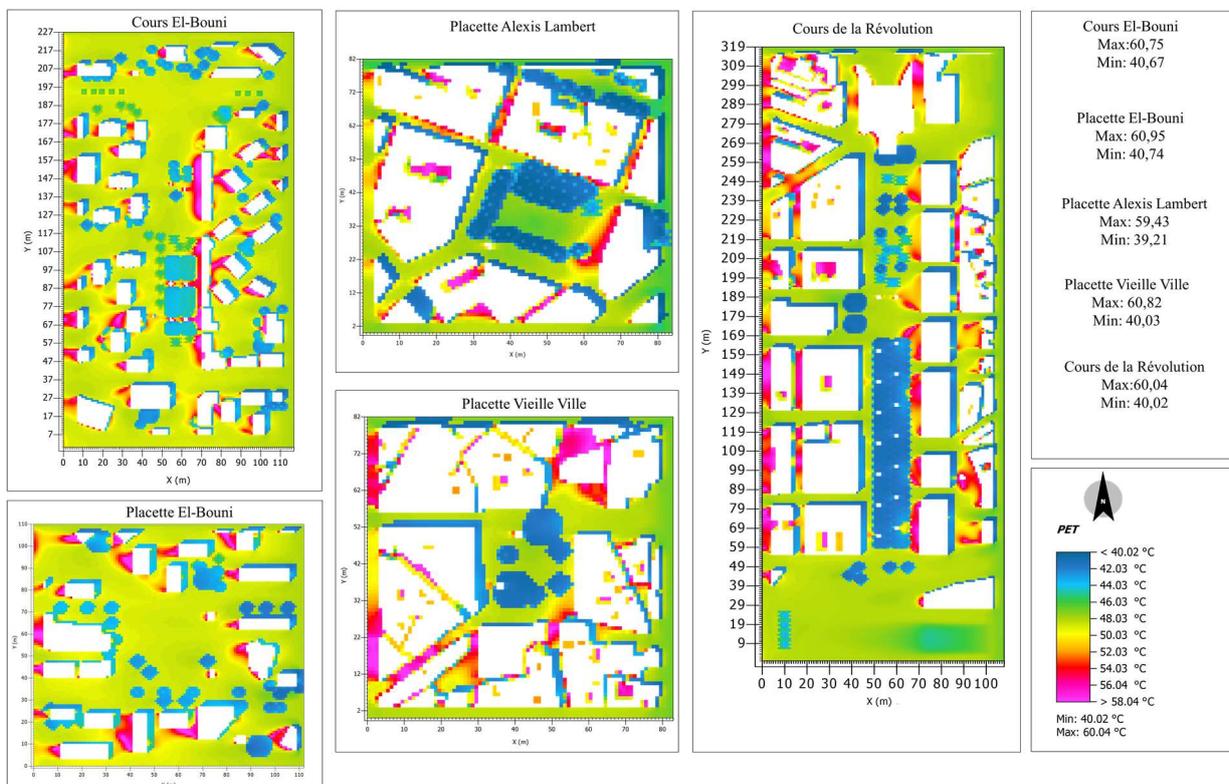


Figure IV- 44: Carte du PET pour les cinq placettes

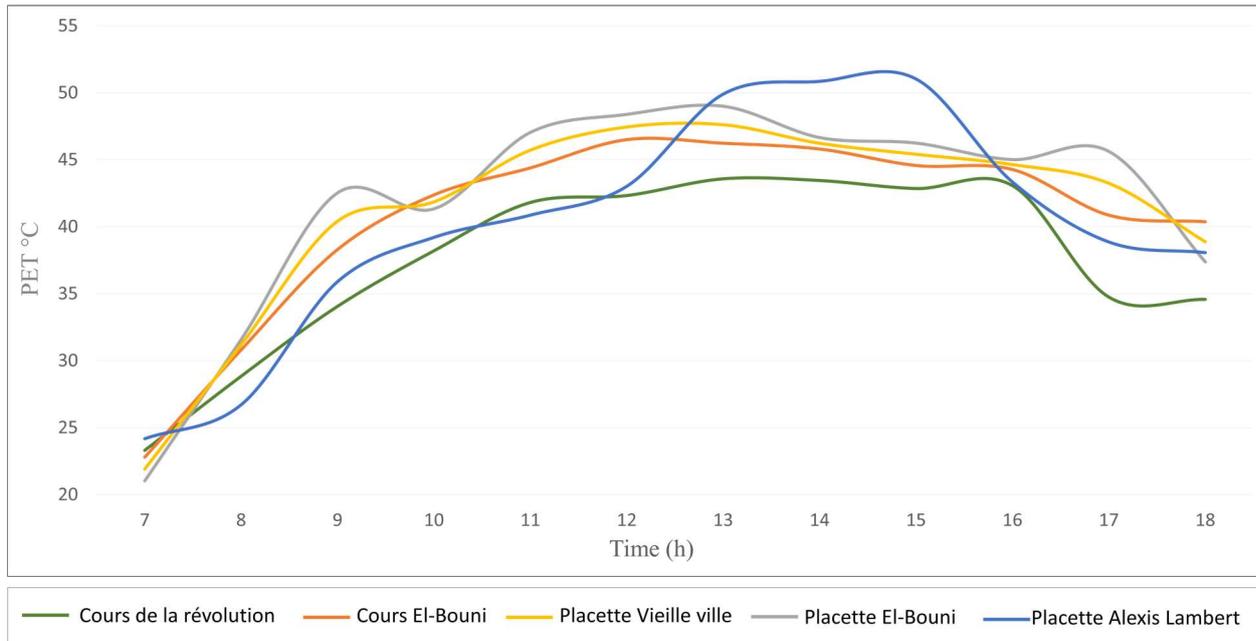


Figure IV- 45 : Graphe représentant la variation du PET pour les cinq placettes

#### IV.5.2.2 SET

La Figure IV- 41 présente les cartes de l'indice de confort SET pour les cinq placettes à 14h00, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. On remarque d'après ces cartes une différence entre les cinq placettes. Le SET des placettes du centre-ville est plus bas que celui d'El-Bouni. Le SET minimal à 14h00, se trouve au niveau de la placette Alexis Lambert (SET= 34.2°C), alors que le SET maximal est enregistré au niveau du cours El-Bouni (SET= 34.9 °C). On note aussi que le SET au niveau de la placette de la vieille ville est plus élevé que la placette Alexis Lambert et le cours de la révolution. Le graphe (Figure IV- 42) présente la variation de SET pendant la journée pour les cinq placettes. On remarque que le SET du cours de la révolution est le plus bas pendant toute la journée, et le SET au niveau de la placette El-Bouni. La placette Alexis Lambert présente des valeurs de SET très élevé entre 12h00 et 16h00. Il est important de noter que ces graphes sont établis à partir d'une moyenne calculée à partir des récepteurs ponctuels, donc ils ne représentent pas toute l'espace de la place, mais on a essayé de toucher des endroits différents de chaque placette.

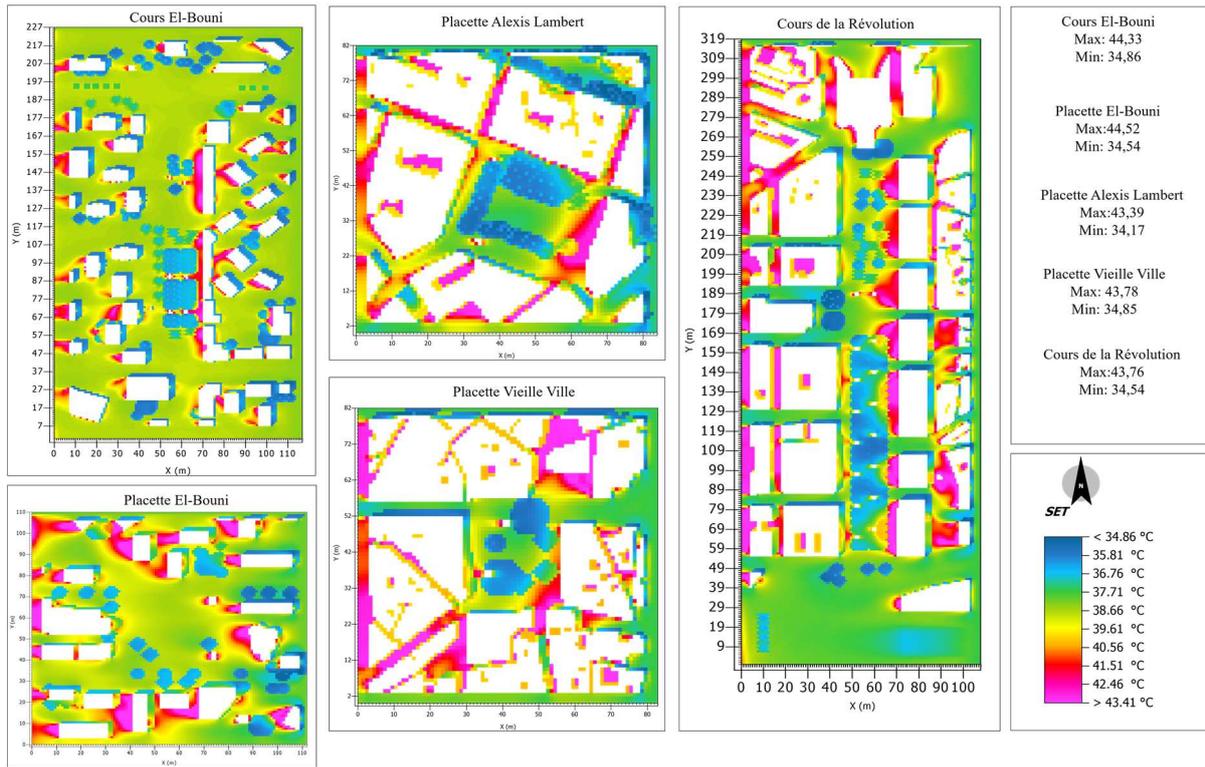


Figure IV- 46 : Carte représentant le SET pour les cinq placettes

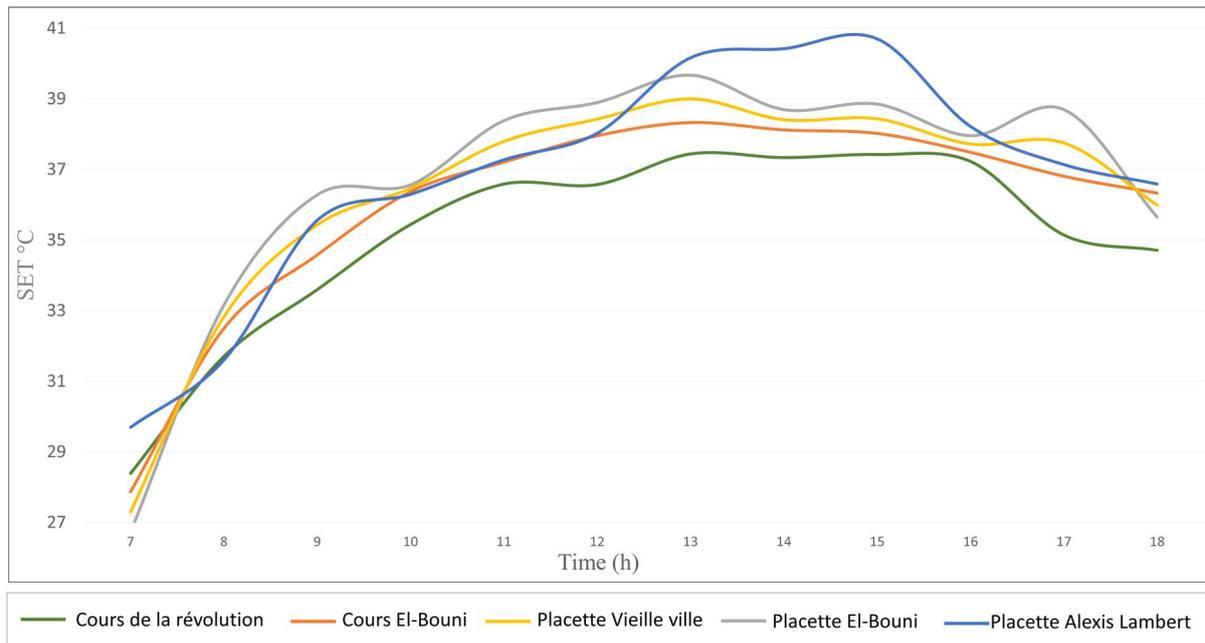


Figure IV- 47 : Graphe représentant la variation du SET pour les cinq placettes

### IV.5.2.3 UTCI

La Figure IV- 43 présente les cartes de l'indice de confort UTCI pour les cinq placettes à 14h00, avec les valeurs min et max enregistrées dans chacune. On remarque d'après ces cartes une différence entre les cinq placettes. L'UTCI des placettes du centre-ville est plus bas que celui

d'El-Bouni. L'UTCI minimal à 14h00, se trouve au niveau de la placette Alexis Lambert (UTCI= 36.6°C), alors que l'UTCI maximal est enregistré au niveau de la placette de la vieille ville (UTCI= 37.6 °C). L'UTCI dans les espaces végétalisés au niveau de la placette et le cours El-Bouni est plus élevé que L'UTCI au niveau des espace végétalisé des autres placettes (cours de la révolution, placette Alexis Lambert et placette de la vieille ville). Le graphe (Figure IV-44) présente la variation d'UTCI pendant la journée pour les cinq placettes. On remarque que l'UTCI du cours de la révolution est le plus bas pendant presque toute la journée, et l'UTCI au niveau de la placette El-Bouni est le plus haut. Avant 12h00, la placette Alexis Lambert présente des valeurs d'UTCI proches à celles du cours de la révolution, mais entre 12h00 et 16h00, ces valeurs augmentent d'une façon remarquable.

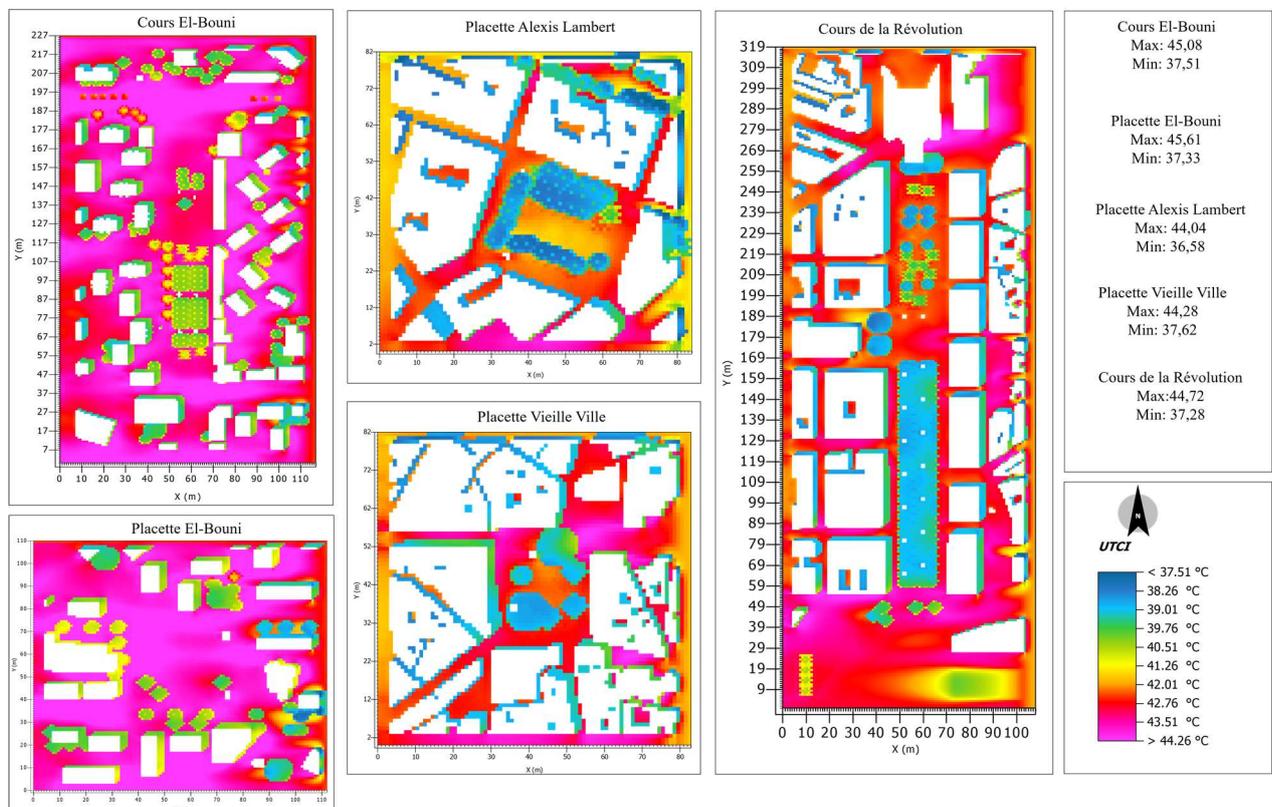


Figure IV- 48 : Carte représentant l'UTCI pour les cinq placettes

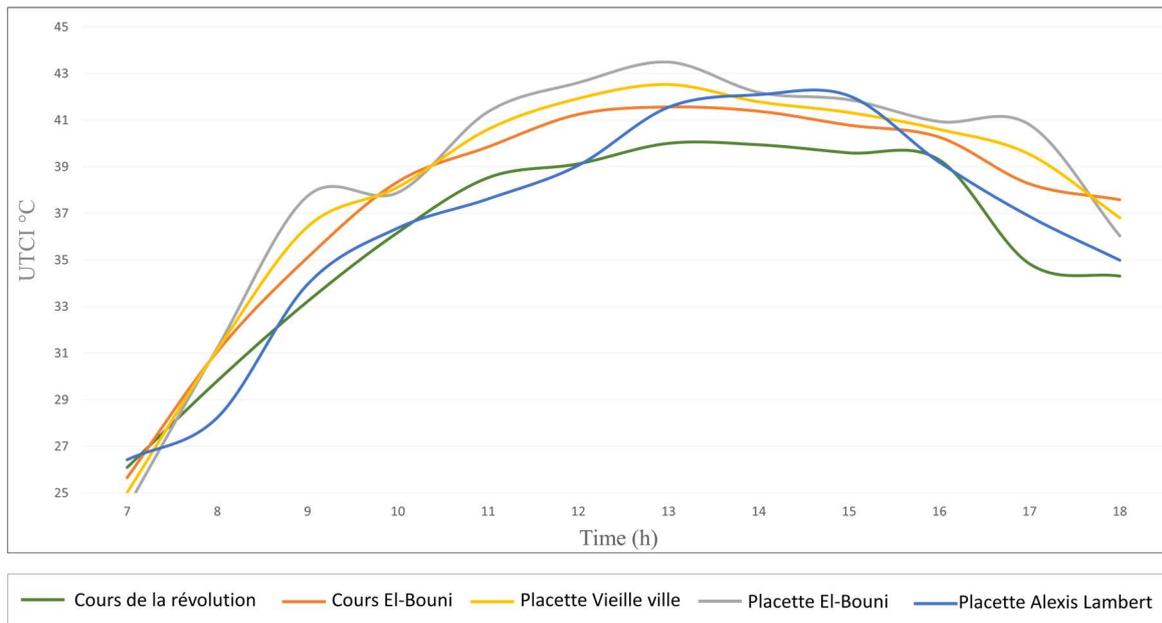


Figure IV- 49 : Graphe représentant la variation de l'UTCI pour les cinq placettes

## Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la simulation numérique en utilisant le modèle Envi-met pour calculer les paramètres microclimatiques qui affecte le confort thermique extérieur, à savoir : la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température moyenne radiante. L'objectif de ce chapitre était de valider les résultats de la simulation numérique par les mesures de terrain en calculant le coefficient de détermination  $R^2$ . De plus la simulation numérique nous a permis de comparer entre les places étudiées, de déterminer les différences au niveau des paramètres climatiques et les indices de confort et relier cette différence à la variation dans leur morphologie.

D'abord nous avons commencé avec une présentation du logiciel envi-met et nous avons expliqué le processus de simulation en montrant le fichier d'entrée et le fichier de sortie. Ensuite une comparaison des données de la simulation avec les mesures sur terrain vous vérifier la précision du modèle et finalement une comparaison entre les espaces étudiés a été effectuée.

L'outil ENVI-met a été choisi pour sa capacité à simuler le microclimat urbain en prenant en compte divers facteurs tels que les formes de construction, les types de végétation et les matériaux. Les données d'entrée comprennent un modèle 3D et un fichier de configuration. Le logiciel Sketchup 2021 a été utilisé pour la modélisation 3D.

Pour valider le modèle ENVI-met, les résultats de la simulation sont comparés aux mesures réelles effectuées pendant quatre jours dans chaque emplacement : le 28 juillet et le 01 août pour le centre-ville, et le 29 et le 02 août pour El Bouni. Les résultats du coefficient de détermination  $R^2$  montrent que le modèle donne des valeurs plus précises pour les emplacements d'El Bouni par rapport au centre-ville. De plus, l'écart entre les données mesurées et les données simulées diminue au fil du temps de simulation.

Nous avons établi pour chaque placette des graphes et des cartes climatiques présentant les quatre paramètres climatique à savoir : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température moyenne radiante, ainsi que des cartes des indices de confort : le PET, le SET et l'UTCI. Afin de comparer ces paramètres une moyenne a été calculée pour chaque placette à partir des données extraites des récepteurs placés lors de la simulation numérique.

La confrontation des données mesurées avec les résultats de la simulation numérique révèle que le modèle ENVI-met donne des résultats plus ou moins proches des mesures sur le terrain concernant la température de l'air. En particulier, pour la placette et le cours d'El-Bouni, les coefficients de corrélation  $R^2$  sont respectivement de 0,80 et 0,87, indiquant une corrélation relativement élevée. Cependant, cette précision diminue pour les placettes situées au centre-ville, avec des valeurs de  $R^2$  de 0,70 pour le cours de la révolution, 0,71 pour la placette Alexis Lambert, et la placette de la vieille ville. En ce qui concerne l'humidité relative, les résultats de la simulation montrent que les valeurs obtenues dans les placettes proches de la mer sont inférieures à celles mesurées.

De plus, les résultats de la simulation indiquent que la placette Alexis Lambert et le cours de la révolution présentent des températures de l'air plus basses que les autres places, avec une moyenne journalière de 32,9 °C pour les deux espaces. En revanche, la placette El-Bouni est la plus chaude, avec une moyenne de 33,6 °C. En ce qui concerne la température moyenne radiante, les valeurs les plus basses sont observées au niveau du cours de la révolution et de la placette de la vieille ville, avec des moyennes de 43 °C et 44 °C respectivement. La placette El-Bouni présente également la température moyenne radiante la plus élevée, avec une moyenne de 51,7 °C. En ce qui concerne les indices de confort thermique, les valeurs les plus basses sont enregistrées au niveau du cours de la révolution.

# **Chapitre V : Scénarios d'amélioration**

### Introduction

Ce chapitre explore différentes possibilités d'amélioration du microclimat et du confort thermique en modifiant certains paramètres morphologiques tels que l'orientation, la végétation, la hauteur et la densité des bâtiments. L'objectif est d'évaluer l'impact de chaque paramètre sur les indicateurs microclimatiques et les indices de confort thermique. Les résultats seront présentés à l'aide de cartes climatiques et de graphiques, accompagnés de discussions et d'explications détaillées.

Le chapitre aborde la seconde phase de la simulation, qui vise à créer des modèles et des simulations de scénarios ciblant à améliorer le confort. L'objectif est d'évaluer comment les aspects morphologiques impactent le microclimat et le confort thermique à l'extérieur. Cette approche nous permet de mieux comprendre comment les caractéristiques physiques de l'environnement urbain influent sur le confort thermique des occupants et d'identifier des solutions potentielles pour améliorer ces conditions.

Dans un premier temps, nous présentons les paramètres morphologiques choisis pour cette étude en montrant les scénarios choisis. La densité, la hauteur du bâti, l'orientation de l'espace et la végétation, sont les paramètres sur lesquels les scénarios d'amélioration ont été conçus. Pour chaque scénario un tableau sera établi montrant sa conception 3D, ainsi que les valeurs des paramètres morphologique. Ensuite, nous présentons des cartes climatiques et des graphes illustrant l'impact de ces paramètres sur les indicateurs climatiques à savoir ; la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température moyenne radiante et les indices du confort thermique (PET, SET, UTCI)

### V.1 Choix des paramètres morphologiques et présentation des scénarios

L'objectif des scénarios d'amélioration d'étudier dans un premier temps l'impact de chaque paramètre morphologique indépendamment sur le microclimat et les indice de confort thermique. Ensuite voir l'impact d'une combinaison de paramètres. Dans cette partie nous présentons les scénarios établis pour chaque paramètre morphologique.

#### V.1.1 Hauteur du bâti

La hauteur du bâti est un paramètre important, qui agit sur le microclimat de l'espace public, par la création de l'ombre et la diminution de la température de l'air. Nous avons choisi pour ce paramètre, deux placettes qui présentent le niveau le plus défavorable de confort thermique, qui sont : la placette El-Bouni, le Cours El-Bouni. Aussi, nous avons choisi la placette de la

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

vielle ville, afin de voir l'influence de la hauteur sur le microclimat, dans les tissus denses. Les tableaux V-1, 2, 3 présentent les scénarios établis pour la hauteur du bâti. Au niveau de la placette d'El-Bouni, on multiplie à chaque fois la hauteur du bâti par deux, jusqu'à arriver à une limite où l'amélioration devient presque nulle. La même chose concernant la placette de la vieille ville, mais en rajoutant un autre scénario, qui consiste en la multiplication de la hauteur pour un pourcentage de bâtiments : modification de la hauteur de 30% du bâti, ensuite 50% et enfin 70%. En ce qui concerne le Cours d'El-Bouni, on a multiplié la hauteur de tout le bâti par 8, ensuite on a multiplié seulement la hauteur du bâti qui entoure la placette et qui représente 50% de la surface bâti. Le tableau ci-dessous, montre les scénarios pour les trois placettes ainsi que la variation de la hauteur et du facteur de vue du ciel (SVF).

Tableau V- 1: scénarios de la hauteur du bâti de la placette El-Bouni

scénario	Conception 3D	scénario	Conception 3D
<b>Sans bâtiment</b> Hauteur moyenne: 0 m SVF: 0,7		<b>Hauteur × 4</b> Hauteur moyenne: 60 m SVF: 0,4	
<b>État de lieu</b> Hauteur moyenne: 15 m SVF: 0,55		<b>Hauteur × 6</b> Hauteur moyenne: 90 m SVF: 0,35	
<b>Hauteur × 2</b> Hauteur moyenne: 30 m SVF: 0,51		<b>Hauteur × 8</b> Hauteur moyenne: 120 m SVF: 0,32	

Tableau V- 2: scénarios de la hauteur du bâti du cours El-Bouni

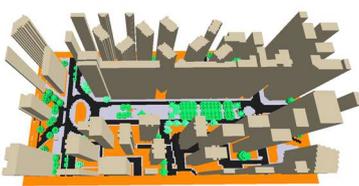
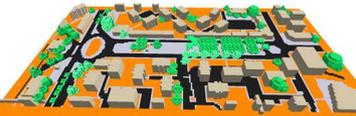
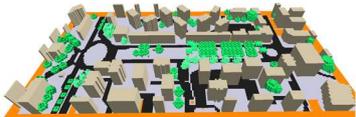
scénario	Conception 3D	scénario	Conception 3D
Sans bâtiment Hauteur moyenne: 0 SVF: 0,58		Hauteur x 8 Hauteur moyenne: 96 SVF: 0,23	
État de lieu Hauteur moyenne: 12 SVF: 0,49		Hauteur 50% Hauteur moyenne: 43,5 SVF: 0,25	
Hauteur x 2 Hauteur moyenne: 24 SVF: 0,41			

Tableau V- 3: scénarios de la hauteur du bâti de la placette de la vieille ville

scénario	Conception 3D	scénario	Conception 3D	scénario	Conception 3D
Sans bâtiment Hauteur moyenne: SVF:		Hauteur x 4 Hauteur moyenne: SVF:		Hauteur 30% Hauteur moyenne: SVF:	
État de lieu Hauteur moyenne: SVF:		Hauteur x 6 Hauteur moyenne: SVF:		Hauteur 50% Hauteur moyenne: SVF:	
Hauteur x 2 Hauteur moyenne: SVF:		Hauteur x 8 Hauteur moyenne: SVF:		Hauteur 70% Hauteur moyenne: SVF:	

### V.1.2 Densité du bâti

La densité du bâti qui entoure l'espace public, modifie le microclimat et le niveau de confort thermique. Afin de mesurer son impact, nous avons choisi deux espaces qui se caractérisent par une densité urbaine faible : le cours El-Bouni, et la placette El-Bouni (voir tableaux V-4 et 5). Pour la place du cours, nous avons établi quatre conceptions : la première conception est sans bâtiment, la deuxième représente l'état de lieu, ensuite, on a multiplié la densité par deux, et enfin on a réduit la largeur de la place. Concernant la placette d'El-Bouni, on a élaboré quatre conceptions ; la première sans bâtiment, la deuxième représente l'état de lieu, ensuite, on a multiplié la densité par deux, et par trois. Le tableau ci-dessous, montre les scénarios pour les deux placettes ainsi que la variation dans la densité du bâti et le facteur de vue du ciel (SVF).

Tableau V- 4: scénarios de la densité du bâti de la placette El-Bouni

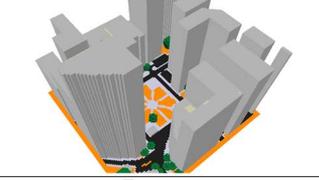
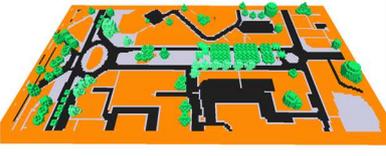
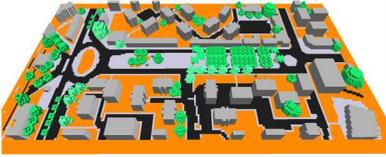
scénario	Conception 3D	scénario	Conception 3D
Sans bâtiment Densité Bâti: 0 SVF: 0,7		Densité x 3 Densité Bâti: 0,51 SVF: 0,49	
État de lieu Densité Bâti: 0,17 SVF: 0,55		Densité +hauteur 100% Densité Bâti: 0,51 SVF: 0,25	
Densité x 2 Densité Bâti: 0,34 SVF: 0,5		Densité +hauteur 70% Densité Bâti: 0,51 SVF: 0,36	

Tableau V- 5: scénarios de la densité du bâti du cours El-Bouni

scénario	Conception 3D	scénario	Conception 3D
Sans bâtiment Densité Bâti: 0 SVF: 0,58		Densité x 2 Densité Bâti: 0,38 SVF: 0,47	
État de lieu Densité Bâti: 0,19 SVF: 0,48		largeur Densité Bâti: 0,19 SVF: 0,44	

### V.1.3 Orientation

L'orientation constitue aussi un paramètre important, qui a un impact sur le microclimat surtout au niveau des rues. Pour ce paramètre, nous avons choisi deux places qui se caractérisent par une forme longitudinale, qui sont le cours de la révolution et le cours El-Bouni. Ces deux places se rapprochent dans leur forme de la rue, donc l'orientation constituera un élément de conception essentiel. L'évaluation de l'impact de l'orientation s'effectue sur deux étapes. La première sans végétation et la deuxième avec végétation, pour voir l'influence de l'orientation de la place avec la présence et avec l'absence du végétal.

### V.1.4 Végétation

On a appliqué le scénario de la végétation sur les cinq placettes. Ce scénario constitue en l'élimination de la végétation pour chaque placette, et comparer entre les deux cas (sans et avec végétation). L'objectif est de voir l'influence de la végétation sur le microclimat et le confort thermique au niveau des morphologies différentes. Le tableau ci-dessous présente le scénario de la végétation.

### V.2 Impact de la hauteur du bâti

On a choisi les résultats de la placette d'El-Bouni pour les analyser. Concernant la vieille ville et le cours de la révolution, ils sont présentés en annexe 02. En outre la synthèse de de tous le scénario de la hauteur sera dévoilée en conclusion de ce chapitre.

#### V.2.1 Impact de la hauteur du bâti sur les paramètres climatiques

Le tableau V-7 présente les valeurs moyennes des paramètres climatiques enregistrées pour les scénarios de hauteur dans la placette d'El-Bouni. Les résultats de la placette de la vieille ville et du cours d'El-Bouni sont présentés en annexe03. Les résultats démontrent une corrélation directe entre la hauteur du bâti et la température ( $T_{air}$ ,  $T_{mrt}$ ), ainsi que l'humidité relative. En ce qui concerne la température de l'air, une diminution moyenne de  $1,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  est enregistrée entre le scénario de 15 mètres de hauteur et celui de 120 mètres. Cette baisse est plus marquée dans la température moyenne radiante (avec une moyenne de  $11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De plus, on observe une légère augmentation du taux d'humidité (avec une moyenne de  $1,7\%$ ). Par ailleurs, on constate que la variation de la vitesse de l'air est indépendante de la hauteur du bâti.

Concernant la placette de la vieille ville, on enregistre une différence de  $1,18\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans la température d'air et  $11,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans la température moyenne radiante entre le scénario de 13,5 mètres de hauteur et celui de 108 mètres.

La hauteur du bâti ne constitue pas le seul paramètre morphologique qui modifie le microclimat. Le facteur de vue de ciel joue également un rôle important dans la diminution de la température. Le quatrième scénario et le huitième scénario ont la même hauteur moyenne du bâti (54 mètres), mais des facteurs de vue de ciel différents. Entre ces deux scénarios, on remarque une très légère différence de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans la température de l'air et une différence de  $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans la température moyenne radiante. De plus, parfois le microclimat de l'espace dépend aussi de la disposition du bâti. Prenons l'exemple du cinquième scénario (une hauteur moyenne de 81 mètres et un facteur

de vue de ciel égal à 0,31) et du dernier scénario (une hauteur moyenne de 75,6 mètres et un facteur de vue de ciel égal à 0,34). On constate que le dernier scénario présente une température de l'air plus basse que le cinquième scénario, avec une différence moyenne de 0,5 °C. Cela est dû à la différence dans la disposition du bâti.

Il est également important de noter que la hauteur du bâti et le facteur de vue de ciel contribuent à la diminution de la température moyenne radiante. En revanche, ils participent parfois à l'augmentation de la température de l'air. Cela dépend de la configuration spatiale et de la disposition du bâti qui entoure l'espace public.

Tableau V- 6: récapitulation des scénarios de hauteur (paramètres microclimatiques placette El-Bouni)

Scénario hauteur placette el Bouni	Hauteur moyenne (m)	Facteur de vue de ciel	Vitesse de l'air m/s	Température de l'air °C	Humidité relative %	Température moyenne radiante °C
État de lieu	15	0,555	0,826979584	33,59441667	43,665625	51,70504167
Sans bâtiment	0	0,7	1,363970834	33,43475	43,71945833	52,17970833
Hauteur × 2	30	0,51	0,896665834	33,1945	44,124625	48,320125
Hauteur × 4	60	0,405	0,92793625	32,83591667	44,709625	43,318
Hauteur × 6	90	0,355	0,99519125	32,57825	45,146875	42,01370834
Hauteur × 8	120	0,325	1,10959625	32,45033334	45,304	39,90729167

### V.2.1.1 Température de l'air

On remarque d'après les cartes (Figure V- 1) que la température de l'air baisse à chaque fois la hauteur du bâti augmente. La température baisse d'une manière significative dans les endroits proches des bâtiments, les températures minimales et maximales sont mentionnées pour chaque scénario dans les cartes. Les graphes (Figure V- 1) montrent la variation de la température de l'air le long de la journée. Les données de la température de l'air sont récupérées des deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près d'un arbre et un bâtiment. Les résultats montrent que dans le premier récepteur, l'écart de la température d'air entre chaque scénario est presque constant avec une moyenne de 0.1°C sauf pour le troisième et le quatrième scénario (hauteur×2 et hauteur×4) l'écart est plus important égal à 0.3 °C. On note aussi au niveau du récepteur 02, que l'élimination du bâti, a participé à la diminution de la température de l'air avec 0.4 °C au niveau du récepteur 02. Cela peut être expliqué par la présence de la végétation, ce qui indique que la présence de la végétation modifie l'impact de la hauteur du bâti sur la température de l'air. De plus, on voit que l'écart entre le cinquième et le sixième scénario (hauteur×6 et hauteur×8) est presque nul.

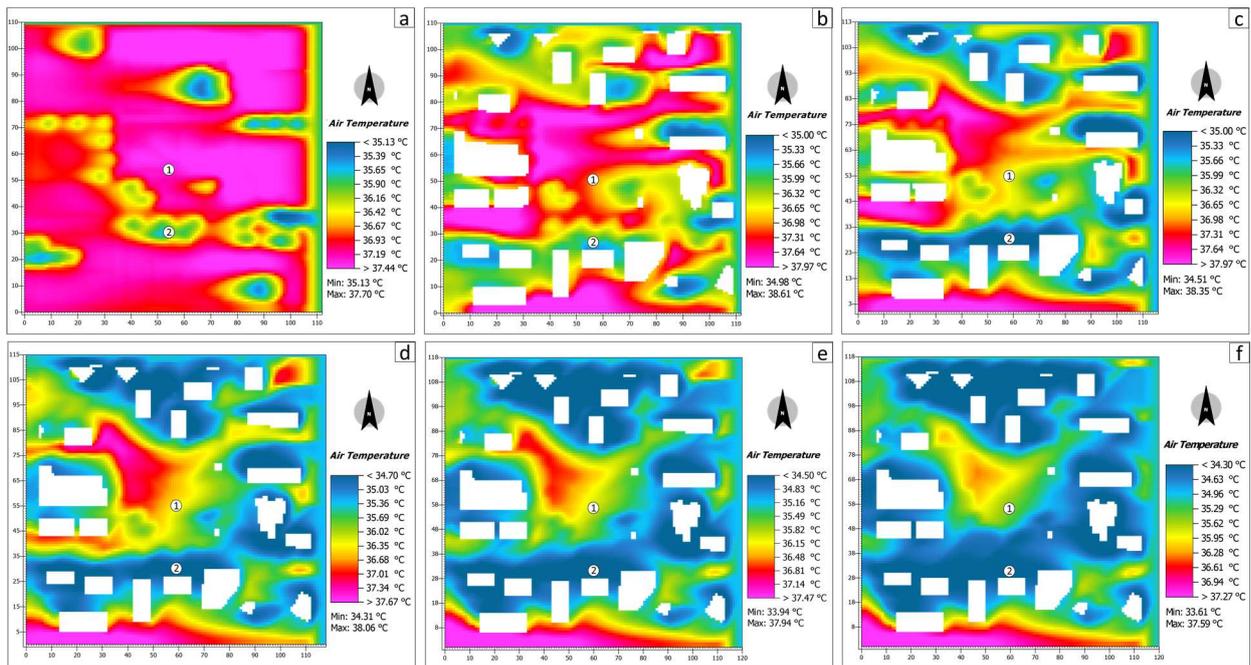


Figure V- 2: Carte de la Température d'air pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur  $\times$  2, d) hauteur  $\times$  4, e) hauteur  $\times$  6, f) hauteur  $\times$  8

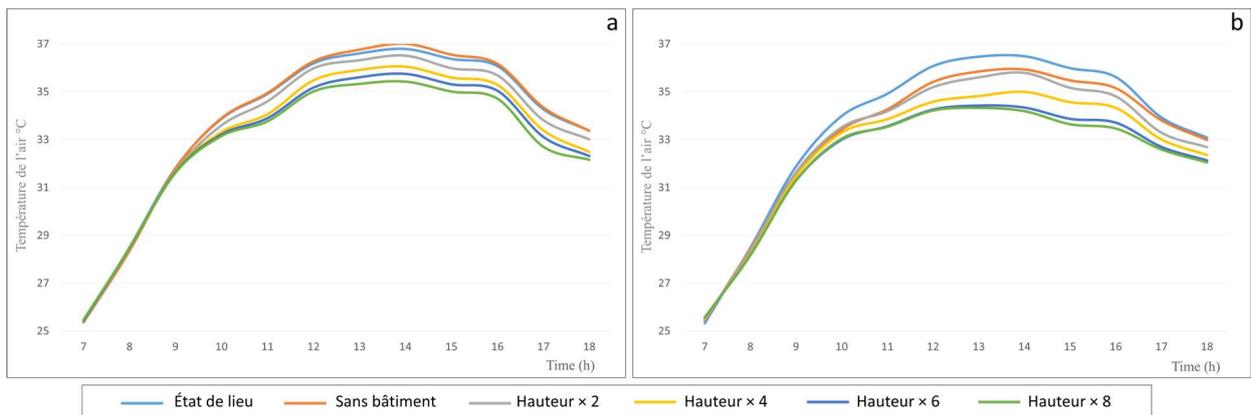


Figure V- 3 : Graphe représentant les Températures enregistrées dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.2.1.2 Humidité relative

Les cartes (Figure V- 3) montrent la répartition de l'humidité relative pour chaque scénario, ainsi que les valeurs minimales et maximales pour chaque scénario. On voit que l'humidité augmente à chaque fois la hauteur du bâti augmente, surtout aux alentours des bâtiments. Les graphes (Figure V- 4) montrent la variation de l'humidité relative durant la journée. Les données sont récupérées des deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près d'un arbre et un bâtiment. Les résultats montrent que le premier scénario (sans bâtiment) présente le taux d'humidité le plus bas au niveau du récepteur

01, alors que dans le récepteur 02, l'humidité la plus basse est enregistrée pendant le deuxième scénario (état de lieu). On constate donc que la présence de la végétation modifie l'impact de la hauteur du bâti sur l'humidité relative. De plus, on voit que la hausse de l'humidité entre chaque scénario diminue à chaque fois la hauteur augmente.

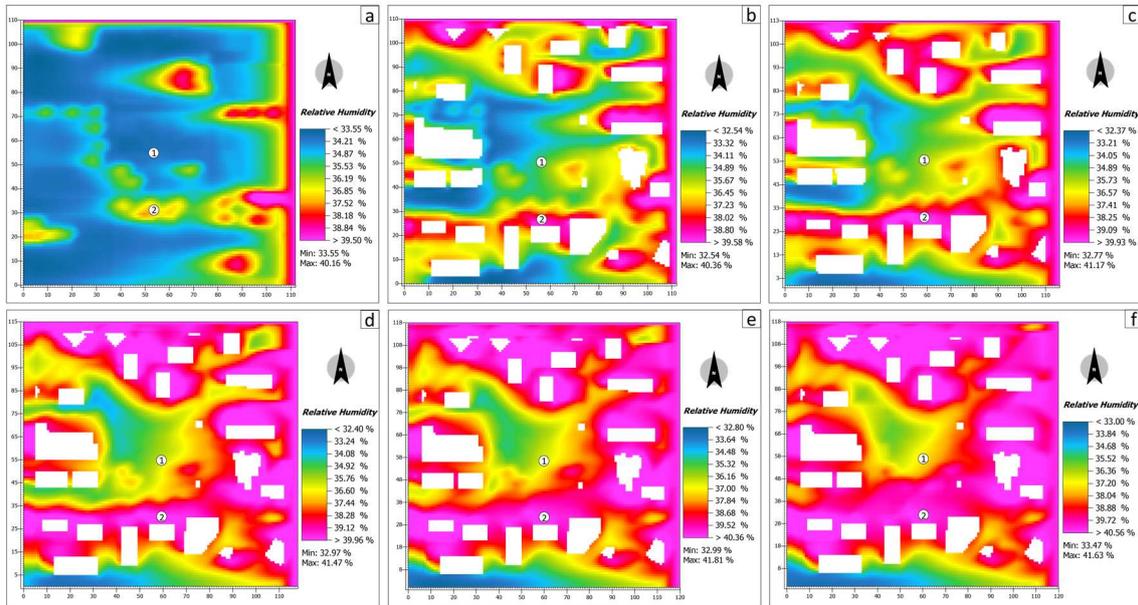


Figure V- 4 : Cartes de l'Humidité relative pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8

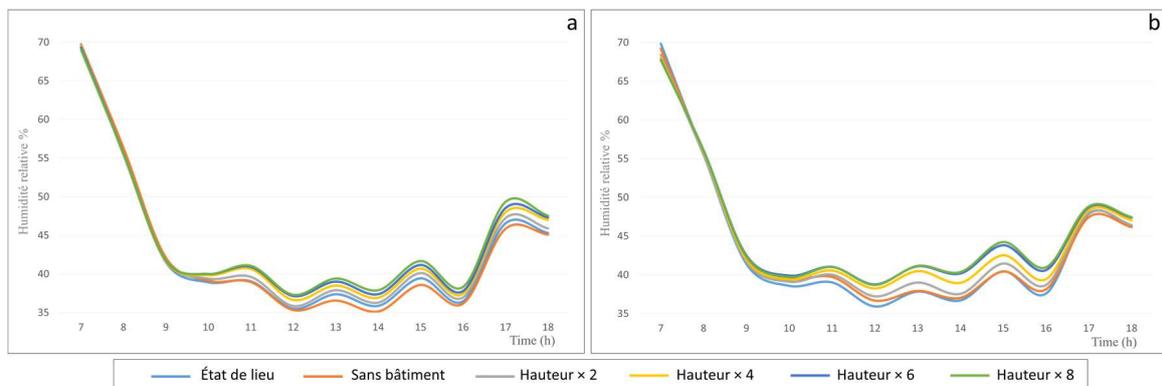


Figure V- 5 : Graphe de l'Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.2.1.3 Vitesse du vent

Les cartes (Figure V- 5) montrent la répartition de la vitesse du vent, et les valeurs minimales et maximales pour chaque scénario. On voit que la vitesse s'accélère à chaque fois que la hauteur du bâti agrandisse, notamment dans les espaces entre les bâtiments. Toutefois, Les graphes (Figure V- 6) montrent que la première conception (sans bâtiment) présente des vitesses plus élevées que les autres sur les deux récepteurs. On note aussi une différence entre

les deux récepteurs ; au niveau du premier récepteur, on remarque l'impact de la hauteur sur la vitesse du vent (corrélation directe), contrairement au récepteur 02, où ne peut pas déterminer le rapport entre la hauteur du bâti et la vitesse du vent. On constate donc que la hauteur accélère la vitesse du vent au niveau des endroits bouclé entre les bâtiments, mais aussi au niveau de la placette d'une façon moindre.

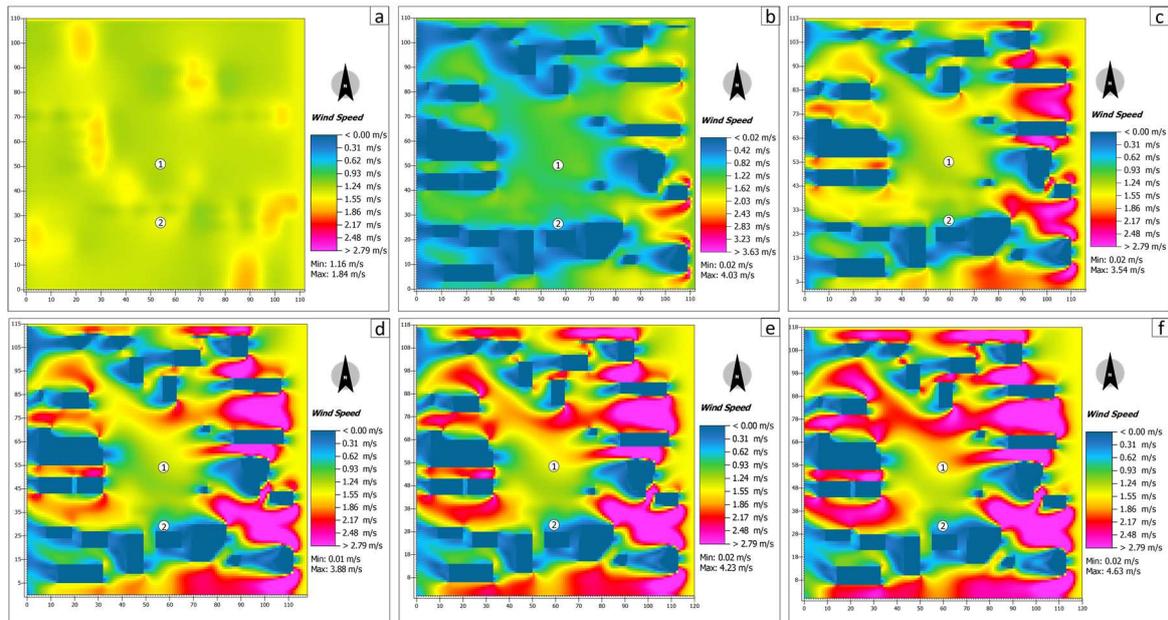


Figure V- 6 : Carte de la Vitesse de l'air pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur  $\times$  2, d) hauteur  $\times$  4, e) hauteur  $\times$  6, f) hauteur  $\times$  8

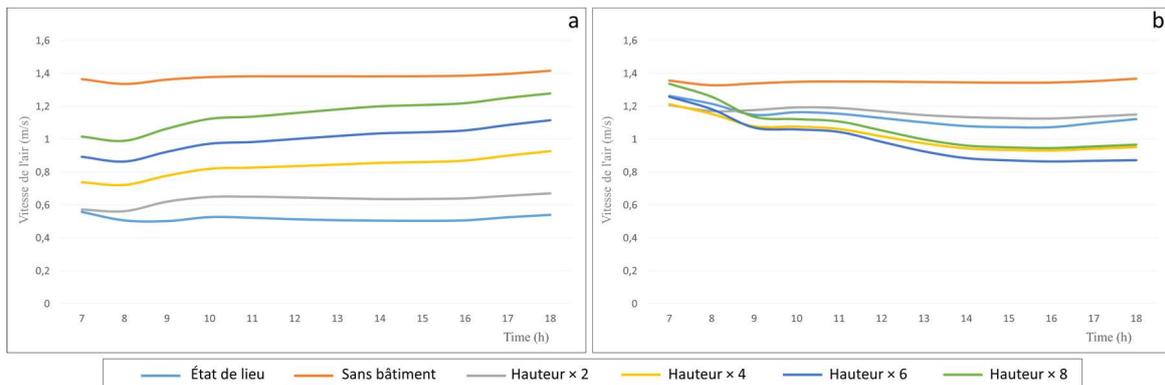


Figure V- 7 : Graphe de la Vitesse de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.2.1.4 Température moyenne radiante

La température moyenne radiante baisse à chaque fois la hauteur du bâti augmente. La  $T_{mrt}$  minimale est située dans les endroits ombragé, les valeurs minimales et maximales sont mentionnées pour chaque scénario dans les cartes (Figure V- 7). On remarque d'après ces cartes que la hauteur de bâti influe sur la température moyenne radiante à travers l'ombre portée des

bâtiments, et modifie aussi la Tmrt au niveau des espaces non ombragés. Les graphes (Figure V- 8) montrent la variation de la Tmrt le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâtiment. Les résultats montrent qu'au niveau des deux récepteurs, l'écart de la Tmrt est négligeable entre le 1<sup>er</sup> scénario (sans bâtiment) et le 2<sup>ème</sup> scénario (état de lieu). La Tmrt baisse dans le 3<sup>ème</sup> scénario (hauteur× 2) d'une moyenne de 3.55 °C au niveau 1<sup>er</sup> récepteur et 3.2 °C au niveau du 2<sup>ème</sup> récepteur. Dans le 4<sup>ème</sup> scénario (hauteur × 4) la Tmrt baisse d'une moyenne de 7.45°C au niveau 1<sup>er</sup> récepteur et 8.8°C au niveau du 2<sup>ème</sup> récepteur, par rapport au scénario précédent .De plus, on voit que l'écart entre le cinquième et le sixième scénario (hauteur×6 et hauteur×8) est presque nul, sauf de 15h00 à 18h00 pour le récepteur 01 où on enregistre un écart qui peut arriver à 21°C.

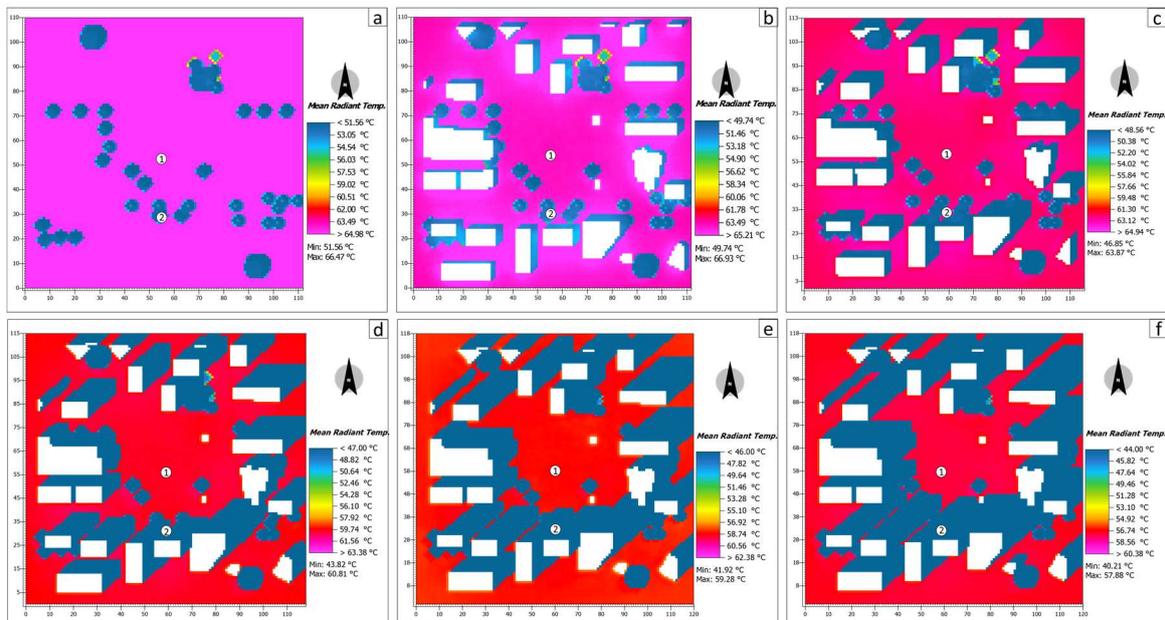


Figure V- 8 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8

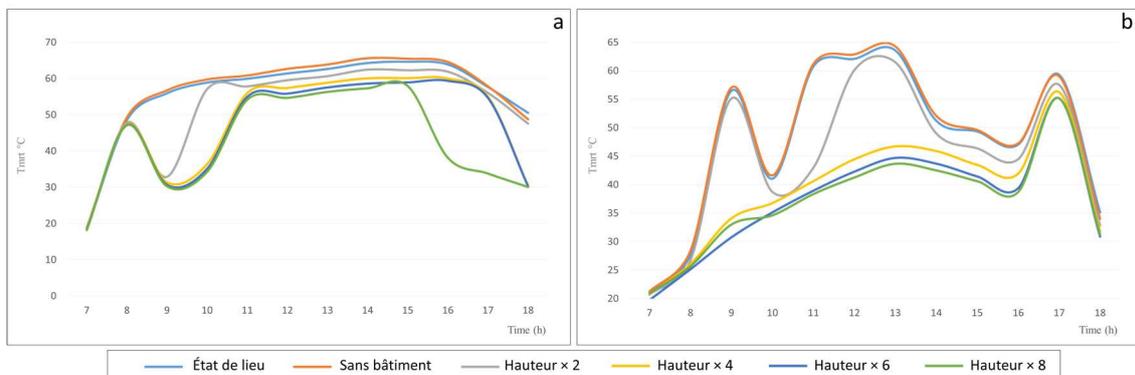


Figure V- 9 : Graphe de la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

**V.2.2 Impact de la hauteur du bâti sur les indices de confort thermique**

Le tableau V-8 présente les valeurs moyennes des indices du confort thermique enregistrées pour les scénarios de hauteur dans la placette d'El-Bouni. Les résultats de la placette de la vieille ville et du cours d'El-Bouni sont présentés en annexe 02. Les résultats démontrent que la hauteur du bâti participe à la baisse des valeurs des indices de confort (PET, SET, UTCI). En ce qui concerne le PET, une diminution moyenne de 6.9 °C est enregistrée entre le scénario de 15 mètres de hauteur et celui de 120 mètres, on enregistre aussi une baisse de 2.8 °C et 4°C au niveau du SET et l'UTCI respectivement.

Concernant la placette de la vieille ville, on enregistre une différence de 5.8 °C dans le PET, 1.6 °C dans le SET et 3.25 °C dans l'UTCI, entre le scénario de 13.5 mètres de hauteur et celui de 108 mètres. La hauteur du bâti et le facteur de vue de ciel participe à l'amélioration du confort thermique. Cependant, dans certain cas, on trouve le contraire au niveau de l'UTCI.

Tableau V- 7: récapitulation des scénarios de hauteur (indices de confort placette El-Bouni)

Scénario hauteur placette el Bouni	Hauteur moyenne (m)	Facteur de vue de ciel	PET °C	SET °C	UTCI °C
État de lieu	15	0,555	41,822875	36,629125	38,37670834
Sans bâtiment	0	0,7	40,89408333	35,468625	37,91458334
Hauteur × 2	30	0,51	39,66379167	35,74854167	37,16829167
Hauteur × 4	60	0,405	37,09095834	34,67541667	35,64033334
Hauteur × 6	90	0,355	36,31545834	34,321125	35,15270834
Hauteur × 8	120	0,325	34,93125	33,80879167	34,337125

**V.2.2.1 PET (Température équivalente physiologique)**

Le PET baisse à chaque fois que la hauteur du bâti augmente. La répartition du PET se ressemble à celle de la Tmrt, où on trouve que les valeurs basses du PET sont situées dans les endroits ombragé, les températures minimales et maximales sont mentionnées pour chaque scénario dans les cartes (Figure V- 9). On remarque d'après ces cartes que la hauteur de bâti influe sur le PET à travers l'ombre portée des bâtiments, et modifie aussi le PET au niveau des espaces non ombragés. Les graphes (Figure V- 10) montrent la variation du PET le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâtiment. En général, on voit que le PET baisse lors de l'augmentation de la hauteur, sur les deux récepteurs, mais cette baisse est plus significative dans le 2<sup>ème</sup> récepteur. Concernant le 3<sup>ème</sup> scénario (hauteur × 2) les graphes montrent que la baisse du PET est nulle au niveau du 2<sup>ème</sup> récepteur, par rapport au 1<sup>er</sup> scénario (sans bâtiment) sauf à 9h00, où on enregistre une baisse de 9.8 °C. Les valeurs de PET commencent à baisser

d'une manière remarquable à partir 4<sup>ème</sup> scénario (hauteur×4). De plus, on voit que l'écart entre le cinquième et le sixième scénario (hauteur×6 et hauteur×8) est presque nul, sauf de 15h00 à 18h00 pour le récepteur 01 où on enregistre un écart qui arrive à 10.2°C.

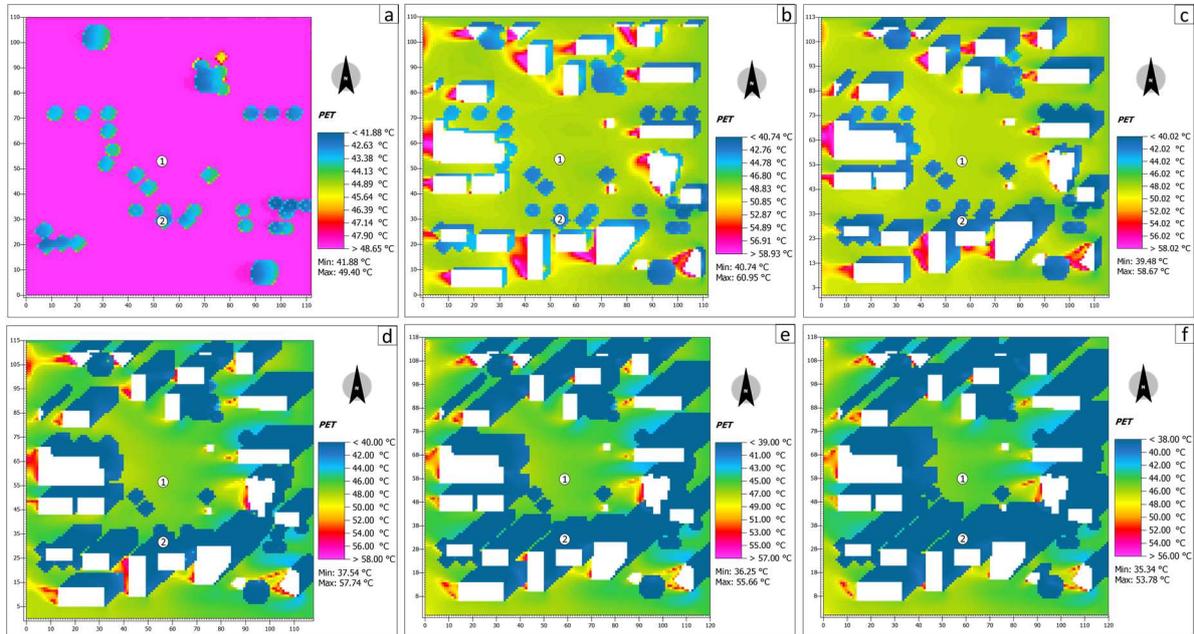


Figure V- 10 : Carte du PET pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 4, e) hauteur × 6, f) hauteur × 8

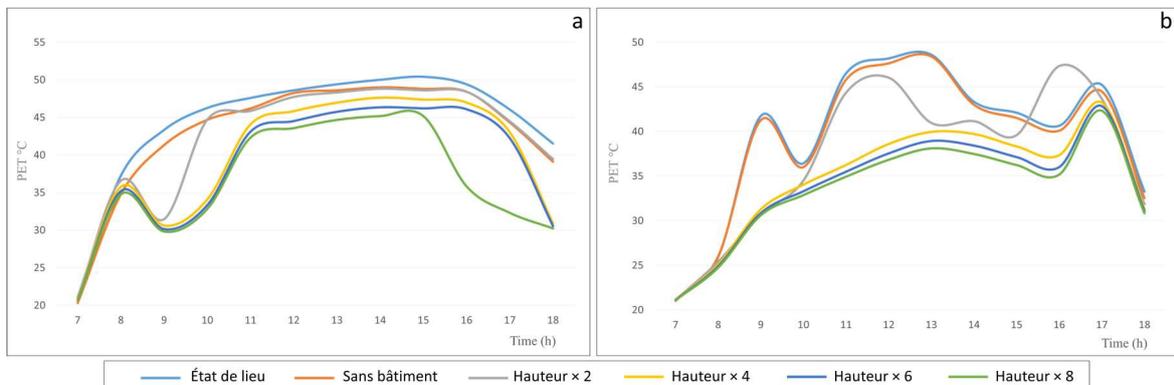


Figure V- 11 : Graphe du PET enregistré dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.2.2.2 SET (température effective standard)

Lorsque la hauteur du bâti augmente, le SET baisse. On note la même chose que la Tmrt et le PET ; les valeurs minimales du SET se trouvent dans les endroits ombragés, les valeurs minimales et maximales sont mentionnées pour chaque scénario dans les cartes (Figure V- 11) On remarque d'après ces cartes que la hauteur de bâti influence le SET à travers l'ombre portée des bâtiments. Aussi les espaces exposés au soleil et proches des bâtiments présentent des

niveaux de SET très élevé, contrairement aux espaces loin du bâti. Les graphes (Figure V- 12) montrent la variation du SET le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette proche d'un bâtiment. En général, on voit que le SET baisse à chaque fois la hauteur augmente. Au niveau du récepteur 01, on remarque que l'ajout du bâti a participé à une amélioration remarquable, contrairement au récepteur 02, où le SET, augmente avec l'implantation du bâti. L'amélioration dans le 2ème récepteur commence à partir du scénario 4 (hauteur  $\times$  4) et devient nulle et même inverse dans le dernier scénario (hauteur  $\times$  8), où enregistre une augmentation dans le SET l'après-midi.

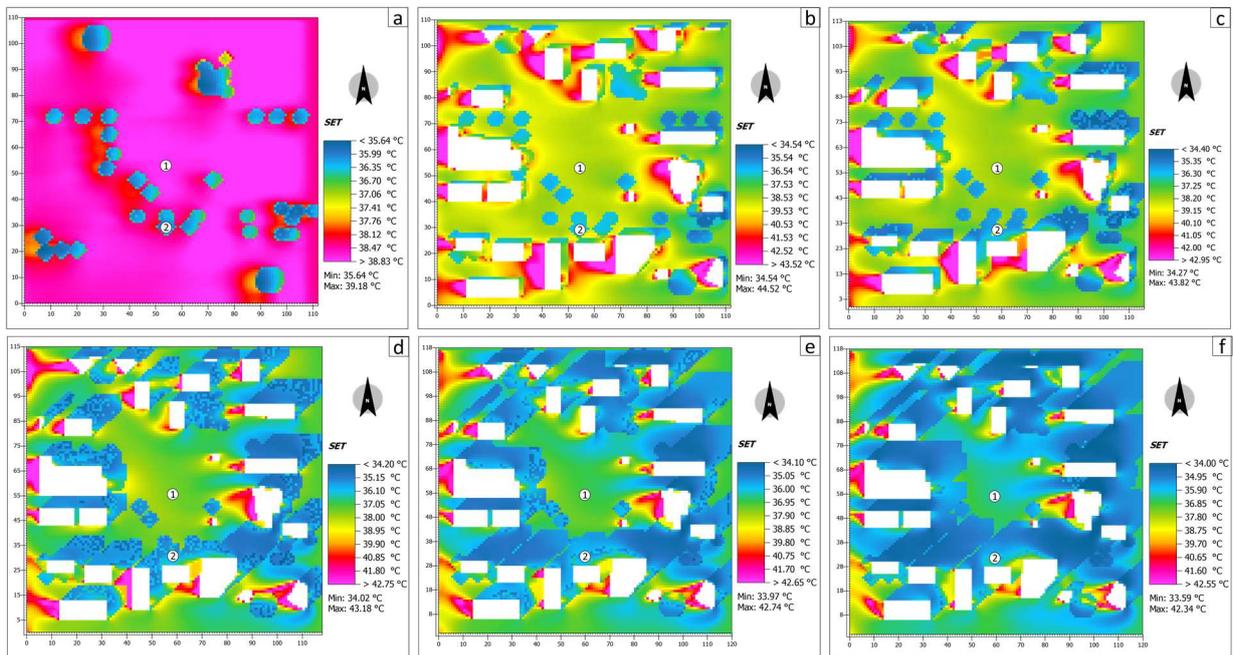


Figure V- 12 : Carte du SET pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur  $\times$  2, d) hauteur  $\times$  4, e) hauteur  $\times$  6, f) hauteur  $\times$  8

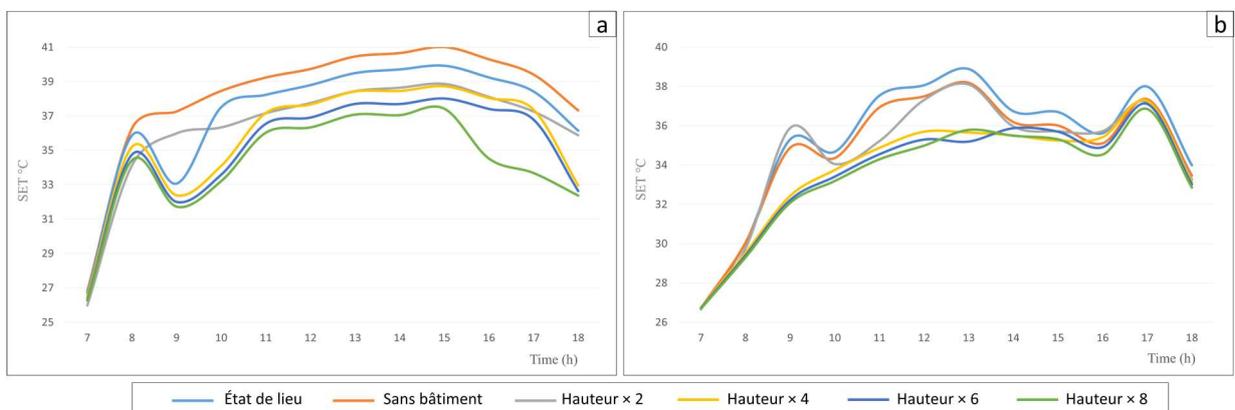


Figure V- 13 : Graphe du SET enregistré dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

V.2.2.3 UTCI (L'indice universel du climat thermique)

Les cartes (Figure V- 13) montrent la répartition et les valeurs minimales et maximales de l'UTCI pour chaque scénario. Lorsque la hauteur du bâti augmente, l'UTCI baisse, les valeurs minimales se trouvent dans les endroits ombragés. Les graphes (Figure V- 14) montrent la variation de l'UTCI le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette proche d'un bâtiment. Au niveau du récepteur 01, on remarque que l'augmentation de la hauteur a un impact significatif entre 08h00 et 11h00 jusqu'au scénario 04(hauteur  $\times$  4), ensuite la baisse dans l'UTCI devient presque nulle au-delà du scénario 04, avant 11h00. La baisse de l'UTCI devient plus significative l'après-midi concernant le dernier scénario (hauteur  $\times$  8). Dans le récepteur 02, on remarque que l'amélioration est plus remarquable au niveau du scénario 04 (hauteur  $\times$  4) et diminue pour les scénarios qui viennent juste après (hauteur  $\times$  6 et hauteur  $\times$  8).

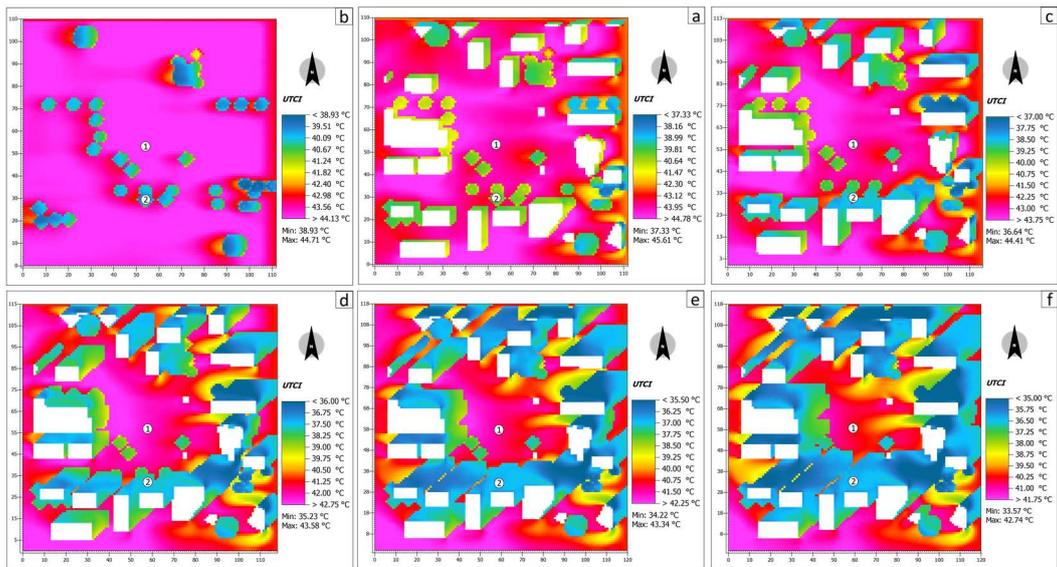


Figure V- 14 : Carte de l'UTCI pour le scénario d'hauteur de la placette d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur  $\times$  2, d) hauteur  $\times$  4, e) hauteur  $\times$  6, f) hauteur  $\times$  8

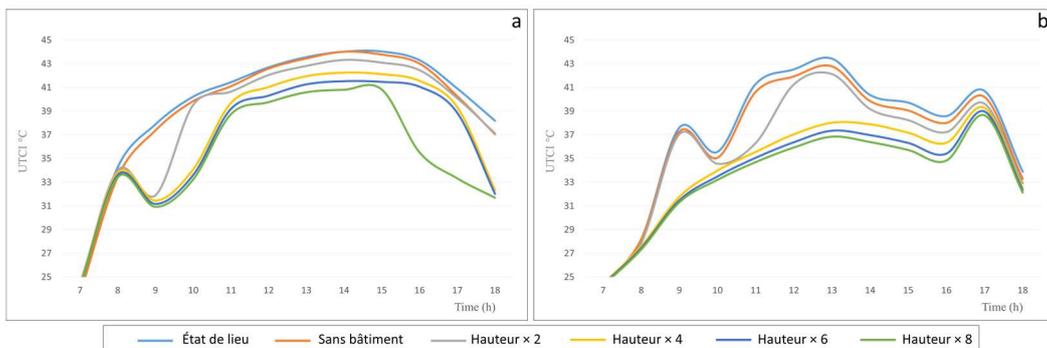


Figure V- 15 : Graphe de l'UTCI enregistré dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02.

### V.3 Impact de la densité du bâti

On a choisi les résultats de la placette d'El-Bouni pour analyser l'impact de la densité du bâti sur les paramètres microclimatiques et les indices du confort thermique. Concernant les résultats du cours El-Bouni, ils sont présentés en annexe 02. En outre, la synthèse de de tous le scénario de la densité sera discernée en conclusion de ce chapitre.

#### V.3.1 Impact de la densité du bâti sur les paramètres climatiques

Le tableau V-9 présente les valeurs moyennes des paramètres climatiques enregistrées pour différents scénarios de densité dans la placette d'El-Bouni. Les résultats du cours d'El-Bouni sont présentés en annexe 02. Les résultats démontrent une corrélation entre la densité du bâti et la température ( $T_{air}$ ,  $T_{mrt}$ ). En ce qui concerne la température de l'air, une diminution moyenne de 0,14 °C est enregistrée entre le scénario 01 (densité égale à 0) et le quatrième scénario (densité égale à 0,51). Cette baisse est plus marquée dans la température moyenne radiante (avec une moyenne de 4,5 °C). De plus, on constate une légère baisse dans la vitesse de l'air. Par ailleurs, nous avons proposé un autre scénario combinant la hauteur et la densité du bâti. Les résultats montrent que la combinaison de ces deux paramètres conduit à une diminution plus importante que celle de la hauteur seule. Dans le scénario "hauteur-densité", on enregistre une baisse de 1,53 °C dans la température de l'air ( $T_{air}$ ) et de 15 °C dans la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ). Pour le scénario "hauteur", on observe une baisse de 1 °C dans la  $T_{air}$  et de 12,3 °C dans la  $T_{mrt}$ .

Tableau V- 8: récapitulation des scénarios de densité (paramètres climatiques placette El-Bouni)

Scénario densité placette El-Bouni	Densité Bâti	Facteur de vue de ciel	Vitesse de l'air m/s	Température de l'air °C	Humidité relative %	Température moyenne radiante °C
Sans bâtiment	0	0,7	1,363970834	33,43475	43,71945833	52,17970833
État de lieu	0,17	0,555	0,826979584	33,59441667	43,665625	51,70504167
densité × 2	0,34	0,5	0,7416395	33,32583	44,044	47,924625
densité × 3	0,51	0,49	0,783332	33,29467	44,174545	47,648165
Hauteur × 8	120	0,325	1,10959625	32,45033334	45,304	39,90729167
Densité +hauteur 100 %	0,51	0,255	1,1070415	31,90021	45,506585	37,178085
Densité +hauteur 70 %	0,51	0,36	1,1095965	32,450335	45,304	39,90729

Concernant le Cours El-Bouni, on enregistre une différence de 0.55 °C dans la température d'air et 2.4 °C dans la température moyenne radiante entre le premier scénario (densité =0) et le 3<sup>ème</sup> scénario (densité= 0.38). Les scénarios sont exposés dans le tableau V-5 tandis que les résultats des simulations sont présentés en annexe 02. Un autre scénario aussi qui consiste à la réduction de la largeur du cours en gardant la même densité bâti de l'état de lieu. Les résultats de ce scénario montrent une amélioration moins importante que le scénario de la densité où on

enregistre une diminution de 0.2°C dans la Tair et de 2 °C dans la Tmrt. Cela indique que la densité du bâti a un impact plus important que la largeur de l'espace (voir Annexe 02).

### V.3.1.1 Température de l'air

Les cartes ci-dessous (Figure V- 16) montrent la répartition de la température de l'air pour le scénario de la densité du bâti, en plus du scénario qui combine entre la densité et la hauteur du bâti. On remarque que la température de l'air baisse à chaque fois densité du bâti augmente. Les températures minimales et maximales sont mentionnées aussi pour chaque scénario dans ces cartes. On remarque que la température baisse quand la densité du bâti augmente, mais avec des valeurs faibles, contrairement à l'impact de la hauteur. Les graphes (Figure V- 16) montrent la variation de la température de l'air le long de la journée. Les données de la température de l'air sont récupérées des deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent que dans les deux récepteurs, l'écart journalier moyen de la température entre le 1<sup>er</sup> scénario (état de lieu) et le deuxième scénario (densité ×2) est égal à 0.25°C. Cet écart devient presque nulle entre le 2<sup>ème</sup> et le troisième scénario (densité ×2 et densité ×3 respectivement). On note aussi que l'impact de la densité devient plus significatif lorsque la hauteur du bâti est plus importante, on enregistre dans le scénario (densité + hauteur) un écart de 1.7 °C. Alors que dans le scénario de la hauteur uniquement, on enregistre une diminution plus petite, soit 1.1 °C

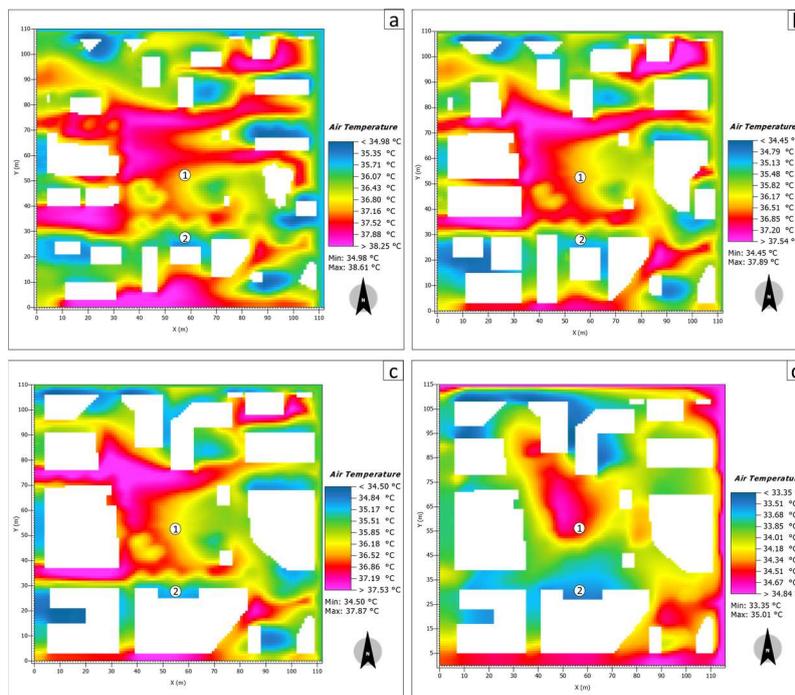


Figure V- 17 : Carte de la Température d'air pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité× 2, c) densité × 3, d) densité + hauteur

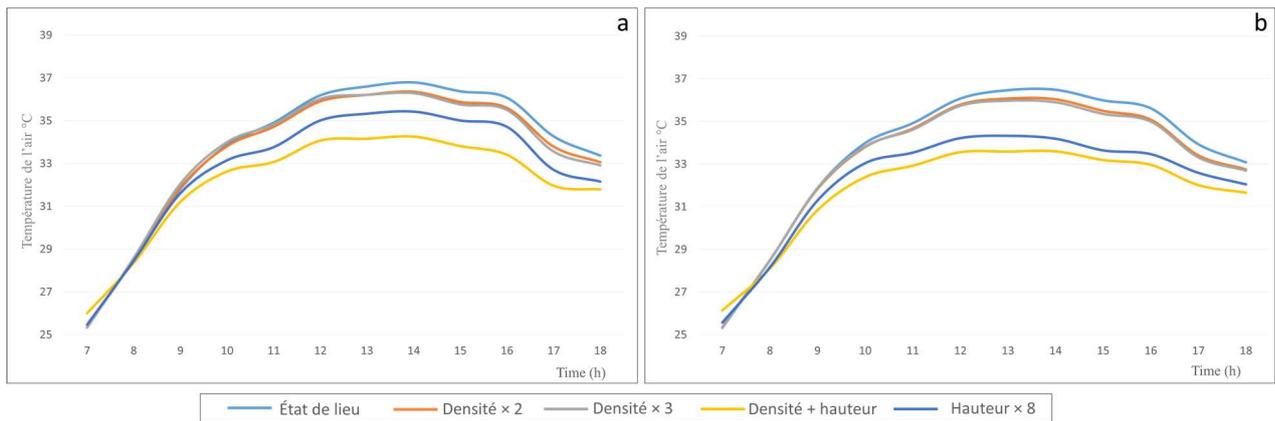


Figure V- 18 : Graphe de la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette d'El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.3.1.2 Humidité relative

Les cartes (Figure V- 17) montrent le taux d'humidité pour le scénario de la densité du bâti, et un scénario combinant la densité et la hauteur du bâti. On note que l'humidité s'intensifie lorsque la densité du bâti augmente. Le taux d'humidité minimale et maximale est mentionné pour chaque scénario dans ces cartes. On remarque que l'impact de la densité sur l'humidité est moins important que celui de la hauteur du bâti. Les graphes (Figure V- 18) montrent la variation de l'humidité relative le long de la journée. Les données sont récupérées des deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent que dans les deux récepteurs, l'écart journalier moyen de l'humidité entre le 1<sup>er</sup> scénario (état de lieu) et le deuxième scénario (densité  $\times 2$ ) est égal à 0.4 %. Cet écart devient presque nulle entre le 2<sup>ème</sup> et le troisième scénario (densité  $\times 2$  et densité  $\times 3$  respectivement). On note aussi que l'impact de la densité devient plus significatif lorsque la hauteur du bâti est plus importante, on enregistre dans le scénario (densité + hauteur) un écart de 1.8 %. Alors que dans le scénario de la hauteur uniquement, on enregistre une diminution plus petite, soit 1.4 %.

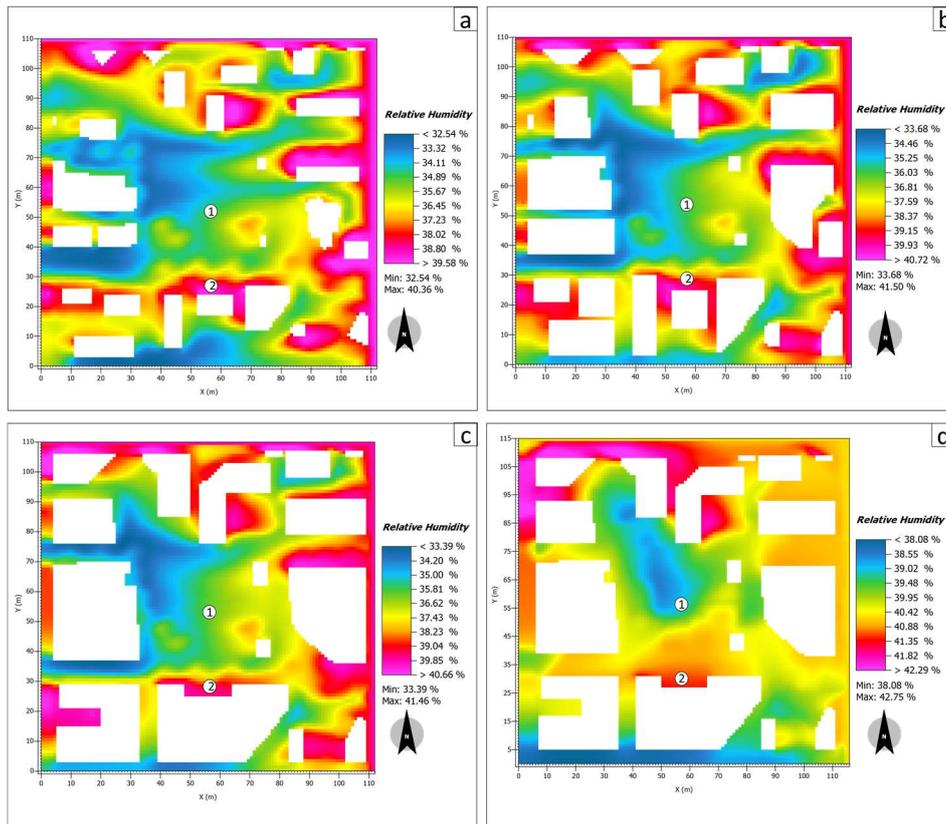


Figure V- 19 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité× 2, c) densité × 3, d) densité + hauteur

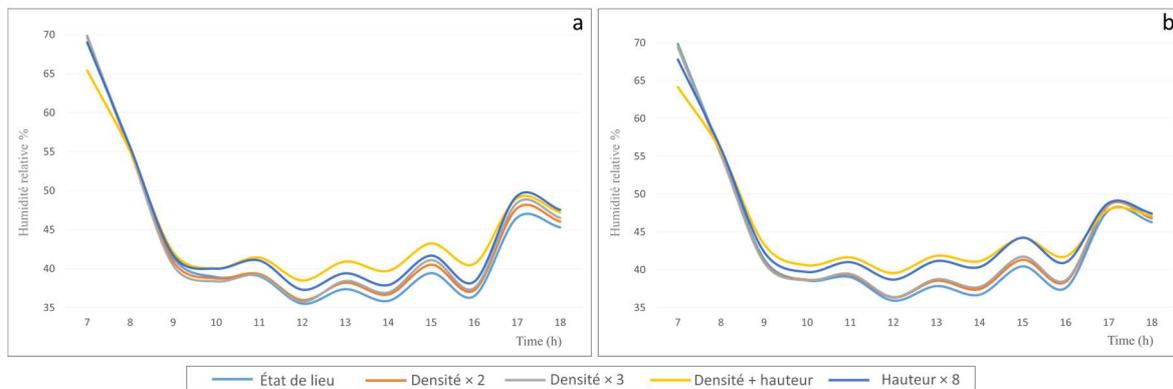


Figure V- 20 : Graphe de la variation de l'humidité relative pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.3.1.3 Vitesse de l'air

Les cartes (Figure V- 19) montrent la vitesse du vent pour le scénario de la densité du bâti, et un scénario combinant la densité et la hauteur du bâti. On note que la vitesse s'accélère lorsque la densité du bâti augmente. La vitesse du vent minimale et maximale est mentionnée pour chaque scénario dans ces cartes. Les graphes (Figure V- 20) montrent la variation de la vitesse du vent le long de la journée. Les données sont récupérées des deux récepteurs, un récepteur

placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent que dans le premier récepteur, lorsque la densité augmente, la vitesse du vent s'accroît, surtout lorsque la hauteur du bâti est importante. Alors que dans le 2<sup>ème</sup> récepteur, on remarque l'inverse ; la densité du bâti ralentit la circulation du vent notamment dans le dernier scénario (densité + hauteur).

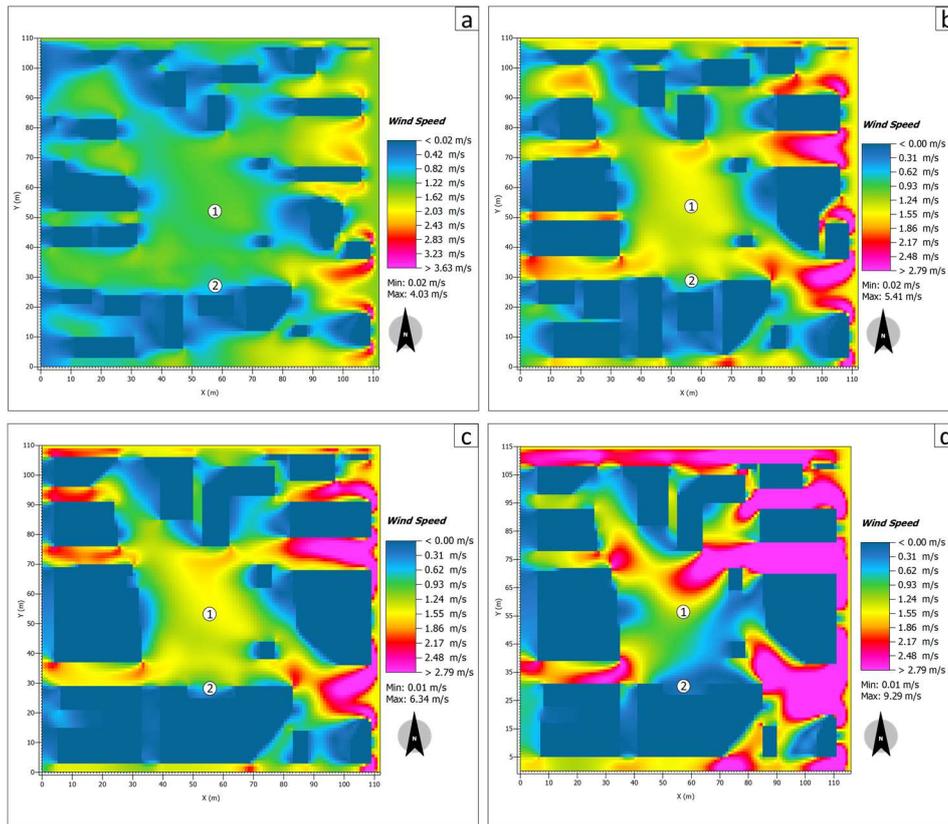


Figure V- 21 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité  $\times$  2, c) densité  $\times$  3, d) densité + hauteur

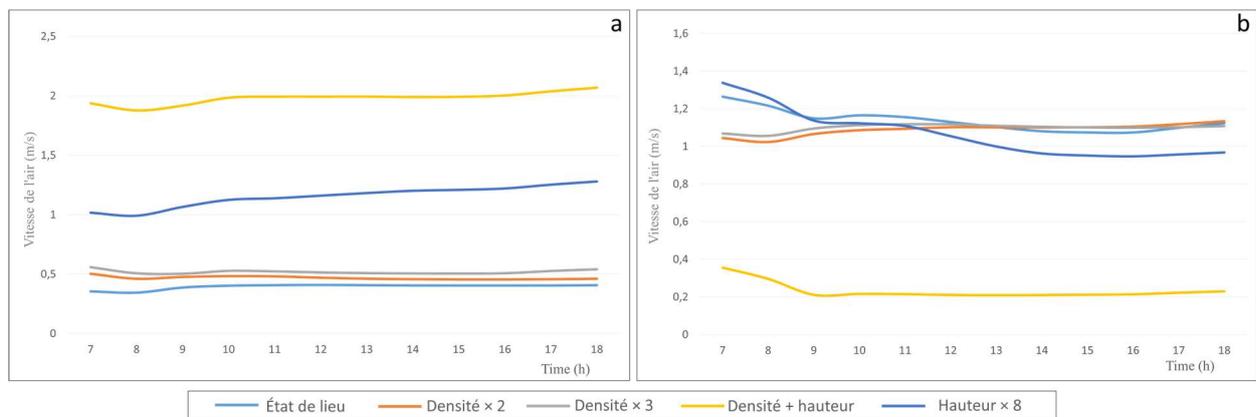


Figure V- 22 : Graphe de la variation de la vitesse de l'air pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02

V.3.1.4 Température moyenne radiante

Les cartes ci-dessous montrent la répartition de la température moyenne radiante pour le scénario de la densité du bâti, et le scénario qui combine entre la densité et la hauteur du bâti. Les valeurs minimales et maximales sont mentionnées aussi dans chaque carte. On note que la Tmrt baisse lorsque la densité du bâti augmente. Les graphes (Figure V- 22) montrent la variation de la Tmrt le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent que dans les deux récepteurs, l'écart journalier moyen de de la Tmrt entre le 1<sup>er</sup> scénario (état de lieu) et le deuxième scénario (densité ×2) est égal à 2°C dans le 2<sup>ème</sup> récepteur et 5.6 °C dans le 1<sup>er</sup> récepteur. Cet écart devient presque nulle entre le 2<sup>ème</sup> et le troisième scénario (densité ×2 et densité ×3, respectivement). On note aussi que l'impact de la densité devient plus significatif lorsque la hauteur du bâti est plus importante, on enregistre dans le scénario (densité + hauteur) un écart de 17.9 °C. Alors que dans le scénario de la hauteur uniquement, on enregistre une diminution plus petite, soit 12.8 °C La différence entre les cinq scénarios est négligeable entre 17h00 et 18h00 au niveau du deuxième scénario.

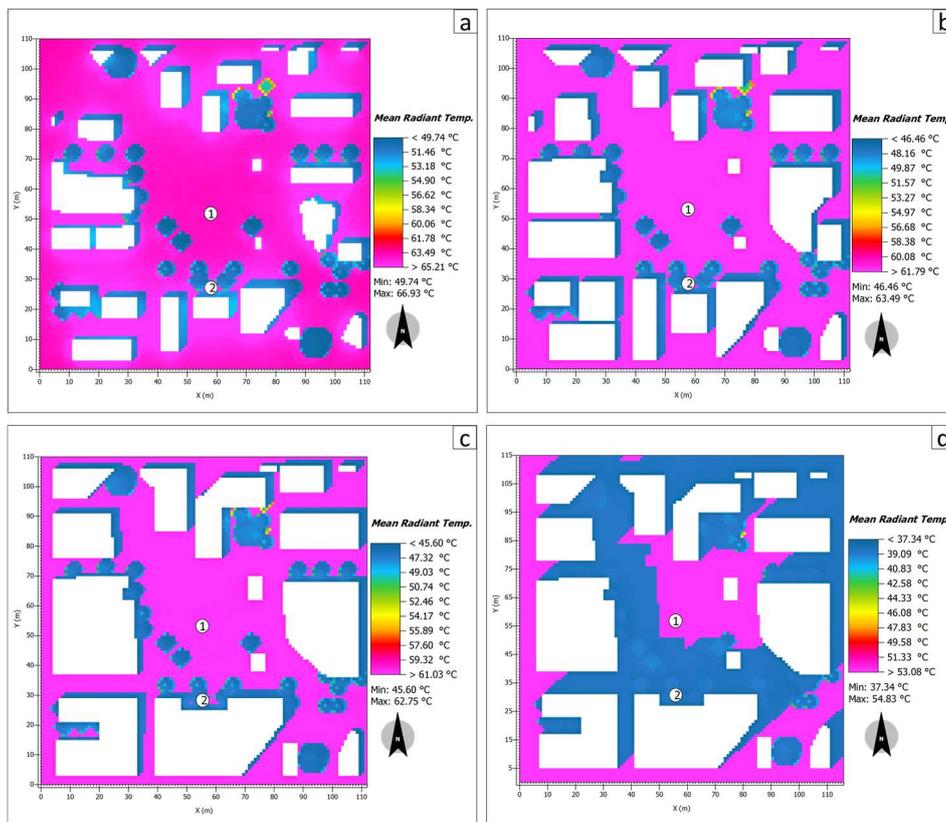


Figure V- 23 : Carte de la température moyenne radiante pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité× 2, c) densité × 3, d) densité + hauteur

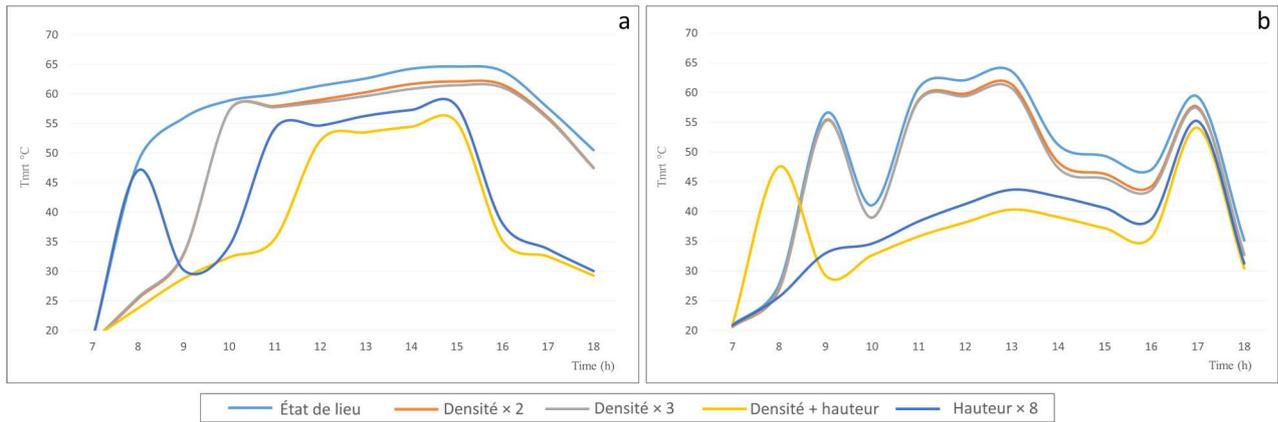


Figure V- 24 : Graphe de la variation de la température moyenne radiante pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.3.2 Impact de la densité du bâti sur les indices de confort thermique

Le tableau V-10 présente les valeurs moyennes des indices de confort thermique pour différents scénarios de densité dans la placette d'El-Bouni. Les résultats du cours d'El-Bouni sont présentés en annexe 02. Les résultats démontrent une corrélation entre la densité du bâti et les indices du confort. En ce qui concerne le PET, une diminution moyenne de 1 °C est enregistrée entre le scénario 01 (densité égale à 0) et le quatrième scénario (densité égale à 0,51). Une diminution moyenne de 0.5 °C et de 0.8 °C au niveau du SET et l'UTCI respectivement.

Concernant le scénario combinant la hauteur et la densité du bâti. Les résultats montrent que la combinaison de ces deux paramètres conduit à une diminution plus importante que celle de la hauteur seule. Dans le scénario "hauteur-densité", on enregistre une baisse de 7.3 °C, 1.5 °C et 5.1°C dans le PET, SET, UTCI respectivement. Pour le scénario "hauteur", on observe une baisse de 6 °C, 1.66 °C et 3.6°C dans le PET, SET, UTCI respectivement. Les résultats du Cours El-Bouni, sont présentés en annexe 02.

Tableau V- 9: récapitulation des scénarios de densité (indices de confort placette El-Bouni)

Scénario densité placette El-Bouni	Densité Bâti	Facteur de vue de ciel	PET °C	SET °C	UTCI °C
Sans bâtiment	0	0,7	40,89408333	35,468625	37,91458334
État de lieu	0,17	0,555	41,822875	36,629125	38,37670834
densité x 2	0,34	0,5	40,130045	36,196875	37,22733
densité x 3	0,51	0,49	39,839915	35,96046	37,133455
Hauteur x 8	120	0,325	34,93125	33,80879167	34,337125
Densité +hauteur 100 %	0,51	0,255	33,595625	33,98575	32,819955
Densité +hauteur 70 %	0,51	0,36	34,93125	33,79079	34,337125

V.3.2.1 PET (Température équivalente physiologique)

Les cartes ci-dessous montrent la répartition du PET pour le scénario de la densité du bâti, et le scénario qui combine entre la densité et la hauteur du bâti. Les valeurs minimales et maximales sont mentionnées aussi dans chaque carte. On note que le PET baisse lorsque la densité du bâti augmente. Les graphes (Figure V- 24) montrent la variation du PET le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent qu'au niveau du premier récepteur la différence entre le 1<sup>er</sup> scénario (état de lieu) et le deuxième scénario (densité ×2) est significative entre 07h00 et 10h00, où on enregistre un écart de 5.6 °C mais cet écart devient très minime le reste de la journée (un écart moyen de 0.7 °C). Concernant le deuxième récepteur, l'avant midi, on note une très légère baisse du PET (0.5 °C) mais après 12h00 le PET diminue avec 1.5 °C. On remarque aussi que l'augmentation de la hauteur et la densité en même temps participe à une diminution notable du PET, surtout dans le 1<sup>er</sup> récepteur. Ce qui n'est pas le cas au niveau du 2<sup>ème</sup> récepteur où on trouve que le scénario (densité + hauteur) contribue à la l'élévation du PET pendant le début et la fin de journée.

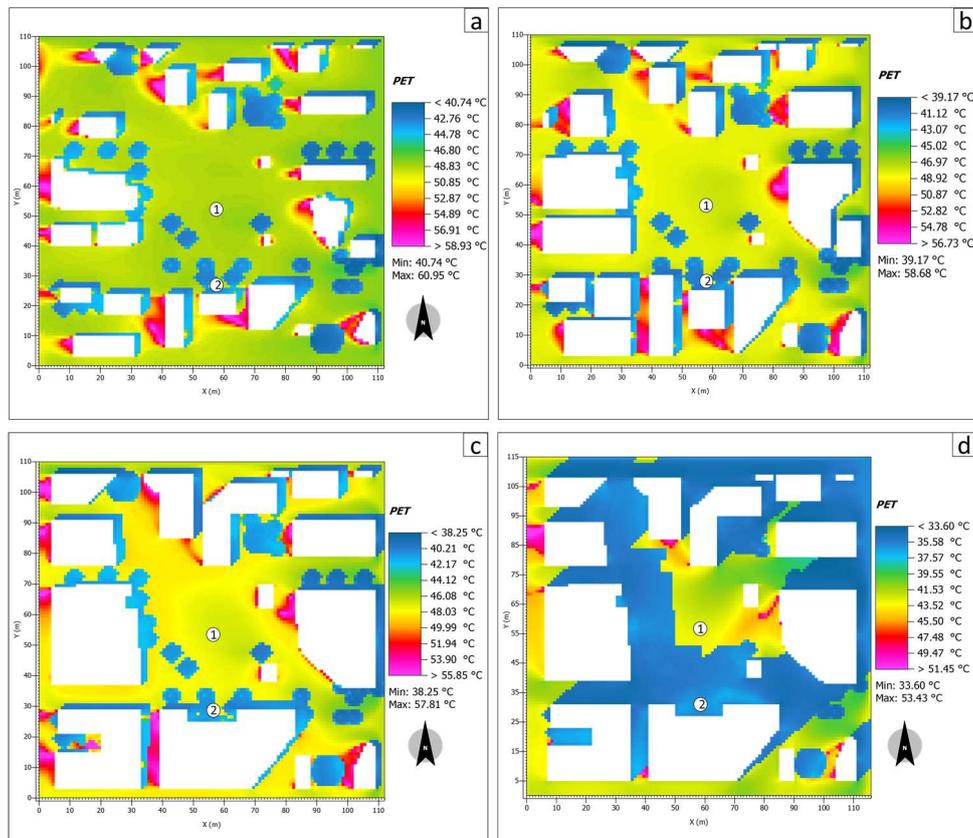


Figure V- 25 : Carte du PET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité× 2, c) densité × 3, d) densité + hauteur

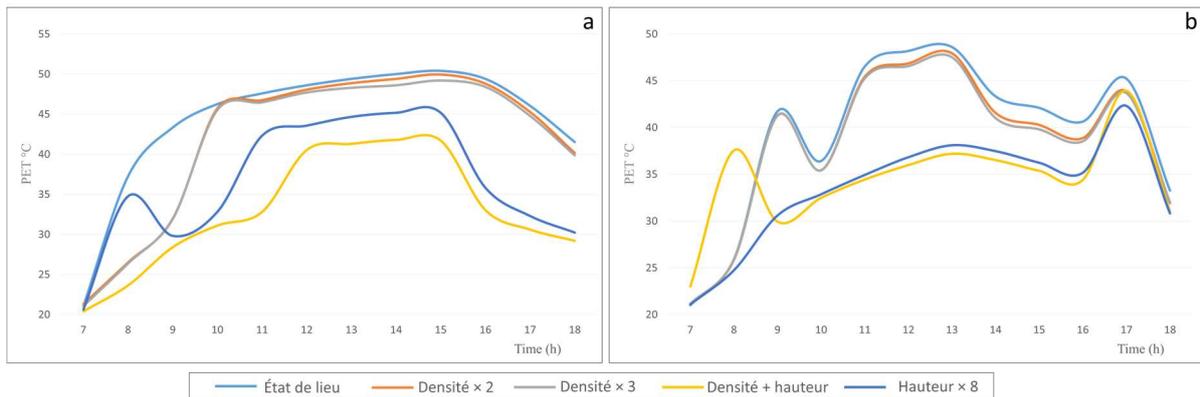


Figure V- 26 : Graphe de la variation du PET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.3.2.2 SET (température effective standard)

Les cartes (Figure V- 25) montrent la répartition du SET pour le scénario de la densité du bâti, et le scénario qui combine entre la densité et la hauteur du bâti. Les valeurs minimales et maximales sont mentionnées aussi dans chaque carte. On note que le SET baisse lorsque la densité du bâti augmente. Les graphes (Figure V- 26) montrent la variation du SET le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent qu'au niveau du premier récepteur la différence entre le 1<sup>er</sup> scénario (état de lieu) et le deuxième scénario (densité ×2) est significative entre 07h00 et 10h00, où on enregistre un écart de 1.9°C mais cet écart devient nul le reste de la journée. Concernant le deuxième récepteur, on note une baisse de 0.45°C l'après 10h00 dans le 2<sup>ème</sup> scénario (densité×2), alors que dans le 3<sup>ème</sup> scénario (densité×2), on note aucune amélioration. On remarque aussi que l'augmentation de la hauteur et la densité en même temps participe à une diminution notable du PET, dans le 1<sup>er</sup> récepteur. Cependant dans le 2<sup>ème</sup> récepteur où on trouve que le scénario (densité + hauteur) contribue à l'augmentation du PET surtout au début et à la fin de journée, alors que l'élévation dans la hauteur constitue le meilleur scénario.

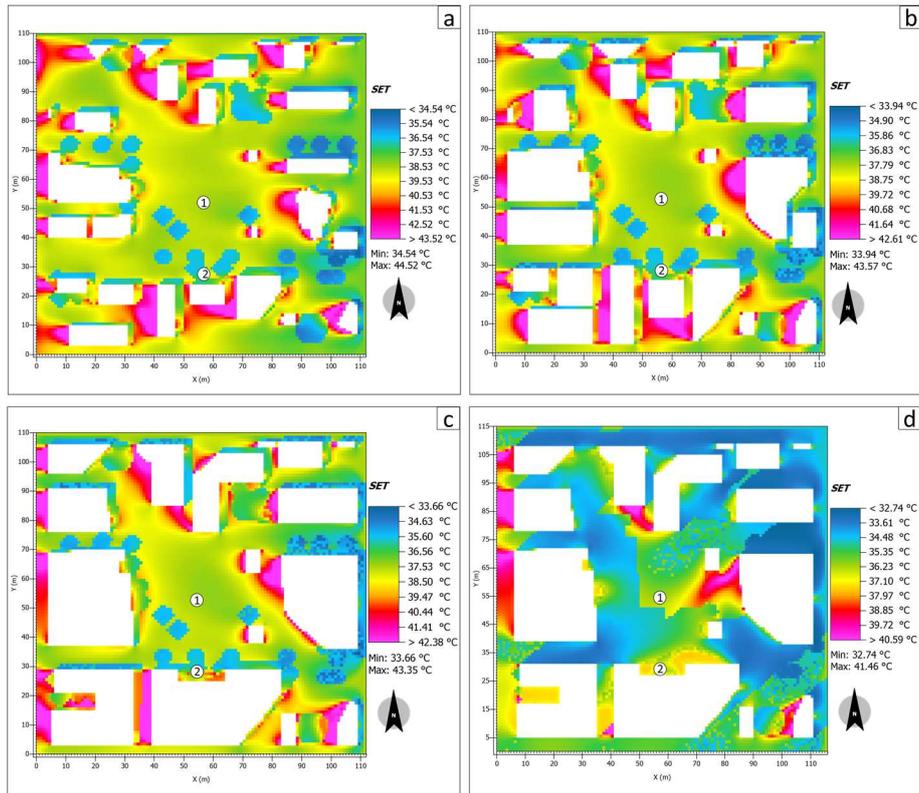


Figure V- 27 : Carte du SET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité× 2, c) densité × 3, d) densité + hauteur

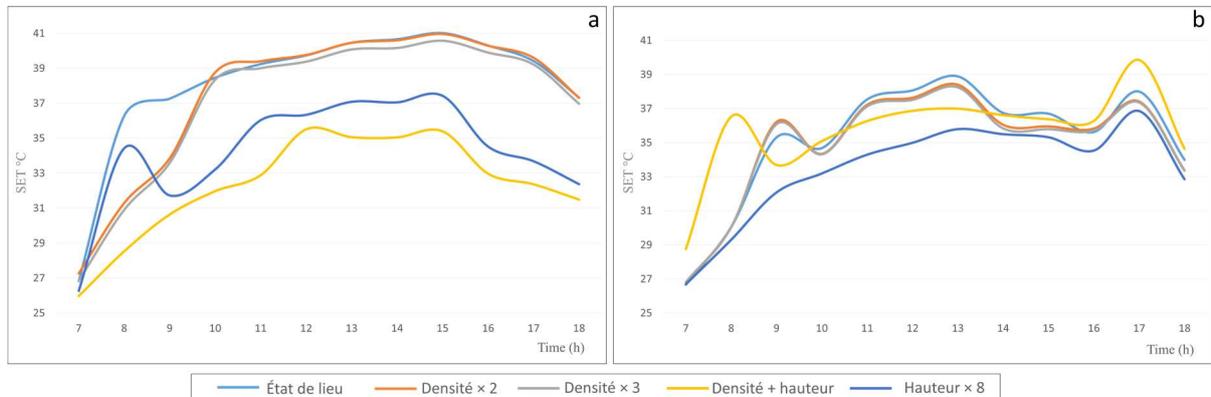


Figure V- 28 : Graphe de la variation du SET pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### V.3.2.3 UTCI (L'indice universel du climat thermique)

Les cartes (Figure V- 27) montrent la répartition d'UTCI pour le scénario de la densité du bâti, et le scénario qui combine entre la densité et la hauteur du bâti. Les valeurs minimales et maximales sont mentionnées aussi dans chaque carte. On note que la répartition de l'UTCI est similaire au PET. L'UTCI baisse lorsque la densité du bâti augmente. Les graphes (Figure V- 28) montrent la variation de l'UTCI le long de la journée, au niveau de deux récepteurs, un

récepteur placé au centre de la placette et un autre à l'extrémité de la placette près du bâti. Les résultats montrent qu'au niveau du premier récepteur la différence entre le 1<sup>er</sup> scénario (état de lieu) et le deuxième scénario (densité ×2) est significative entre 07h00 et 10h00, où on enregistre un écart de 3.1°C mais cet écart devient très minime le reste de la journée (un écart moyen de 0.8 °C). Concernant le deuxième récepteur, l'avant midi, on note une très légère baisse de l'UTCI (0.26 °C) mais après 12h00 l'UTCI diminue avec 1°C . On remarque aussi que l'augmentation de la hauteur et la densité en même temps participe à une diminution notable de l'UTCI, dans les deux récepteurs.

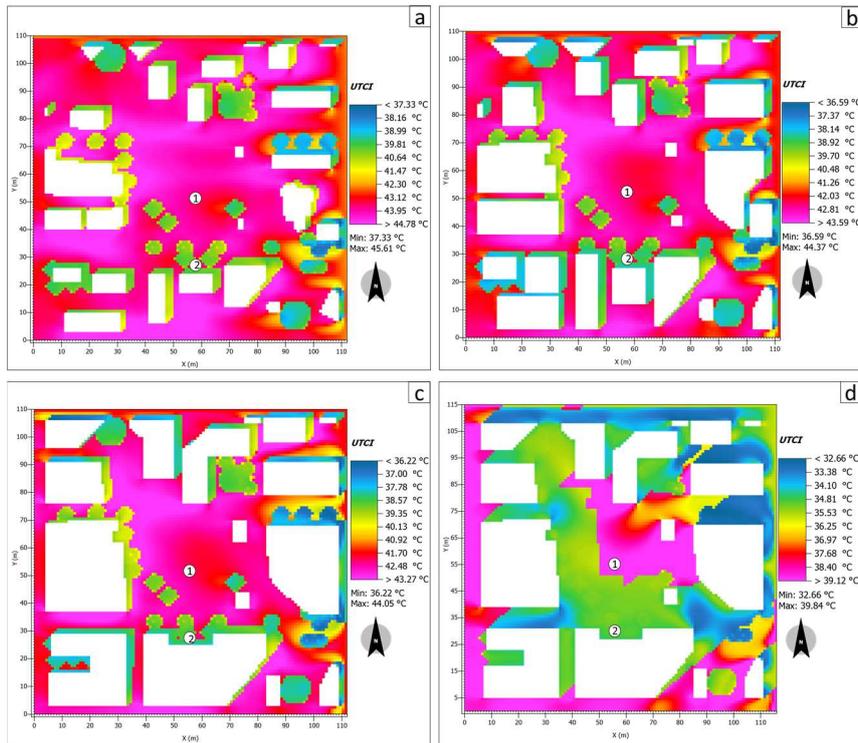


Figure V- 29 : Carte de l'UTCI pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) état de lieu, b) densité× 2, c) densité × 3, d) densité + hauteur

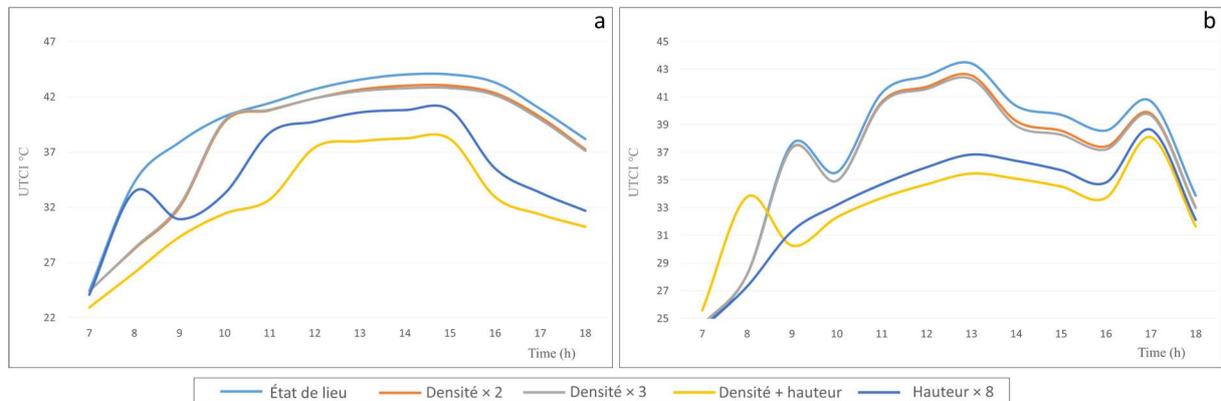


Figure V- 30 : Graphe de la variation de l'UTCI pour le scénario de la densité de la placette d'El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02

#### V.4 Impact de l'orientation

Nous avons choisi le cours de la révolution et le cours d'El-Bouni pour le scénario d'orientation, à cause de leur forme longitudinale. Nous présentons ici, les résultats de la simulation des deux places dans leur état initiale (avec végétation) pour les quatre orientations : Nord-sud, Est-Ouest, NE-SO et NO-SE. Les cartes et les graphes du scénario de l'orientation sans végétation seront présentés en Annexe 02. Cependant la synthèse du scénario d'orientation avec et sans végétation est révélée dans la conclusion de ce chapitre.

##### V.4.1 Impact de l'orientation sur les paramètres climatiques

Les deux tableaux (V-11 et V-12) présentent les valeurs moyennes des paramètres microclimatiques enregistrés pour les scénarios d'orientation au niveau du cours de la révolution et le cours El-Bouni.

Les résultats au niveau du cours El-Bouni indiquent que l'orientation qui présente des températures d'air plus basse et un taux d'humidité plus élevé est celle du Nord-Est. Cependant, la température moyenne radiante la plus basse est enregistrée au niveau de l'orientation NO-SE. Concernant la vitesse de l'air, l'orientation Est-Ouest présente la vitesse la plus élevée (tableau V-11).

Tableau V- 10: récapitulation des scénarios de l'orientation (paramètres microclimatique, cours El-Bouni)

Scénario d'orientation cours El-Bouni	Vitesse de l'air m/s	Température de l'air °C	Humidité relative %	Température moyenne radiante °C
N-S	0,82187175	33,11002	44,1859575	50,027395
E-O	1,21266475	33,3505755	43,2036225	48,0040225
NE-SO	1,08803925	33,2250625	43,5086675	47,8190425
NO-SE	1,13822725	33,207915	43,7166675	47,7825

Les résultats au niveau du cours de la Révolution indiquent que l'orientation qui présente des températures d'air plus basse est celle de l'Est-Ouest. Alors que l'orientation Nord-Sud présente le taux d'humidité le plus élevé. La température moyenne radiante la plus basse est enregistrée au niveau de l'orientation NE-SO. Concernant la vitesse de l'air, l'orientation Est-Ouest et NO-SE présentent la vitesse la plus élevée (tableau V-12).

Tableau V- 11: récapitulation des scénarios de l'orientation (paramètres microclimatique, cours de la révolution)

Scénario orientation cours centre ville	Vitesse de l'air m/s	Température de l'air °C	Humidité relative %	Température moyenne radiante °C
N-S	0,7894035	32,9814175	43,9319175	43,836105
E-O	1,25477075	32,68296	42,2735025	43,758855
NE-SO	0,9429375	32,9420625	43,947395	43,6157075
NO-SE	1,254962	33,133335	43,396605	44,013935

### V.4.1.1 Température de l'air

Les cartes (Figure V- 31 et Figure V- 32) montrent la répartition de la température de l'air dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les températures minimales et maximales sont aussi mentionnées. On remarque une grande différence entre les quatre orientations dans les deux places. Lorsque la place est orientée Nord-Sud, on voit que la température de l'air est presque homogène dans l'ensemble de la place malgré la forte présence de la végétation dans la partie sud. Contrairement à l'orientation Est-Ouest, où on note une grande différence entre la partie sud et la partie nord de la place. On enregistre des températures très basses dans la partie sud par rapport au reste de la place (une différence de 1.3 °C dans le cours El-Bouni et 0.7°C dans le cours de la révolution), à cause de la présence de la végétation. Concernant le scénario NO-SE, on voit que la température est plus élevée au niveau de l'extrémité nord de la place et inversement pour l'orientation NE-SO. En se basant sur les cartes, on voit que l'orientation la plus favorable pour l'ensemble du tissu est l'orientation Est-Ouest, en plus c'est ici où on enregistre la température la plus basse par rapport aux autres orientations. Mais au niveau de la place, cette orientation ne constitue pas le bon choix, car la température dans les endroits non végétalisés est élevée par rapport aux autres orientations.

Les graphes (Figure V- 30 et Figure V- 32) permettent une meilleure comparaison. Dans le cours El-Bouni, on remarque au niveau du récepteurs 01 que l'orientation Est-Ouest est la plus favorable avant 14h00, et l'orientation NO-SE est la plus défavorable le long de la journée. Dans le récepteur 02, la différence entre les quatre orientations est presque nulle, sauf après 16h00 où la température dans le scénario Est-Ouest devient la plus élevée. Dans les récepteurs 03 et 04 la température la plus élevée est enregistrée dans le scénario Est-Ouest, alors que la température la plus basse se trouve dans le scénario Nord-Sud et NO –SE. Pour le cours de la révolution, dans le 1<sup>er</sup>, le 2<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> récepteur, là où la densité végétale est très élevée par rapport au reste de la place, on note que l'orientation Est-Ouest est la plus favorable, et on enregistre une baisse de température qui peut arriver à 1°C par rapport aux autres orientations.

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

Contrairement au récepteur 03, l'orientation Est-Ouest est la plus défavorable, à cause de l'absence de la végétation. On remarque aussi que la température de l'air au niveau des rues qui bordent la place sur ces deux cotés est plus élevée pour cette orientation. Après la lecture de ces graphes et cartes, on constate que l'impact de l'orientation sur la température de l'air varie en fonction de la présence ou l'absence de la végétation. Lorsque la place est implantée d'arbre, l'orientation Est-Ouest est la plus favorable, mais si elle est dépourvue du végétal.

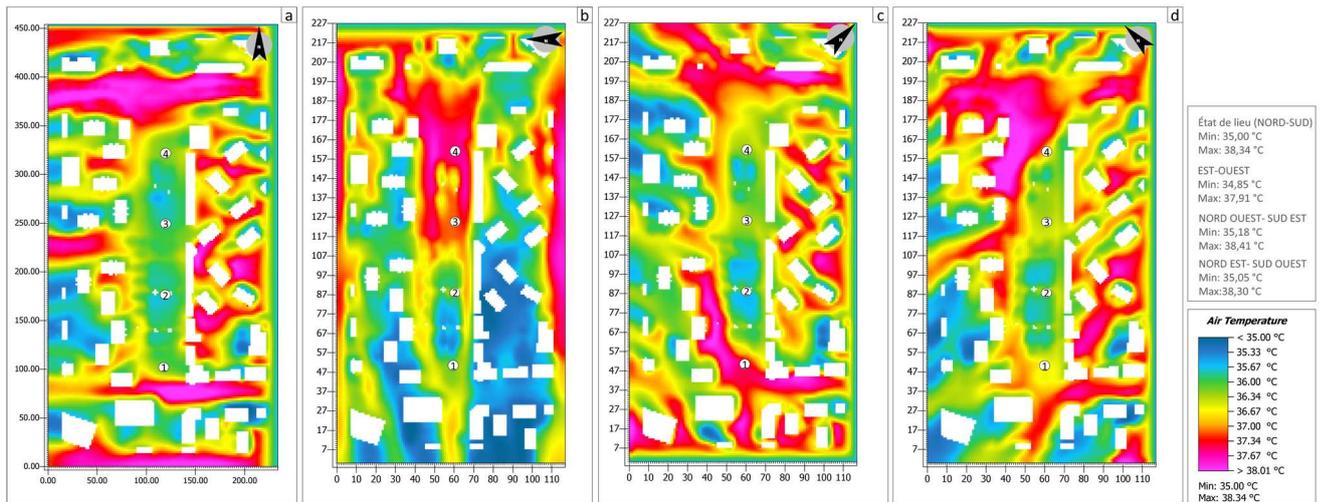


Figure V- 33 : Carte de la Température d'air pour le scénario Orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

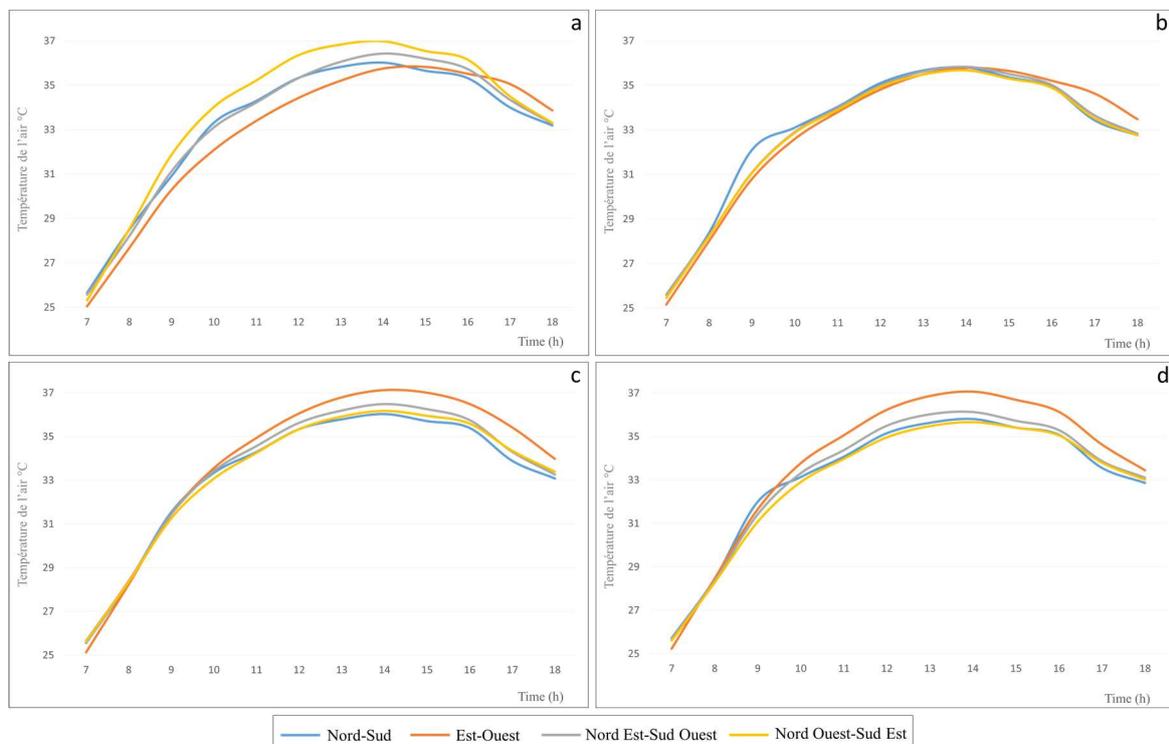


Figure V- 34 : Graphe de la variation de la température de l'air pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

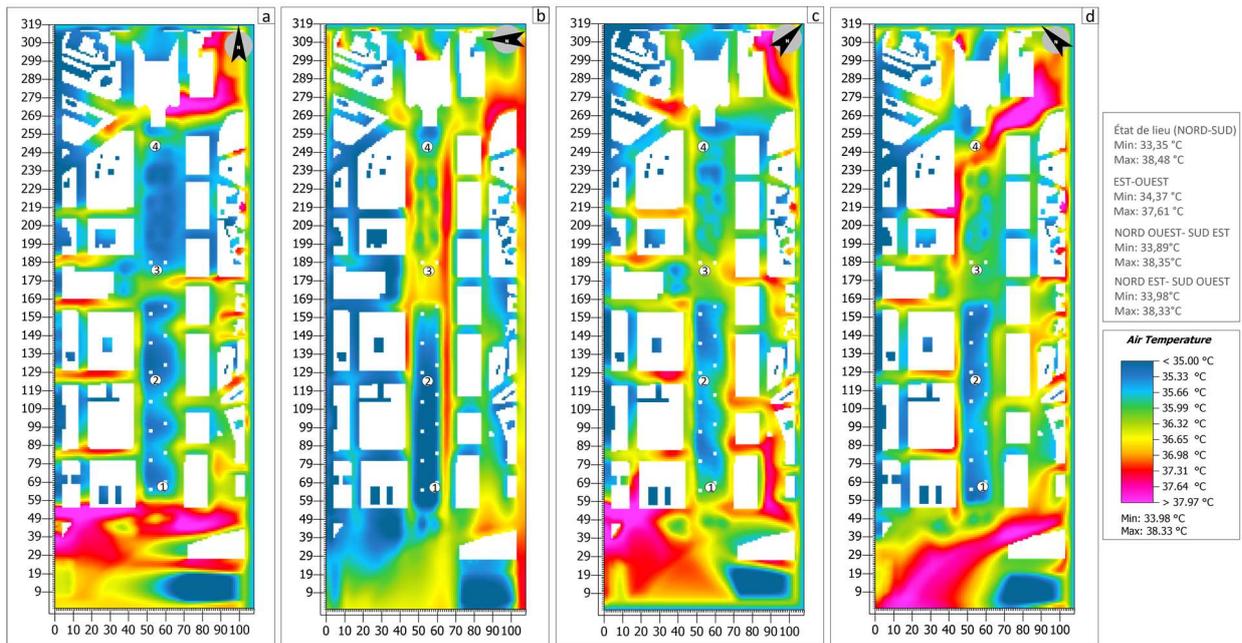


Figure V- 35 : Carte de la Température d'air pour le scénario Orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

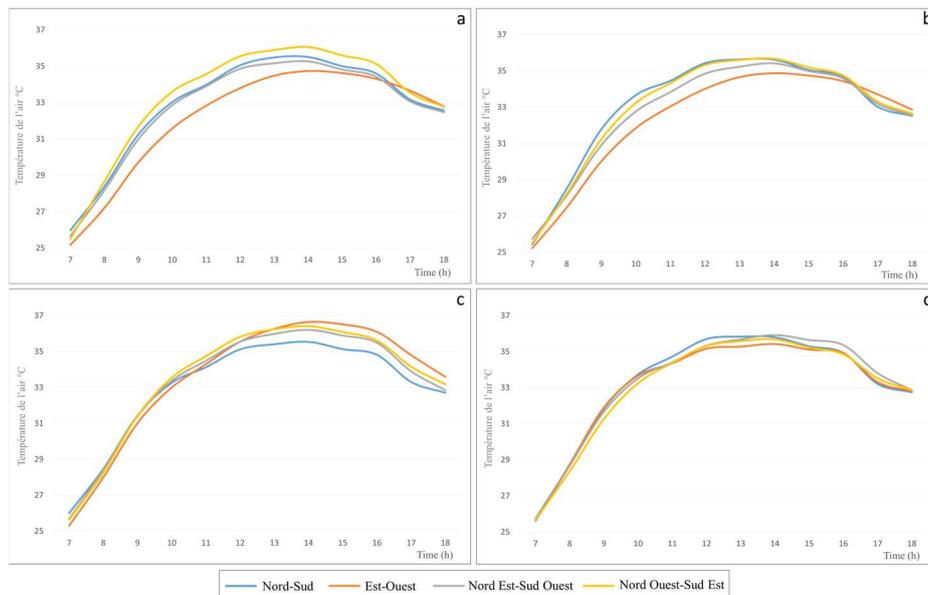


Figure V- 36 : Graphe de la variation de la température de l'air pour le scénario de l'orientation du cours de la Révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### V.4.1.2 Humidité relative

Les cartes (Figure V- 33 et Figure V- 35) montrent la répartition de l'humidité relative dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les valeurs et maximales sont aussi mentionnées. On remarque une grande différence entre les quatre orientations dans les deux places. D'après les cartes du cours El-Bouni, on remarque que l'humidité relative est plus importante lorsque la place est orientée Nord-Sud, contrairement à l'orientation Est-Ouest,

où on enregistre un taux d'humidité très bas, surtout dans la partie nord de la place. Alors que dans les deux autres scénarios (NO-SE et NE-SO), on ne remarque pas une grande différence. Concernant le cours de la révolution, on voit que le scénario Nord-sud présente des niveaux d'humidité très élevés sur toute la place, alors que dans les trois autres orientations, l'humidité est plus basse dans la partie nord de la place. Donc, en se référant aux cartes, on voit que l'orientation qui présente une humidité plus élevés est l'orientation Nord-Sud.

Les graphes (Figure V- 34 et Figure V- 36) permettent une meilleure comparaison. Dans le cours El-Bouni, on remarque au niveau du récepteurs 01 que l'humidité est la plus élevée lorsque la place est orientée Est-Ouest, mais après 13h00, elle baisse pour être la plus basse à la fin de journée. On note aussi que l'orientation NO –SE présente le taux d'humidité le plus bas .Dans le récepteur 02, la différence entre les quatre orientations est presque nulle, sauf pour le scénario Est-Ouest l'humidité est très basse. Dans les récepteurs 03 et 04 le niveau d'humidité le plus bas est enregistré dans le scénario Est-Ouest, alors que le plus haut se trouve dans le scénario Nord-Sud. Pour le cours de la révolution, dans le 1er, le 2ème et le 4ème récepteur, là où la densité végétale est très élevée par rapport au reste de la place, on enregistre des niveaux d'humidité plus élevés dans le scénario Est-Ouest par rapport aux autres orientations. Contrairement au récepteur 03, l'orientation Est-Ouest est la plus basse, à cause de l'absence de la végétation. On remarque aussi que l'humidité au niveau des rues qui bordent la place sur ces deux cotés est la plus faible pour cette orientation. On constate que l'impact de l'orientation sur l'humidité relative dans le cours de la révolution varie en fonction de la présence ou l'absence de la végétation. L'orientation Est-Ouest favorise l'augmentation de l'humidité aux endroits arborés, ce qui n'est le cas pour les espaces dépourvue des arbres.

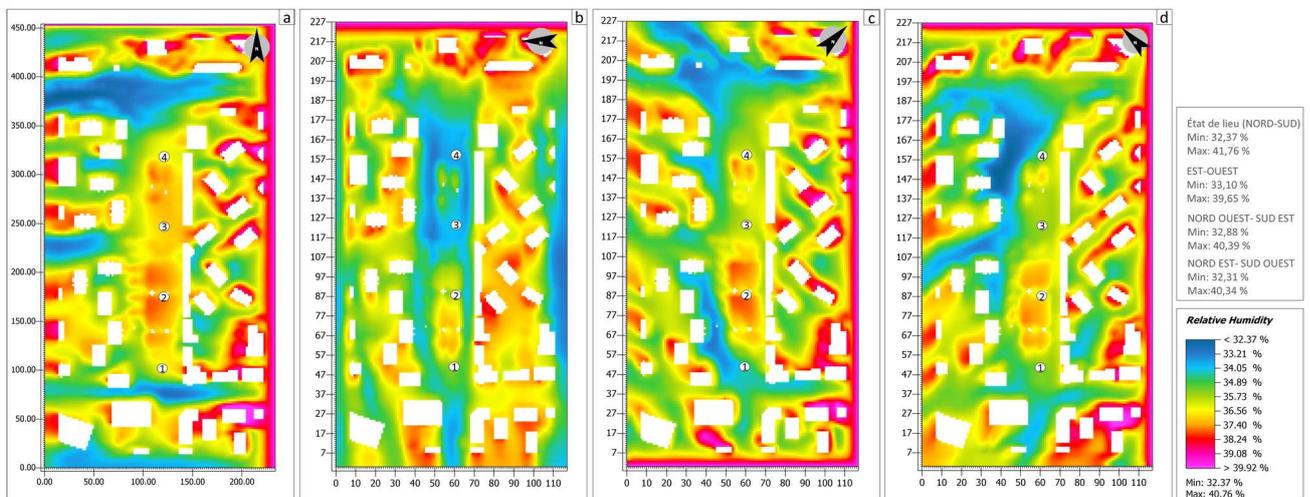


Figure V- 37 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario Orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

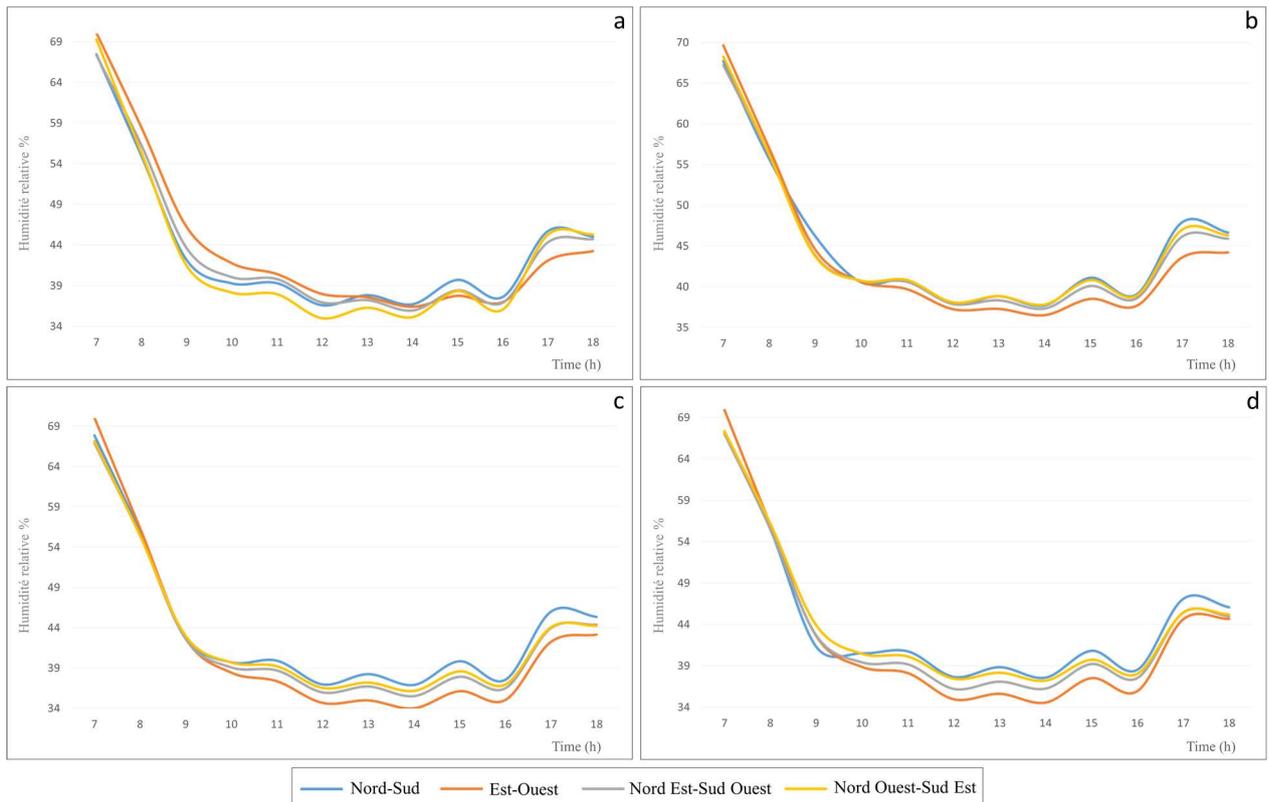


Figure V- 38 : Graphe de la variation de l'humidité relative pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

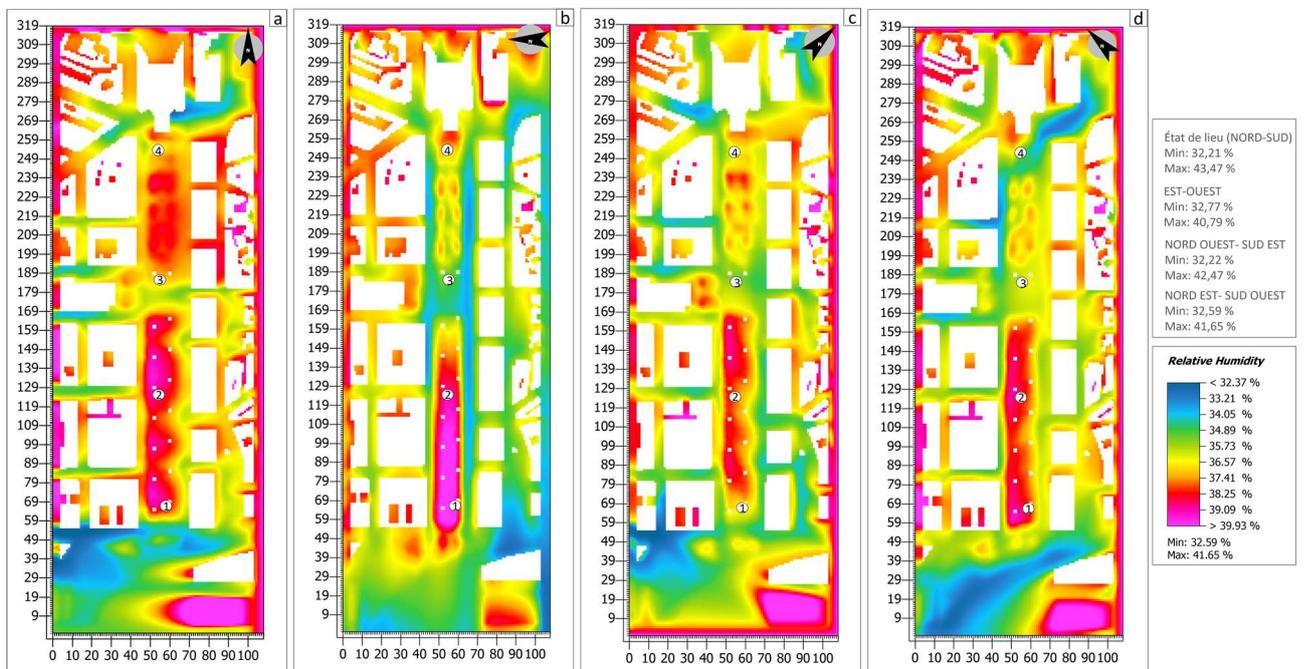


Figure V- 39 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario Orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

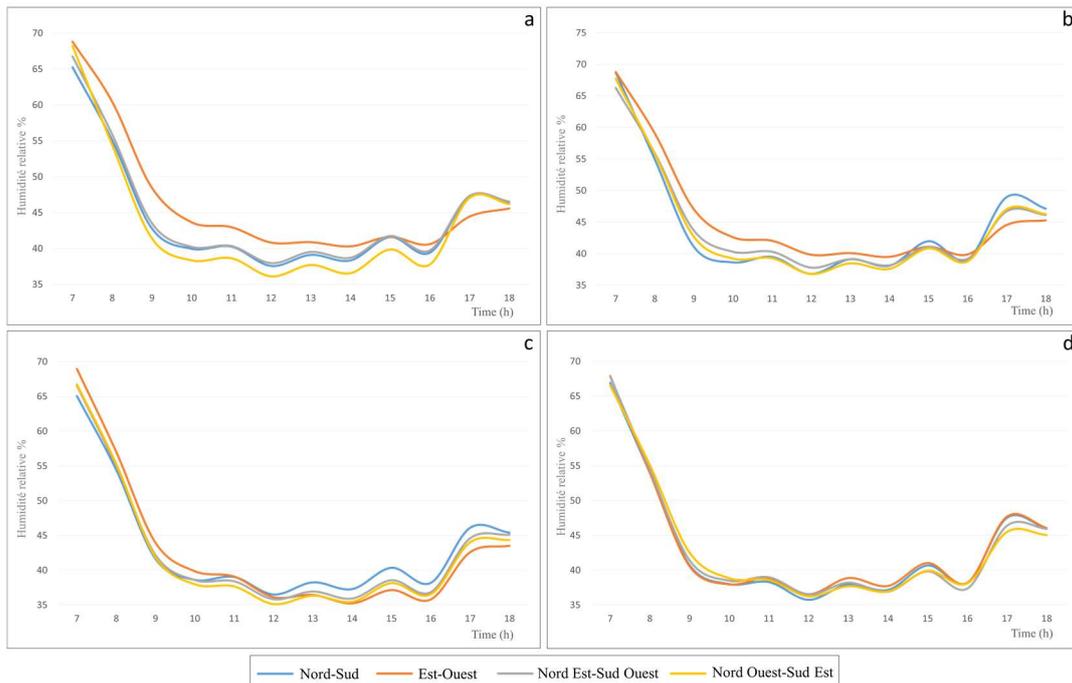


Figure V- 40 : Graphe de la variation de l'humidité relative pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### V.4.1.3 Vitesse de l'air

Les cartes (Figure V- 37 et Figure V- 39) montrent la vitesse de l'air dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les valeurs minimales et maximales sont aussi mentionnées. D'après les cartes du cours de la révolution, on remarque que la vitesse du vent est plus importante lorsque la place est orientée Est-Ouest, contrairement à l'orientation Nord-Sud, où on enregistre une vitesse très basse au niveau de la place et plus ou moins élevée dans les rues qui donnent sur la place. Concernant les deux autres scénarios la vitesse est intermédiaire. On remarque la même chose aussi pour le cours El-Bouni. Donc, en se référant aux cartes, on voit que la vitesse du vent la plus élevée se trouve dans l'orientation Est-Ouest, pour les deux places.

D'après les graphes (Figure V- 38 et Figure V- 40), dans le cours El-Bouni, on remarque au niveau du récepteurs 01 la vitesse du vent est plus élevée lorsque la place est orientée NO –SE, alors que dans les trois autre récepteur, l'orientation qui donne une vitesse du vent plus haute est l'orientation Est-Ouest. On voit aussi que sur les quatre récepteurs, la vitesse la plus faible se situe dans le scénario Nord-sud. Pour le cours de la révolution, dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> récepteur, on enregistre des vitesses du vent plus élevés dans le scénario NO –SE. Alors que dans le 3<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> scénario, la  $V_{vent}$  est plus importante dans le scénario Est-Ouest. En plus

on constate d'après les graphes que la  $V_{vent}$  la plus faible se trouve au niveau du scénario Nord-Sud.

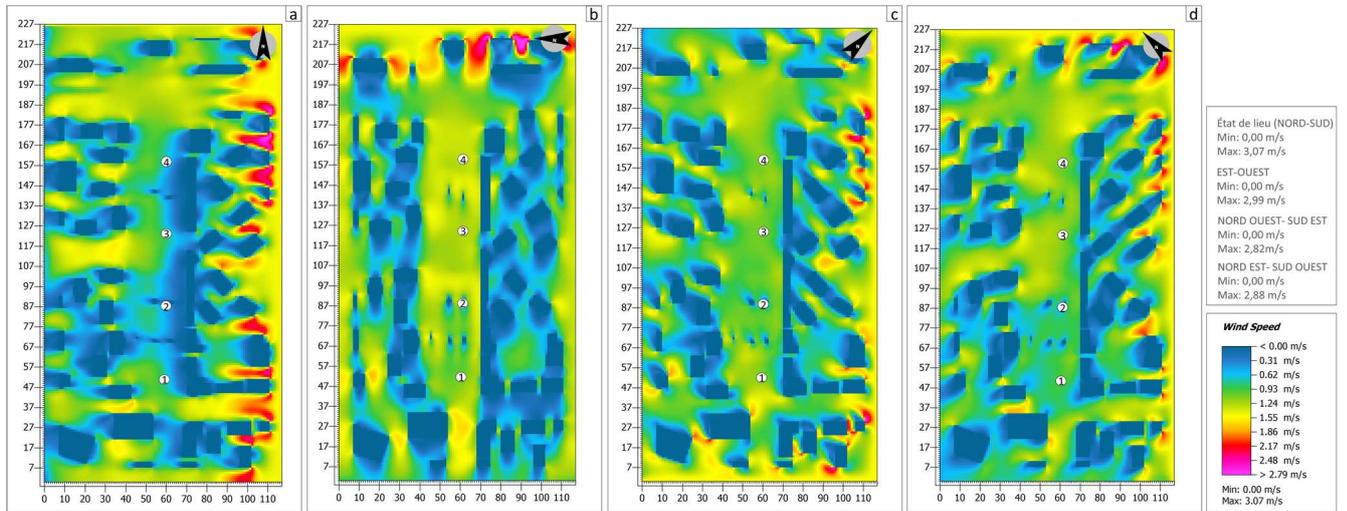


Figure V- 41 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario Orientation du cours d'El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

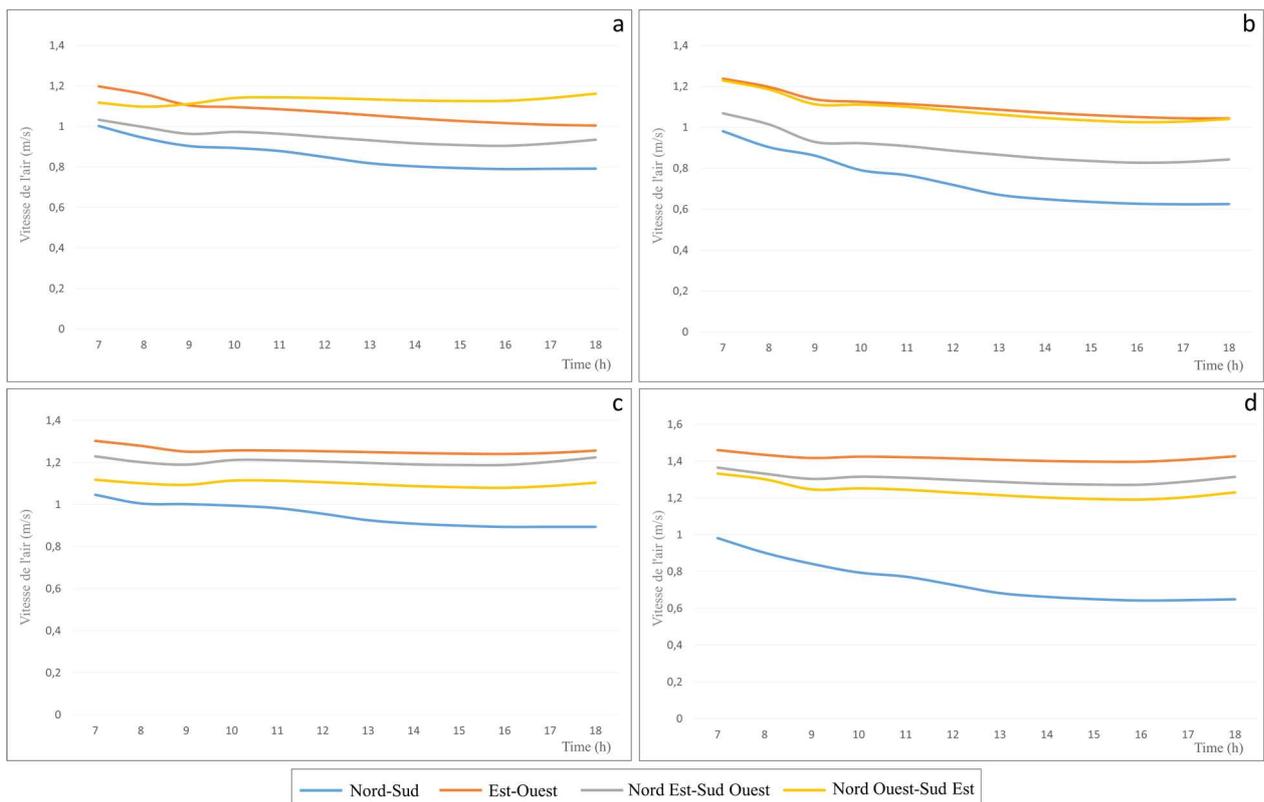


Figure V- 42 : Graphe de la variation de la vitesse de l'air pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

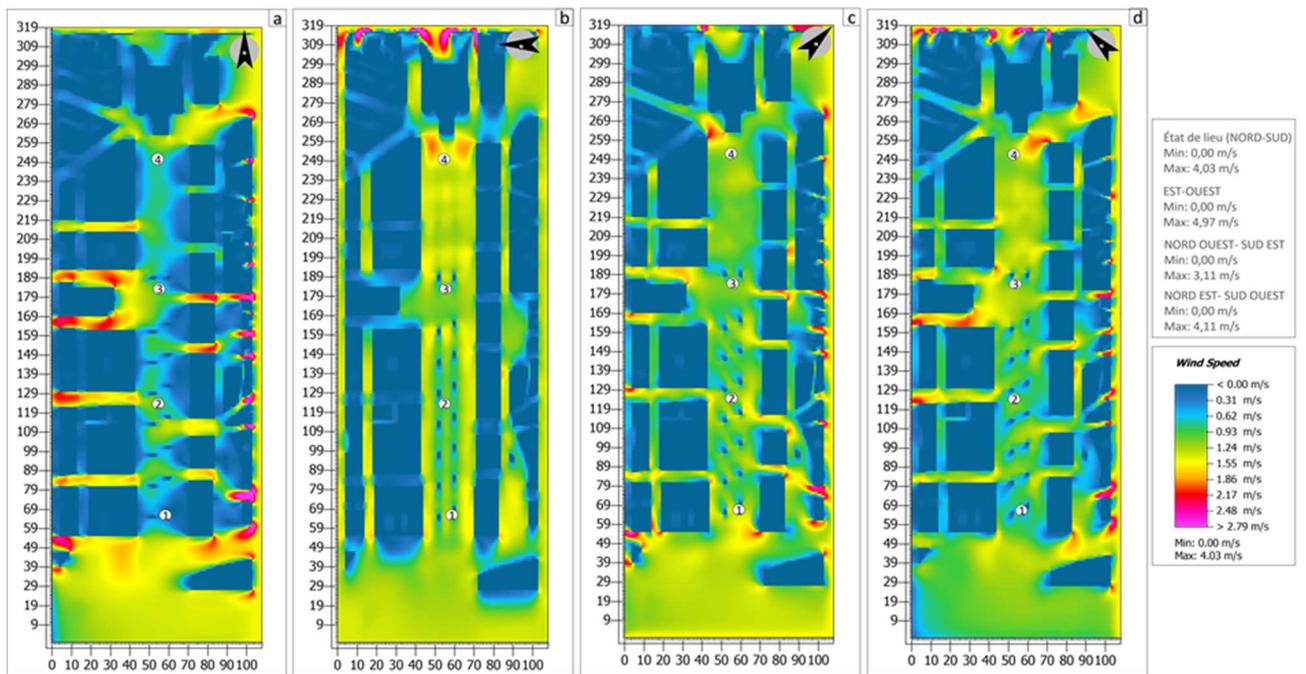


Figure V- 43 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario Orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

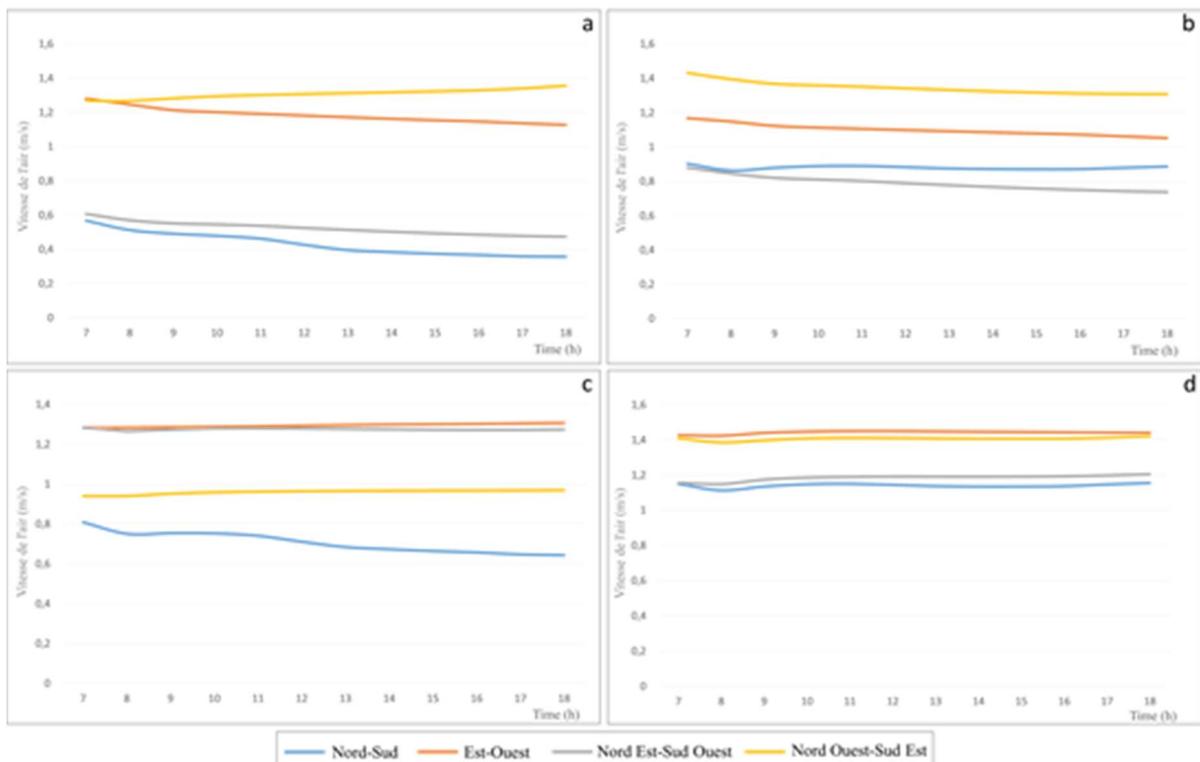


Figure V- 44 : Graphe de la variation de la vitesse de l'air pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

V.4.1.4 Température moyenne radiante

Les cartes (Figure V- 41 et Figure V- 43) montrent la répartition de la température moyenne radiante dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les températures minimales et maximales sont aussi mentionnées. On ne voit pas une grande différence entre les quatre orientations dans les deux places. La  $T_{mrt}$  suit l'ombre portée des bâtiments et des arbres.

Les graphes (Figure V- 42 et Figure V- 44) montrent la variation journalière de la  $T_{mrt}$  dans les quatre récepteurs pour les deux places. Pour le cours El-Bouni, il est difficile de déterminer quelle orientation est meilleure pour offrir des niveaux bas de  $T_{mrt}$ , sauf le 4<sup>ème</sup> récepteur, où l'orientation (NO –SE) présente une  $T_{mrt}$  très basse le long de la journée. Pour mieux saisir la différence dans la  $T_{mrt}$ , on a calculé la moyenne de  $T_{mrt}$  pour chaque scénario (tableau V-11 et V-12). La même chose concernant le cours de la révolution, la différence entre les scénarios est floue, mais dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> récepteur, là où se trouve une forte densité d'arbre, on remarque que l'écart entre les scénarios est presque nul.

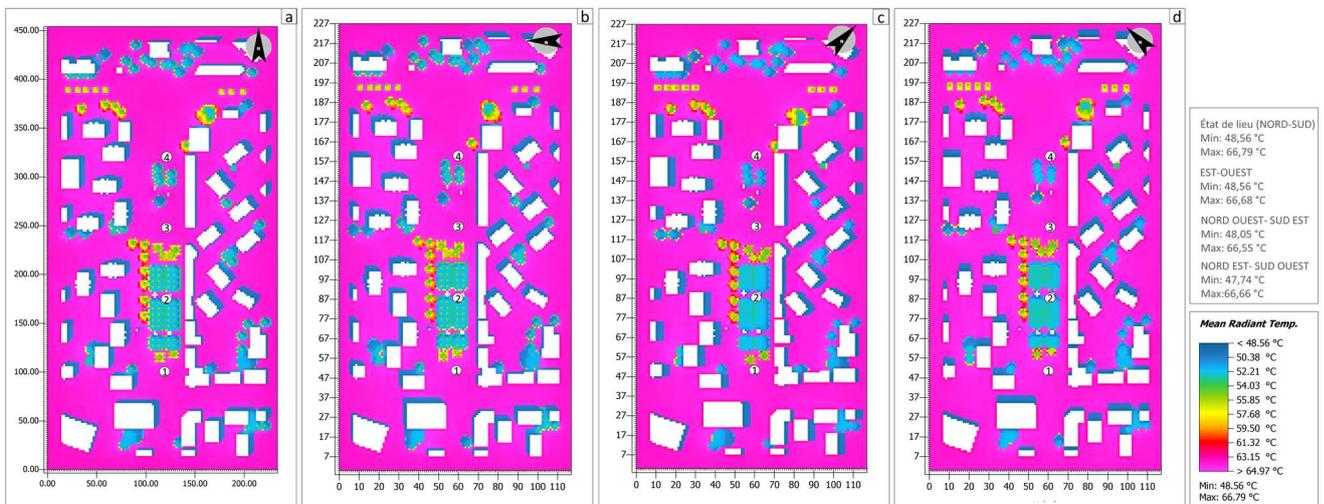


Figure V- 45 : Carte de la température moyenne radiante pour le scénario orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

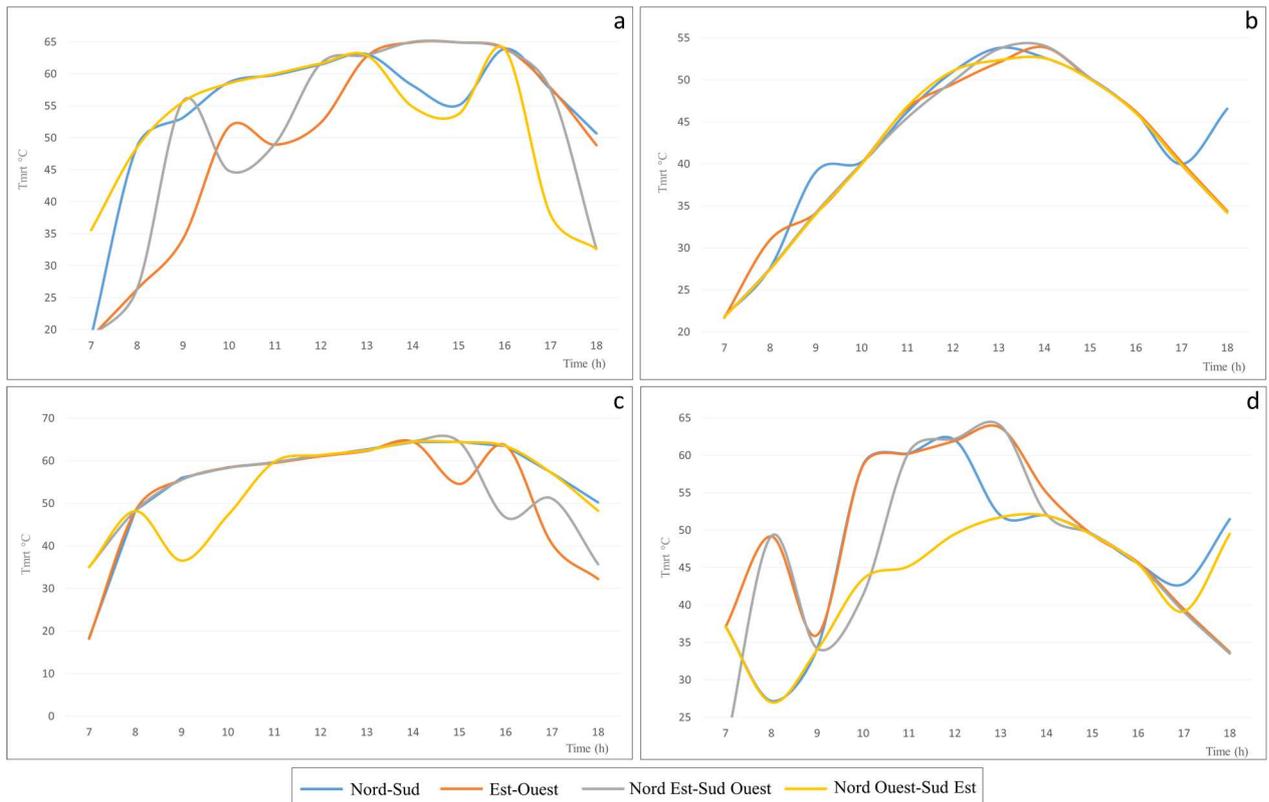


Figure V- 46 : Graphe de la variation de la température moyenne radiante pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

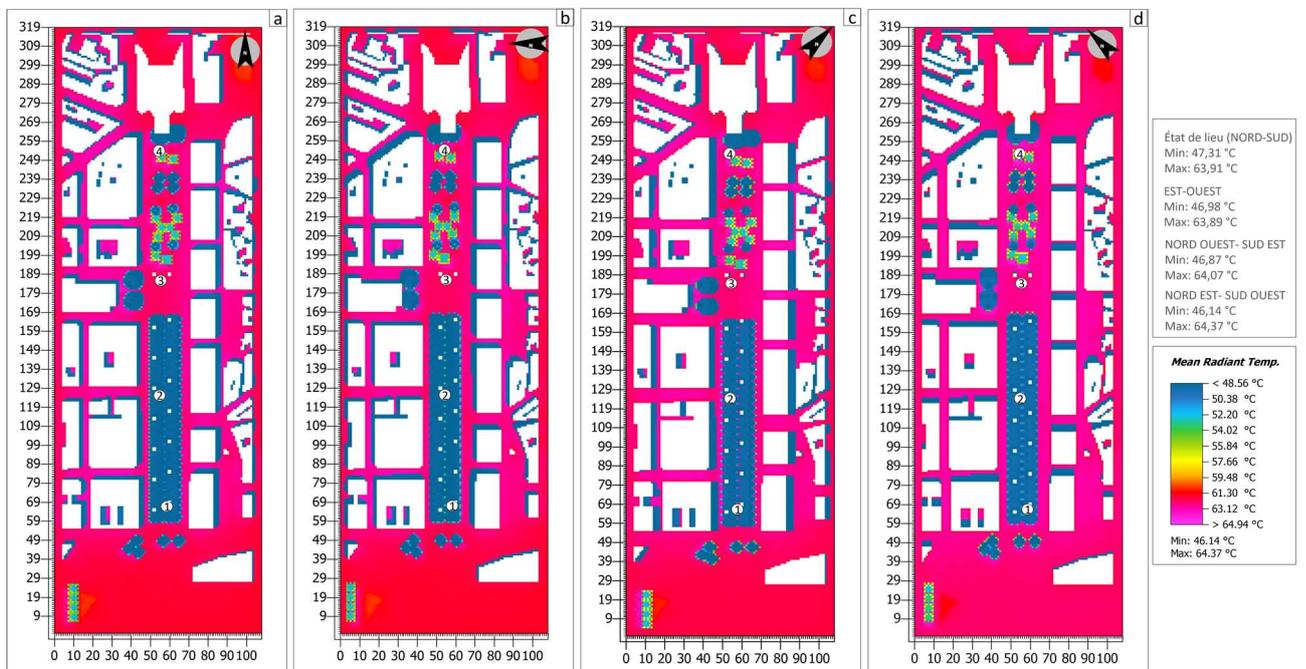


Figure V- 47 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

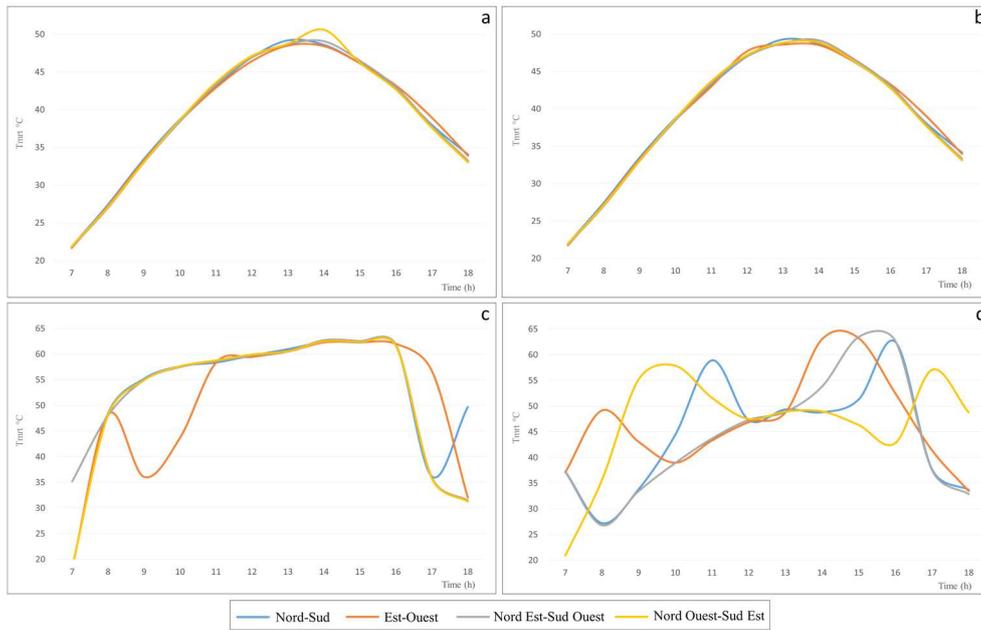


Figure V- 48 : Graphe de la variation de la température moyenne radiante pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### V.4.2 Impact de l'orientation sur les indices de confort thermique

Les deux tableaux (V-13 et V-14) présentent les valeurs moyennes des indices de confort thermique enregistrés pour les scénarios d'orientation au niveau du cours de la révolution et le cours El-Bouni. Les résultats au niveau du cours El-Bouni indiquent que l'orientation qui présente le PET et l'UTCI les plus bas est celle du NO-SE. Alors que le SET le plus bas est enregistré au niveau de l'orientation E-O (tableau V-13).

Tableau V- 12: Récapitulation de l'orientation (indices de confort, cours El-Bouni)

Scénario d'orientation cours El-Bouni	PET °C	SET °C	UTCI °C
N-S	40,61369	35,9658325	37,5932925
E-O	39,133395	35,0349175	36,9411225
NE-SO	39,0837925	35,170105	36,9030425
NO-SE	38,9526875	35,224355	36,8786225

Les résultats au niveau du cours de la Révolution indiquent que l'orientation qui présente le PET, SET et l'UTCI les plus bas est celle de l'E-O (tableau V-14).

Tableau V- 13: Récapitulation des scénarios de l'orientation (indices de confort, cours centre-ville)

Scénario orientation cours centre ville	PET °C	SET °C	UTCI °C
N-S	37,574355	35,131875	35,910605
E-O	37,0196025	34,2123325	35,3354975
NE-SO	37,131875	34,810895	35,7185825
NO-SE	37,18140293	34,39077	35,7267925

V.4.2.1 PET (Température équivalente physiologique)

Les cartes (Figure V- 45 et Figure V- 47) montrent la répartition du PET dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les valeurs minimales et maximales sont aussi mentionnées. On ne voit pas une grande différence entre les quatre orientations dans les deux places, sauf pour le scénario (Nord-Sud), où on remarque que le PET est plus élevé aux niveaux des espaces adjacents aux façades Ouest des bâtiments, soit le côté Est de la place. Ces façades sont exposées au soleil l'après-midi, et participe à l'augmentation du PET, Contrairement à la façade Est, où le PET est plus bas grâce à la présence d'ombre. On remarque aussi l'orientation NO –SE du cours El-Bouni présente un PET plus bas dans l'espace arboré. Les graphes (Figure V- 46 et Figure V- 48) montrent la variation journalière du PET dans les quatre récepteurs pour les deux places. Pour le cours El-Bouni, il est difficile de déterminer quelle orientation est meilleure pour offrir des niveaux bas de PET, sauf le 4<sup>ème</sup> récepteur, où l'orientation (NO –SE) présente un PET très bas le long de la journée. La même chose concernant le cours de la révolution, la différence entre les scénarios est floue, mais dans le 1<sup>er</sup> récepteur, là où se trouve une forte densité d'arbre, on remarque que l'écart entre les scénarios est minime, et dans le 2<sup>ème</sup> récepteur, on remarque que l'orientation Est-Ouest est meilleure, offrant un niveau de PET plus bas. Les tableaux V-13 et V-14 montre la moyenne de PET pour chaque orientation.

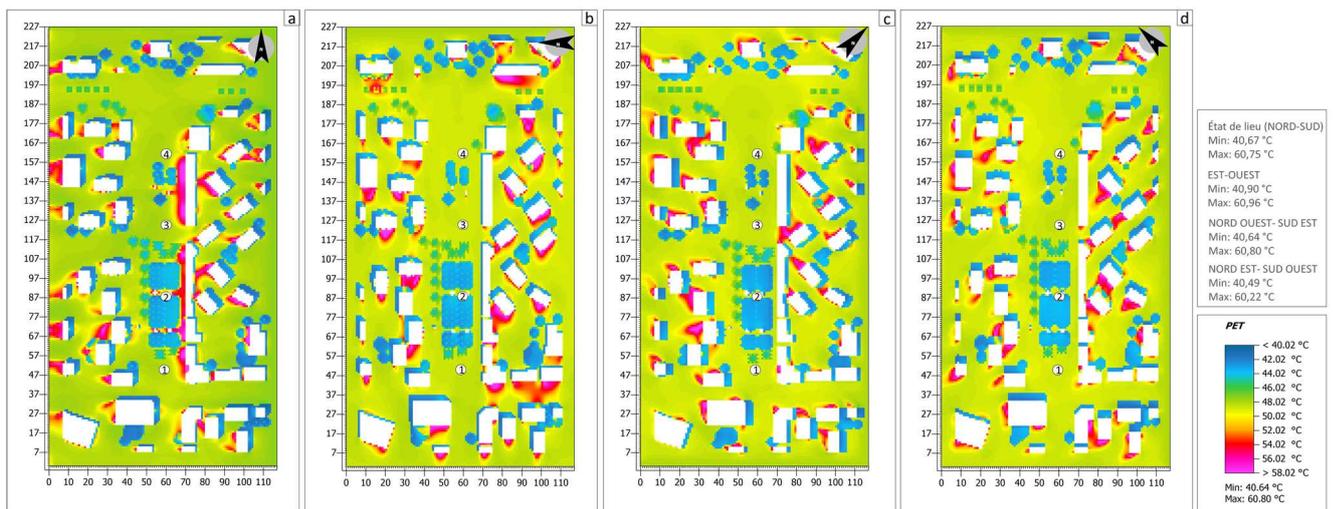


Figure V- 49 : Cartes du PET pour le scénario orientation du cours d'El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

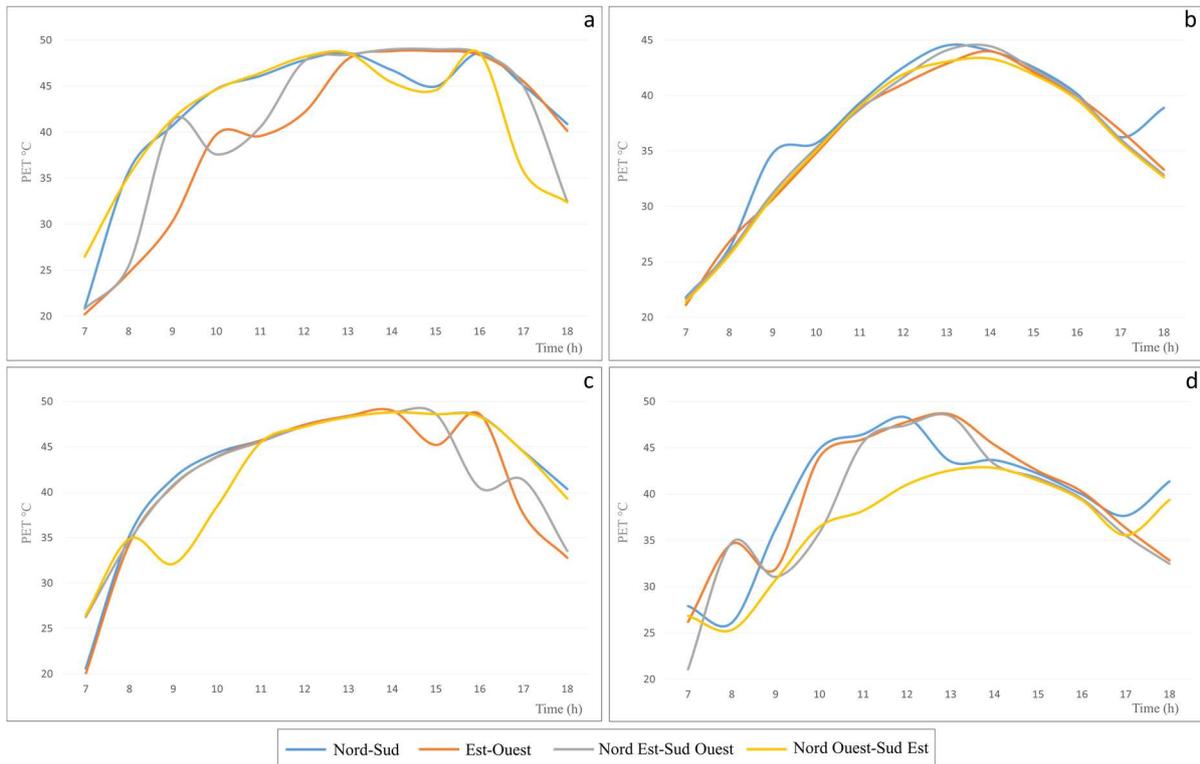


Figure V- 50 : Graphe de la variation du PET pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

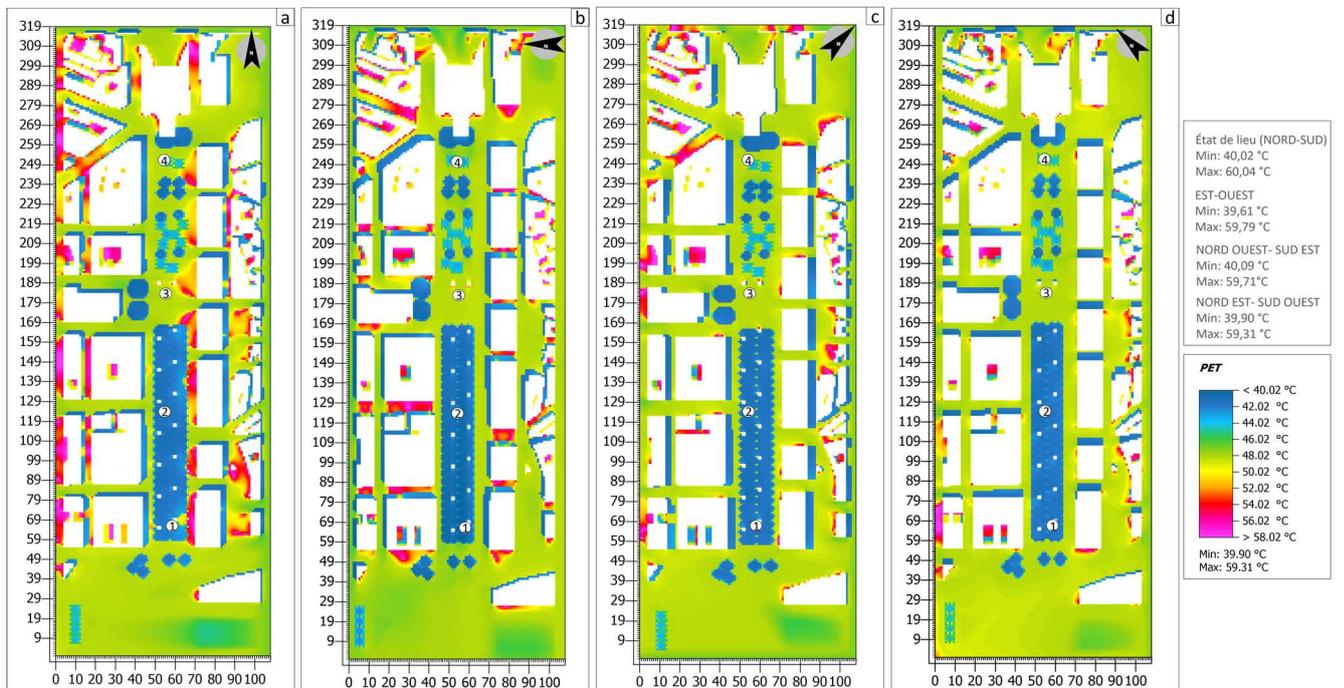


Figure V- 51 : Cartes du PET pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

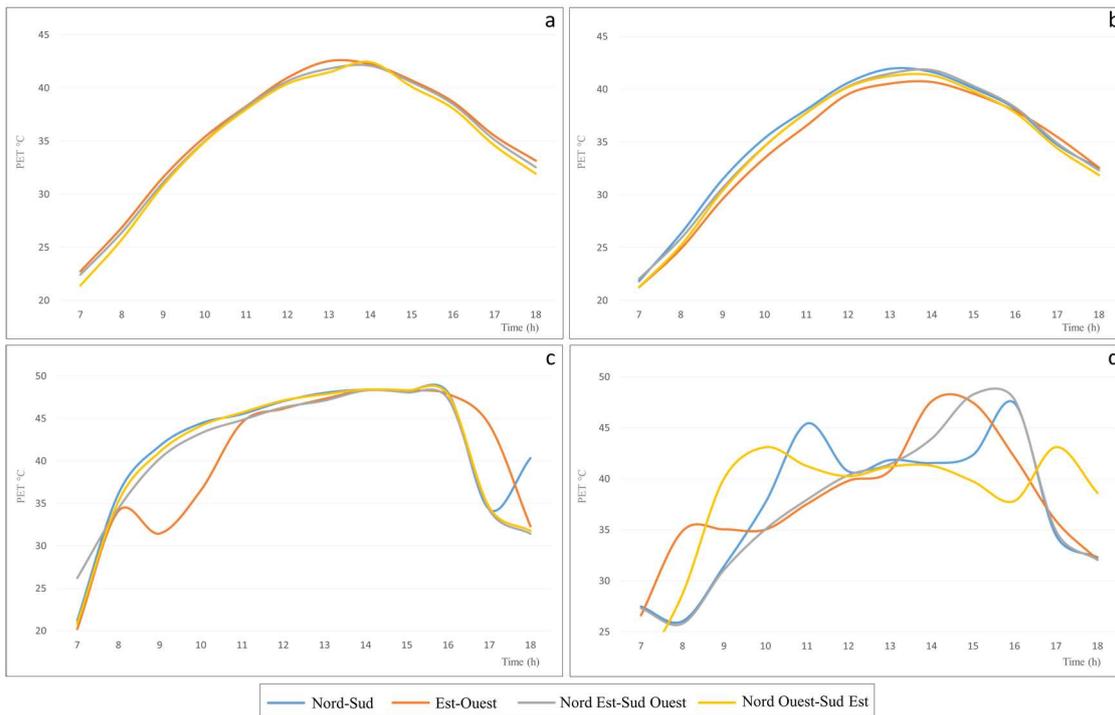


Figure V- 52 : Graphe de la variation du PET pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### V.4.2.2 SET (température effective standard)

Les cartes (Figure V- 49 et Figure V- 51) montrent la répartition du SET dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les valeurs minimales et maximales sont aussi mentionnées pour chaque scénario. On remarque une différence entre les quatre orientations dans les deux places. Le scénario (Nord-Sud), présente des valeurs élevées de SET aux niveaux des espaces adjacents aux façades Ouest des bâtiments, ce qui augmente le SET de la place et surtout dans son côté Est. On remarque aussi l'orientation Est-Ouest présente un SET plus bas dans l'espace arboré, pour les deux places. On constate donc, d'après les cartes extraite à 14h00, que la meilleure orientation qui offre un niveau bas de SET est l'orientation Est-Ouest, alors que l'orientation Nord-Sud constitue le cas le plus défavorable, pour les deux places.

Les graphes (Figure V- 50 et Figure V- 52) montrent la variation journalière du SET dans les quatre récepteurs pour les deux places. Pour le cours El-Bouni, il est difficile de déterminer quelle orientation est meilleure pour offrir des niveaux bas de SET, sauf le 4<sup>ème</sup> récepteur, où l'orientation (NO –SE) présente un SET très bas le long de la journée, ainsi que l'orientation Nord-Sud, constitue le cas le plus défavorable sur les quatre récepteurs. La même chose concernant le cours de la révolution, la différence entre les scénarios est floue pour le 4<sup>ème</sup> récepteur, mais dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> récepteur, là où se trouve une forte densité d'arbre, on

remarque que, que l'orientation Est-Ouest et NO –SE sont meilleures, offrant un niveau de SET plus bas. On note aussi que l'orientation Nord-Sud est la plus défavorable, surtout dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> récepteur. Le tableau V-14 et V-15 montre la moyenne de SET pour chaque orientation.

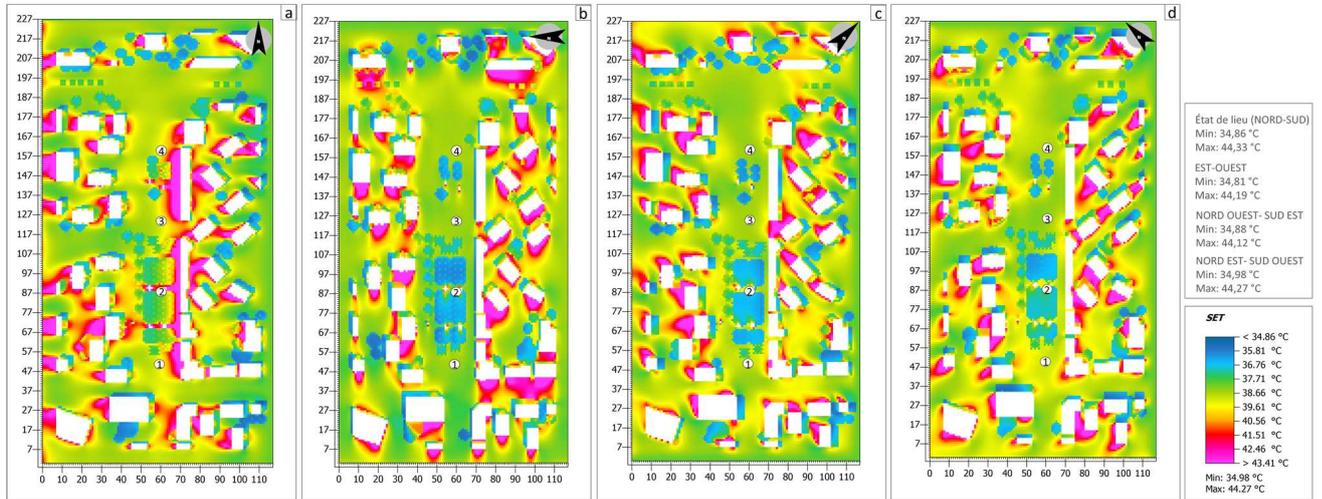


Figure V- 53 : Carte du SET pour le scénario orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

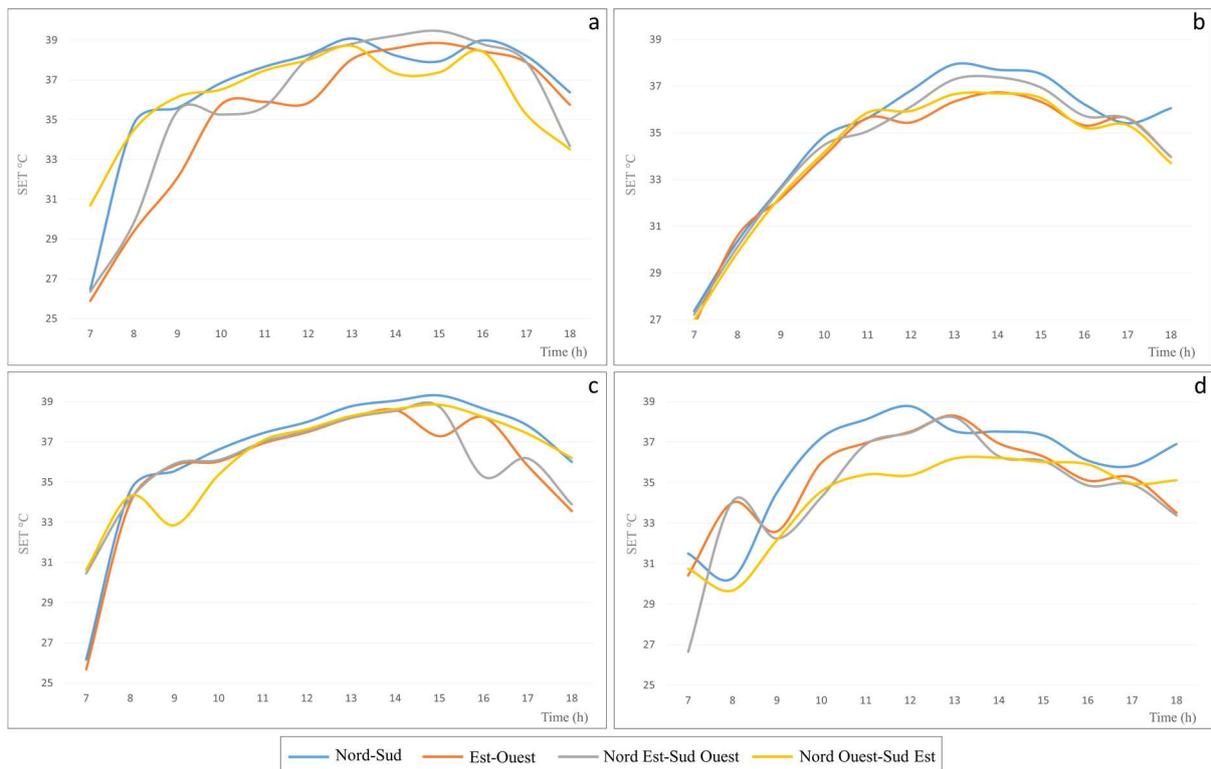


Figure V- 54 : Graphe de la variation du SET pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

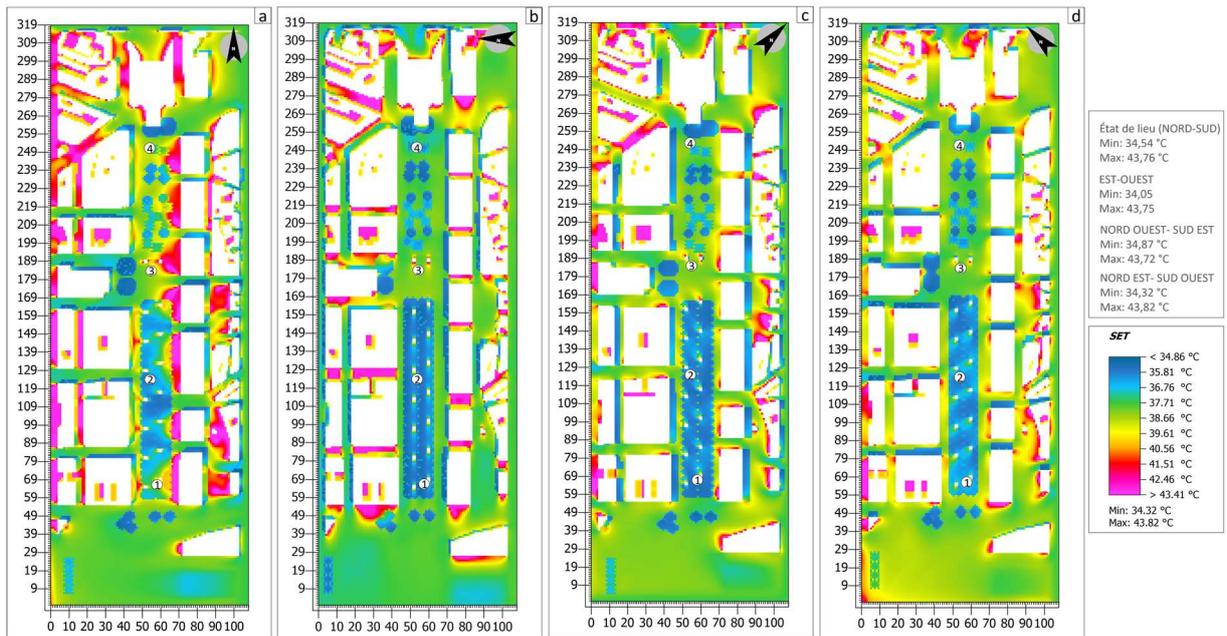


Figure V- 55 : Carte du SET pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

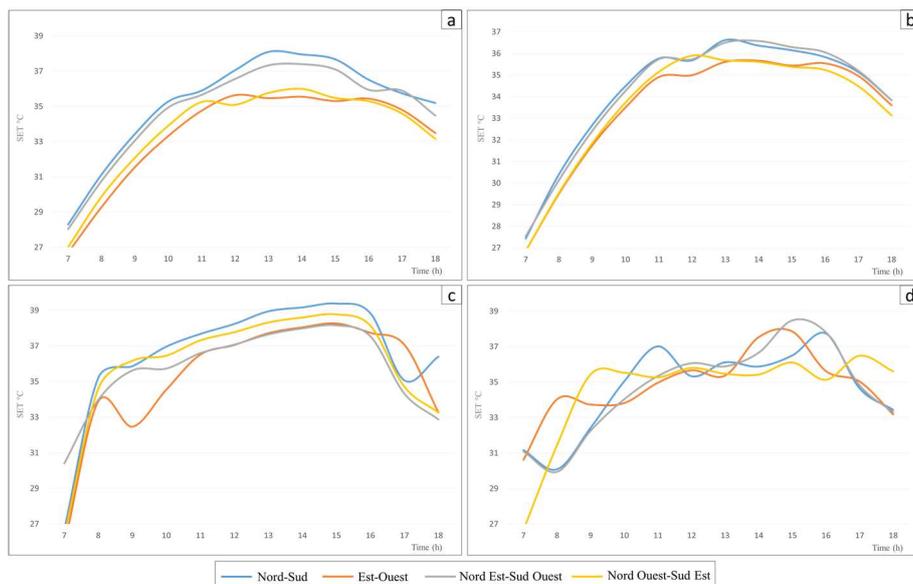


Figure V- 56 : Graphe de la variation du SET pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### V.4.2.3 UTCI (L'indice universel du climat thermique)

Les cartes (Figure V- 53 et Figure V- 55) montrent la répartition l'UTCI dans le cours El-Bouni et le cours de la révolution pour les quatre orientations, les valeurs minimales et maximales sont aussi mentionnées. On ne voit pas une grande différence entre les quatre orientations dans les deux places, sauf pour le scénario (NO –SE) et (NE –SO), où on remarque que l'UTCI est un peu plus bas aux niveaux des espaces arborés dans la place El-Bouni. On remarque aussi

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

l'orientation Est-Ouest du cours de la révolution présente un UTCI plus bas dans la partie sud de la place.

Les graphes (Figure V- 54 et Figure V- 56) montrent la variation journalière de l'UTCI dans les quatre récepteurs pour les deux places. Pour le cours El-Bouni, il est difficile de déterminer quelle orientation est meilleure pour offrir des niveaux bas d'UTCI, sauf le 4<sup>ème</sup> récepteur, où l'orientation (NO –SE) présente un UTCI plus bas le long de la journée. La même chose concernant le cours de la révolution, la différence entre les scénarios est floue au niveau du 4<sup>ème</sup> récepteur, mais dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>ème</sup> récepteur, là où se trouve une forte densité d'arbre, on remarque que l'orientation Est-Ouest est meilleure, offrant un niveau d'UTCI plus bas. Le tableau V-14 ET V-15 montrent la moyenne de l'indice pour chaque orientation.

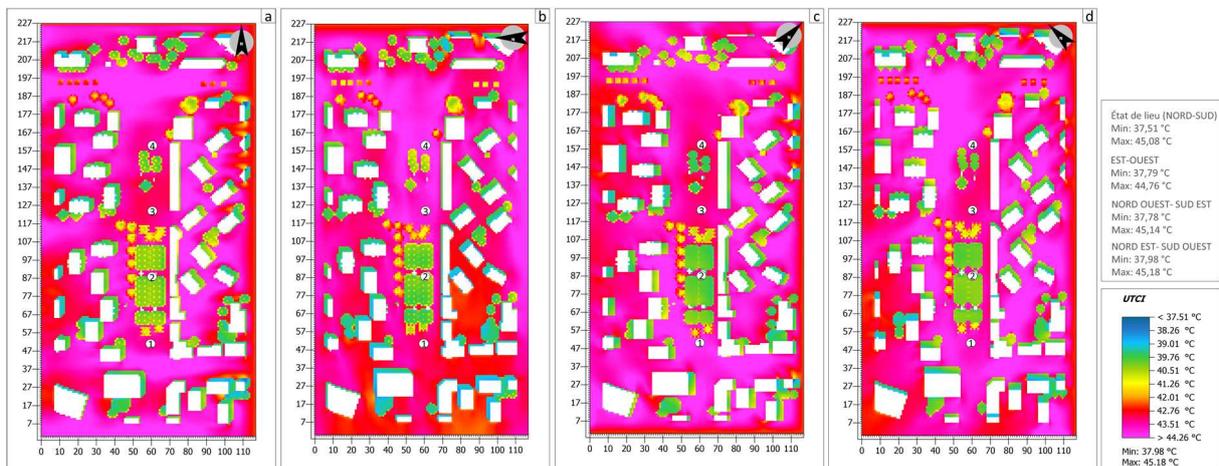


Figure V- 57 : Carte de l'UTCI pour le scénario orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

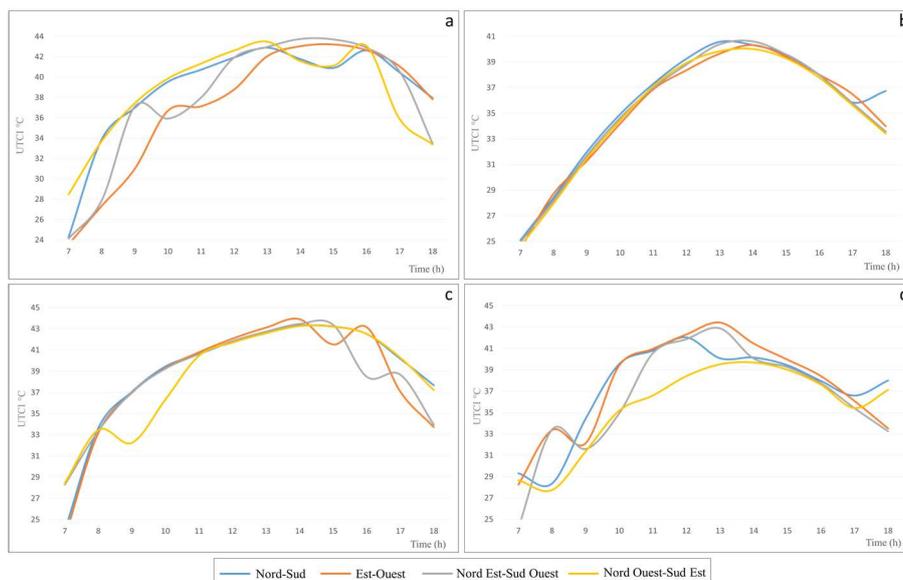


Figure V- 58 : Graphe de la variation de l'UTCI pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

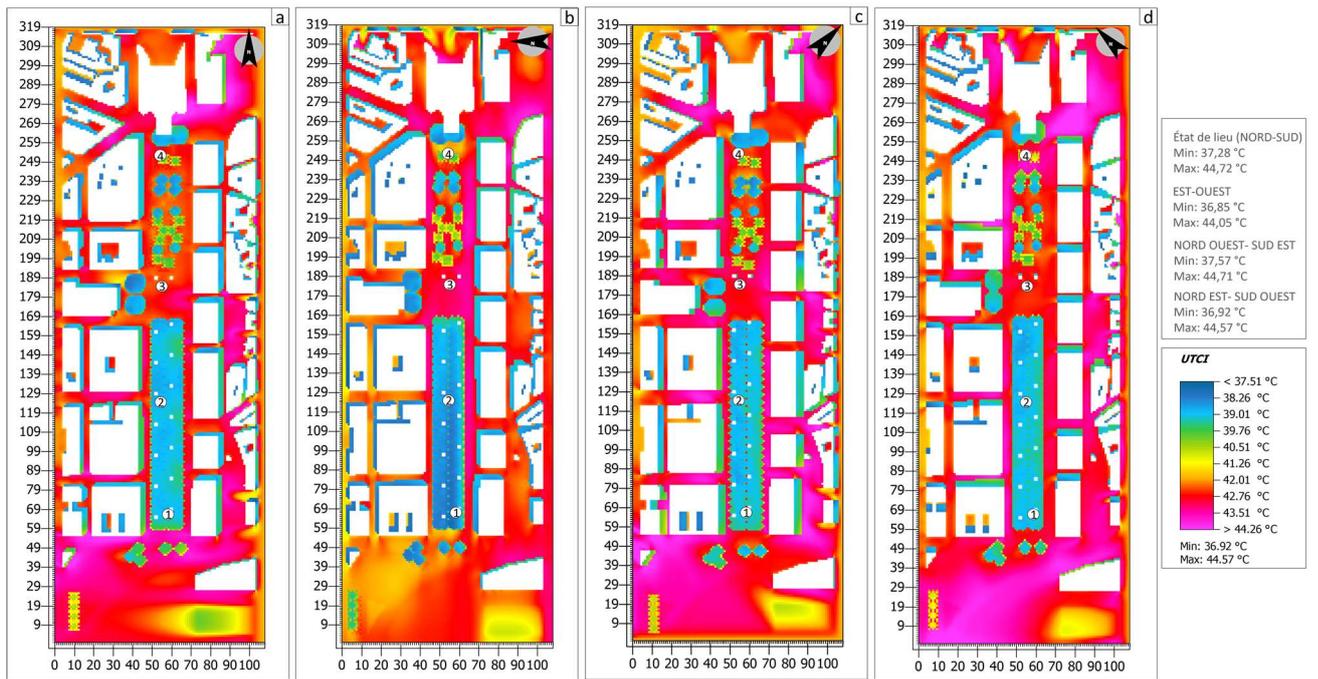


Figure V- 59 : Carte de l'UTCI pour le scénario orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) NO-SE, d) NE-SO

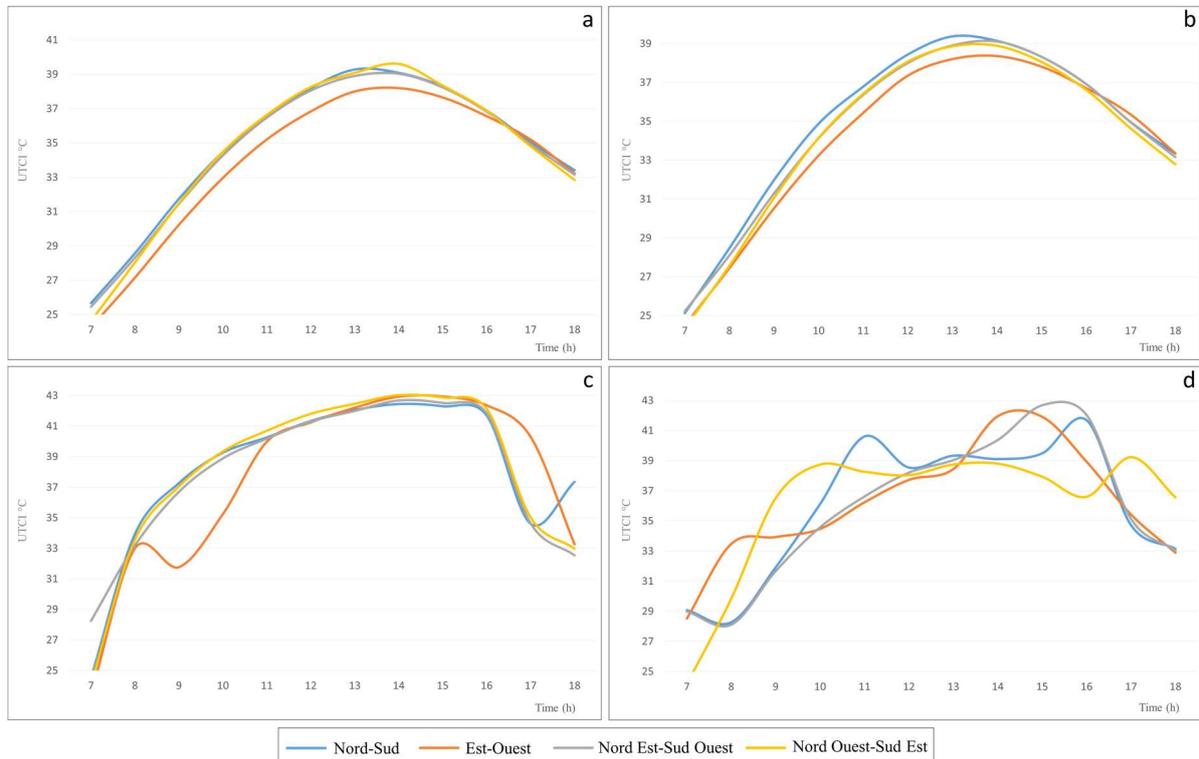


Figure V- 60 : Graphe de la variation de l'UTCI pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### V.5 Impact de la végétation

Dans cette section nous présentons les résultats des scénarios sans végétation pour les cinq espaces étudiés. Nous comparons pour chaque espace entre l'état de lieu (avec végétation) et le scénario sans végétation. Les résultats détaillés de ce scénario sont présentés dans l'annexe 02

#### V.5.1 Le cours de la révolution :

Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes des paramètres climatiques et les indices de confort thermique enregistrés dans quatre récepteurs et de 07h00 à 18h00 au niveau du cours de la révolution. On remarque une différence de 0.42 °C pour la température de l'air et 10.05 °C pour la température moyenne radiante. L'humidité relative augmente d'une valeur de 1.2 % et la vitesse de l'air avec 0.13 m/s. De plus, on note une baisse significative au niveau du PET (5.5 °C) et une baisse de 2.2 °C Et 2.9°C Dans les valeurs du SET et de l'UTCI respectivement.

Tableau V- 14: Récapitulation des scénarios de la végétation (cours de la Révolution)

	Vair (m/s)	T air °C	Tmrt °C	RH %	PET °C	SET °C	UTCI °C
cours de la Révolution sans végétation	0,660	33,397	53,886	42,773	43,085	37,312	38,775
cours de la Révolution avec végétation	0,789	32,981	43,836	43,932	37,574	35,132	35,911

#### V.5.2 Le cours el bouni

Le tableau ci-dessous présente les résultats du cours El-Bouni. On remarque une baisse de 0.22 °C pour la température de l'air et 6.8 °C pour la température moyenne radiante. L'humidité relative augmente d'une valeur de 0.9 % et la vitesse de l'air diminue avec 0.1 m/s. Concernant les indices de confort, on note une baisse de 2.9 °C, 0.9 °C, 1.8 °C au niveau du PET, SET, et l'UTCI respectivement.

Tableau V- 15: Récapitulation des scénarios de la végétation (cours El-Bouni)

	Vair (m/s)	T air °C	Tmrt °C	RH %	PET °C	SET °C	UTCI °C
cours El-Bouni sans végétation	0,918	33,329	56,798	43,312	43,504	36,860	39,357
cours El-Bouni avec végétation	0,822	33,110	50,027	44,186	40,614	35,966	37,593

#### V.5.3 La placette de la vieille ville

En ce qui concerne la vieille ville, on enregistre une baisse de 0.35 °C dans la température de l'air et 6.5 °C dans la température moyenne radiante. On note aussi une baisse de 4.1 °C, 2.9 °C et de 3.1 °C dans le PET, le SET et l'UTCI respectivement.

Tableau V- 16: Récapitulation des scénarios de la végétation (placette de la vieille ville)

	Vair (m/s)	T air °C	Tmrt °C	RH %	PET °C	SET °C	UTCI °C
Placette Vielle Ville sans végétation	0,673	33,514	51,345	42,767	41,636	36,863	38,314
Placette Vielle Ville avec végétation	0,769	33,159	44,876	43,616	37,555	33,920	35,168

### V.5.4 La placette d'El-Bouni

Au niveau de la placette El-Bouni qui se caractérise par une faible densité végétale, on remarque que la température de l'air et la température moyenne radiante baisse avec 0.7 °C et 6.5 °C respectivement. En outre on enregistre une diminution de 3.1 °C 1.3 °C et 2.2 °C dans le PET, le SET et l'UTCI.

Tableau V- 17: Récapitulation des scénarios de la végétation (placette El-Bouni)

	Vair (m/s)	T air °C	Tmrt °C	RH %	PET °C	SET °C	UTCI °C
Placette El-Bouni sans végétation	0,842	34,318	58,252	42,148	44,976	37,932	40,567
Placette El-Bouni avec végétation	0,827	33,594	51,705	43,666	41,823	36,629	38,377

### V.5.5 La placette Alexis Lambert

La placette Alexis Lambert se caractérise par une densité végétale très élevée. L'élimination de la végétation participe à une augmentation de 0.26 °C et 5.8 °C dans la température de l'air et la température moyenne radiante respectivement. Concernant les indices du confort on note une hausse de 3.45 °C, 1.3 °C et 1.7 °C au niveau du PET, SET et l'UTCI respectivement.

Tableau V- 18: Récapitulation des scénarios de la végétation (placette Alexis Lambert)

	Vair (m/s)	T air °C	Tmrt °C	RH %	PET °C	SET °C	UTCI °C
Placette Alexis Lambert sans végétation	0,580	33,248	52,625	43,550	43,619	38,109	38,232
Placette Alexis Lambert avec végétation	0,626	32,989	46,783	44,225	40,166	36,807	36,533

### Conclusion :

Ce chapitre était consacré aux scénarios d'amélioration du microclimat et du confort thermique. L'objectif des scénarios d'amélioration est d'étudier dans un premier temps l'impact de chaque paramètre morphologique indépendamment sur le microclimat et les indice de confort thermique. Ensuite voir l'impact d'une combinaison de ces paramètres.

## Chapitre V : Scénarios d'amélioration

La hauteur du bâti est un paramètre clé qui influence le microclimat et le confort thermique dans l'espace extérieur en créant de l'ombre. Trois placettes ont été sélectionnées pour le scénario de variation de la hauteur : la placette El-Bouni, le Cours El-Bouni et la placette de la vieille ville. À la placette d'El-Bouni, la hauteur du bâti est doublée à chaque étape jusqu'à atteindre une limite où les améliorations deviennent négligeables. La même méthode est appliquée à la placette de la vieille ville. En ce qui concerne le Cours d'El-Bouni, la hauteur de l'ensemble du bâti est multipliée par 8, puis uniquement la hauteur du bâti entourant la placette, qui représente 50% de la surface bâtie.

La densité du bâti environnant l'espace public a une incidence sur le microclimat et le confort thermique ressenti. Afin de mesurer cet impact, notre choix s'est porté sur deux places caractérisées par une faible densité urbaine : le cours El-Bouni et la placette El-Bouni.

L'orientation constitue un paramètre important qui a un impact sur le microclimat, en particulier au niveau des rues. Dans notre étude, nous avons choisi deux places qui se caractérisent par leur forme longitudinale : le cours de la Révolution et le cours El-Bouni. Ces deux places présentent une configuration similaire à celle d'une rue, ce qui fait de l'orientation un élément de conception essentiel à prendre en compte.

L'évaluation de l'impact de l'orientation se déroule en deux étapes. La première consiste à étudier la place sans végétation, tandis que la deuxième implique la présence de végétation. L'objectif est de comprendre l'influence de l'orientation de la place, à la fois en présence et en absence de végétation.

En observant les deux étapes, nous pourrions déterminer comment l'orientation affecte le microclimat de la place. Par exemple, une orientation spécifique peut favoriser la circulation de l'air et créer des courants d'air rafraîchissants, tandis qu'une autre orientation peut entraîner une accumulation de chaleur ou une exposition excessive au vent. En introduisant la végétation dans la deuxième étape, nous pourrions également évaluer l'influence combinée de l'orientation et de la présence de végétation sur le microclimat. Les arbres et les plantes peuvent fournir de l'ombre, réduire l'effet de serre, augmenter l'humidité de l'air et modifier les flux d'air dans la zone.

Concernant la végétation on a appliqué Ce scénario sur les cinq placettes. Il s'agit l'éliminer la végétation pour chaque placette, et comparer entre les deux cas (sans et avec végétation).

-L'impact de la hauteur du bâti :

Les résultats de l'étude démontrent une corrélation directe entre la hauteur des bâtiments et les paramètres climatiques tels que la température de l'air, la température moyenne radiante et

l'humidité relative. En comparant un scénario avec une hauteur de 15 mètres à un autre avec une hauteur de 120 mètres, une diminution moyenne de 1,14 °C est observée dans la température de l'air. Cette baisse est plus prononcée dans la température moyenne radiante, avec une diminution moyenne de 11,8 °C. Il convient de souligner que la hauteur des bâtiments n'est pas le seul facteur morphologique qui influe sur le microclimat. En effet, la hauteur des bâtiments influence également le facteur de vue du ciel, qui joue un rôle important dans la réduction de la température. De plus, la disposition des bâtiments peut également affecter le microclimat d'un espace donné. Par exemple, deux espaces ayant la même hauteur de bâtiment et le même facteur de vue du ciel peuvent présenter des paramètres climatiques différents en raison de leur disposition.

Il est important de noter que la hauteur des bâtiments et le facteur de vue du ciel contribuent à la diminution de la température moyenne radiante. Cependant, ils peuvent parfois contribuer à l'augmentation de la température de l'air, en fonction de la configuration spatiale et de la disposition des bâtiments environnants dans l'espace public.

Concernant l'impact de la hauteur du bâti sur les indices de confort thermique, les résultats démontrent que la hauteur du bâti participe à la baisse des valeurs des indices de confort (PET, SET, UTCI). En ce qui concerne le PET, une diminution moyenne de 6.9 °C est enregistrée entre le scénario de 15 mètres de hauteur et celui de 120 mètres, on enregistre aussi une baisse de 2.8 °C et 4°C au niveau du SET et l'UTCI respectivement.

-L'impact de la densité du bâti

Les résultats mettent en évidence une corrélation entre la densité du bâti et les températures ( $T_{air}$ ,  $T_{mrt}$ ). Pour la température de l'air, une diminution moyenne de 0,14 °C est constatée entre le premier scénario (densité égale à 0) et le quatrième scénario (densité égale à 0,51). Cette baisse est plus prononcée dans la température moyenne radiante, avec une moyenne de 4,5 °C. De plus, une légère diminution de la vitesse de l'air est observée.

De plus, les résultats démontrent que la combinaison de la densité et de la hauteur entraîne une réduction plus significative que celle due à la hauteur seule. Dans le scénario "hauteur-densité", une baisse de 1,53 °C de la température de l'air ( $T_{air}$ ) et de 15 °C de la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ) est enregistrée. Pour le scénario "hauteur" uniquement, on observe une diminution de 1 °C de la  $T_{air}$  et de 12,3 °C de la  $T_{mrt}$ .

Les résultats indiquent également une corrélation entre la densité du bâti et les indices de confort. En ce qui concerne le PET, une diminution moyenne de 1 °C est enregistrée entre le

scénario 01 (densité égale à 0) et le quatrième scénario (densité égale à 0,51). Une diminution moyenne de 0,5 °C et de 0,8 °C est observée au niveau du SET et de l'UTCI respectivement.

En ce qui concerne le scénario combinant la hauteur et la densité, les résultats montrent que la combinaison de ces deux paramètres conduit à une diminution plus importante que celle de la hauteur seule. Dans le scénario "hauteur-densité", on enregistre une baisse de 7,3 °C, 1,5 °C et 5,1 °C dans le PET, le SET et l'UTCI respectivement. Pour le scénario "hauteur" uniquement, on observe une baisse de 6 °C, 1,66 °C et 3,6 °C dans le PET, le SET et l'UTCI respectivement.

-L'impact de l'orientation

Les résultats concernant le cours El-Bouni indiquent que l'orientation présentant des températures d'air plus basses et un taux d'humidité plus élevé est celle du Nord-Est. Cependant, la température moyenne radiante la plus basse est enregistrée dans l'orientation NO-SE. En ce qui concerne la vitesse de l'air, l'orientation Est-Ouest présente la vitesse la plus élevée. Quant aux résultats concernant le cours de la Révolution, ils indiquent que l'orientation présentant des températures d'air plus basses est celle de l'Est-Ouest, tandis que l'orientation Nord-Sud présente le taux d'humidité le plus élevé. La température moyenne radiante la plus basse est enregistrée dans l'orientation NE-SO. En ce qui concerne la vitesse de l'air, les orientations Est-Ouest et NO-SE présentent la vitesse la plus élevée.

Les résultats au niveau du cours El-Bouni indiquent que l'orientation qui présente le PET et l'UTCI les plus bas est celle du NO-SE. Alors que le SET le plus bas est enregistré au niveau de l'orientation E-O. au niveau du cours de la Révolution l'orientation qui présente le PET, SET et l'UTCI les plus bas est celle de l'E-O. On constate aussi d'après le scénario d'orientation que l'effet de l'orientation sur les paramètres climatique dépend d'autres paramètres tels que la végétation. Cela est démontré par les résultats obtenus pour l'orientation sans végétation, qui diffèrent des résultats précédents (voir Annexe 02)

-les résultats démontrent également le rôle important de la végétation dans la diminution de la température de l'air et la température moyenne radiante par la création de l'ombre et l'augmentation de l'humidité de l'air par évapotranspiration.

Nous avons également effectué une comparaison entre les cinq places sans végétation. Les résultats montrent que la placette de la vieille ville, qui se caractérise par une densité de bâti élevée, et la placette Alexis Lambert présentent les conditions microclimatiques les plus optimales, tandis que la place El-Bouni est la placette la plus défavorable. Les résultats de la simulation sans végétation sont présentés en Annexe 02.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale :

Les zones urbaines présentent un risque accru de stress thermique par rapport aux zones rurales en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène se produit lorsque les bâtiments et les infrastructures remplacent les terres naturelles et la végétation, ce qui entraîne des températures plus élevées dans les zones urbaines par rapport à leur environnement rural.

Dans un contexte de changement climatique et de croissance urbaine, le confort thermique extérieur dans les espaces urbains ouverts suscite de plus en plus l'attention des chercheurs. De nombreuses études ont été menées sur ce sujet dans le monde entier, certaines se concentrant sur l'évaluation du confort thermique dans les espaces urbains extérieurs, tandis que d'autres cherchent à comprendre l'impact des paramètres de la morphologie urbaine sur le microclimat urbain et le confort des utilisateurs.

Le confort thermique extérieur est d'une grande importance dans les espaces publics urbains pour améliorer la qualité de vie dans les centres urbains. Les espaces urbains extérieurs confortables, tels que les rues, les places, les parcs et les terrains de jeux, offrent des lieux publics de qualité qui attirent davantage de personnes à l'extérieur, favorisant une vie sociale active et contribuant à la vitalité urbaine. Par conséquent, le confort thermique extérieur est un aspect crucial des espaces publics urbains pour un développement urbain durable.

Cette recherche s'est concentrée sur le confort thermique dans les espaces publics extérieurs et son lien avec les paramètres climatiques tels que la température de l'air, la vitesse du vent, la température moyenne radiante et l'humidité. L'étude a mis en lumière l'impact de la morphologie urbaine sur le microclimat en examinant cinq places publiques situées dans la ville d'Annaba, Algérie. Ces places ont été choisies en fonction de leur fréquentation et de leur diversité morphologique.

La recherche se situe dans le contexte du climat méditerranéen, où la chaleur estivale et l'humidité hivernale encourage le développement des îlots de chaleur urbains. Ces derniers ont des effets néfastes sur la santé et le bien-être des habitants. Plusieurs études antérieures ont examiné comment la conception urbaine peut atténuer ces effets, en mettant l'accent sur la végétation et la morphologie urbaine.

## Conclusion générale

Dans le cas d'Annaba, une ville portuaire en pleine expansion, la topographie, l'urbanisation et les facteurs historiques ont influencé sa forme urbaine. Les cinq places sélectionnées présentent des caractéristiques architecturales et urbaines variées, allant du médiéval au contemporain, et sont situées dans des quartiers urbains de morphologies différentes.

Chaque place étudiée présente des particularités spécifiques. Par exemple, la place du Cours de la Révolution est entourée de bâtiments néoclassiques et est marquée par une végétation abondante, tandis que la placette de la vieille ville a évolué d'une forme organique à une forme orthogonale. Les autres places présentent également des caractéristiques distinctes en termes de morphologie, d'architecture et de végétation.

L'objectif de cette étude était de comprendre comment la morphologie urbaine de ces places influence le confort thermique extérieur, en prenant en compte les conditions climatiques spécifiques de la région méditerranéenne. Parmi nos objectifs aussi était de vérifier la précision du modèle Envi-met dans les calculs microclimatique, à travers la confrontation aux données mesurées sur terrain, et mesurer à travers la simulation numérique, l'impact de chaque paramètre morphologique étudié, sur le microclimat et les indices de confort thermique.

Cette thèse était divisée en deux parties, une partie théorique contenant deux chapitres, un chapitre consacré à l'analyse des concepts de recherche et un autre à l'état de l'art. La partie pratique comprend trois chapitres, le premier dédié à la présentation du cas d'étude et les mesure sur terrain. La méthodologie adoptée s'est basée sur une approche quantitative composée de deux méthodes (les mesures sur terrain et la simulation numérique).

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé le cas d'étude et expliqué le protocole utilisé pour effectuer les mesures sur terrain. Les résultats obtenus révèlent une différence notable au niveau du même espace public concernant la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Il est important de noter que cette différence n'est pas constante et varie tout au long de la journée de mesure, ainsi que d'un jour à l'autre. Cette variation est principalement due à un ensemble de facteurs incontrôlables qui influencent le microclimat de la zone étudiée.

De plus, une comparaison entre les différents espaces publics met en évidence des différences significatives dans les paramètres climatiques, qui varient également d'un jour à l'autre. Il est

## Conclusion générale

intéressant de constater que les zones qui sont les plus favorables pendant les journées fraîches deviennent les moins favorables pendant les journées chaudes, et vice versa. En outre, il a été observé que les espaces denses offrent un plus grand confort pendant les journées chaudes, tandis que les espaces moins denses sont plus confortables lors des journées moins chaudes.

Ces constatations suggèrent que les caractéristiques de l'espace public, telles que la densité, peuvent jouer un rôle important dans la modération du climat local. Cependant, il est crucial de prendre en compte les nombreux facteurs variables qui peuvent influencer ces différences, afin de mieux comprendre et interpréter les résultats obtenus lors des mesures sur le terrain.

Le quatrième chapitre s'est concentré sur la simulation numérique à l'aide du modèle Envi-met pour évaluer les paramètres microclimatiques et les indices du confort thermique. L'objectif était de valider en premier temps les résultats de la simulation en les comparant avec des mesures sur le terrain, et en calculant le coefficient de détermination  $R^2$ . De plus, la simulation nous a permis de comparer les différents espaces étudiés et de relever les différences au niveau des paramètres climatiques et des indices de confort, en les reliant à aux variations morphologiques.

En raison de sa capacité à tenir compte de divers facteurs tels que les formes de construction, les types de végétation et les matériaux, le logiciel Envi-met a été sélectionné pour simuler le microclimat urbain et les indices du confort. Les données d'entrée requises pour cette simulation comprennent un modèle 3D créés à l'aide du logiciel Sketchup 2021 et un fichier de configuration. Pour valider le modèle Envi-met, les résultats de la simulation ont été comparés aux mesures réelles effectuées pendant quatre jours dans chaque emplacement. Les résultats du coefficient de détermination  $R^2$  montrent que le modèle est plus précis pour les emplacements d'El Bouni par rapport au centre-ville. De plus, l'écart entre les données mesurées et les données simulées diminue avec le temps de la simulation.

Des graphiques et des cartes climatiques ont été établis pour chaque emplacement, présentant les paramètres climatiques ainsi que les indices de confort tels que le PET, le SET et l'UTCI. Une moyenne a été calculée pour chaque emplacement à partir des données extraites de la simulation numérique, afin de comparer ces paramètres.

## Conclusion générale

La comparaison des données mesurées avec les résultats de la simulation révèle que le modèle Envi-met donne des résultats relativement proches des mesures sur le terrain en ce qui concerne la température de l'air. Cependant, la précision diminue pour les emplacements du centre-ville. Les résultats de la simulation montrent également des valeurs d'humidité relative inférieures dans les emplacements proches de la mer.

En ce qui concerne la température de l'air, les emplacements Alexis Lambert et le cours de la révolution présentent des températures plus basses, tandis que l'emplacement El-Bouni est le plus chaud. Concernant la température moyenne radiante, les valeurs les plus basses sont observées au cours de la révolution et à la placette de la vieille ville, tandis que la placette El-Bouni présente la température moyenne radiante la plus élevée. Les valeurs les plus basses des indices de confort thermique sont enregistrées au cours de la révolution.

Le cinquième et le dernier chapitre était consacré à la deuxième phase de la simulation numérique qui vise à étudier les différentes possibilités d'amélioration du microclimat et du confort thermique en modifiant certains paramètres morphologiques tels que l'orientation, la végétation, la hauteur et la densité des bâtiments.

Les résultats de ce chapitre affirment la relation directe entre la hauteur des bâtiments et les paramètres climatiques. Une diminution moyenne de 1,14 °C dans la température de l'air et de 11,8 °C au niveau de la température moyenne radiante est observée entre un scénario d'une hauteur de 15 mètres à un autre d'une hauteur de 120 mètres. En plus, il est important de noter que la hauteur des bâtiments et le facteur de vue du ciel peuvent parfois contribuer à l'augmentation de la température de l'air, et cela en fonction de la disposition du bâti qui entoure l'espace public.

Concernant le paramètre de la densité bâti, les résultats montrent que son impact sur la température de l'air et la température moyenne radiante est moins important que l'impact de la hauteur. En effet, on enregistre une diminution de 0,14 °C le scénario d'une densité égale à 0 et le scénario de 0,51 de densité. Cette baisse est plus prononcée dans la température moyenne radiante, avec une moyenne de 4,5 °C. Nous constatons aussi que la combinaison de la densité et de la hauteur emporte une diminution plus significative que celle due à la hauteur seule. Dans le scénario "hauteur-densité", une baisse de 1,53 °C de la température de l'air ( $T_{air}$ ) et de 15 °C

## Conclusion générale

de la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ) était enregistrée, alors que pour le scénario "hauteur" uniquement, on observe une diminution de 1 °C de la  $T_{air}$  et de 12,3 °C de la  $T_{mrt}$ .

Un autre paramètre aussi joue un rôle important dans la modification du microclimat qui l'orientation de l'espace. Les résultats du scénario de l'orientation montrent que son impact dépend de l'aménagement de l'espace. Au niveau du cours El-Bouni, l'orientation Nord-Est présente des températures d'air plus basses et un taux d'humidité plus élevé. Alors que la température moyenne radiante la plus basse est enregistrée dans l'orientation NO-SE. Les résultats du cours de la Révolution indique que l'orientation Est-Ouest présente des températures d'air plus basses, tandis que l'orientation Nord-Sud présente le taux d'humidité le plus élevé. La température moyenne radiante la plus basse est enregistrée dans l'orientation NE-SO.

En outre, les résultats de la simulation mettent en évidence le rôle essentiel de la végétation dans la réduction de la température de l'air et de la température moyenne radiante. Cela est principalement dû à la création d'ombre et à l'augmentation de l'humidité de l'air grâce à l'évapotranspiration. La comparaison entre cinq places sans tenir compte de la végétation montre que la placette de la vieille ville, caractérisée par une densité de bâti élevée, et la placette Alexis Lambert offrent les conditions microclimatiques les plus favorables, tandis que la place El-Bouni est la moins propice.

Pour récapituler, l'objectif de cette étude était de comprendre comment la morphologie urbaine des espaces publics extérieurs influence le microclimat et modifie le confort thermique. Ceci a été réalisé grâce à l'étude de cinq places publiques présentant des morphologies différentes, situées dans la ville d'Annaba. Nous avons réussi à confirmer notre hypothèse initiale énoncée au début de la thèse, démontrant que :

- Les résultats de l'étude mettent en évidence une corrélation directe entre la hauteur des bâtiments et les paramètres climatiques, une relation qui se révèle plus prononcée que celle observée avec la densité urbaine.
- L'impact de l'orientation varie d'un espace à un autre. Dans cette étude, nous avons montré que l'orientation la plus optimale dans la placette du Cours de la Révolution ne correspond pas à la même orientation dans le Cours El-Bouni, et que l'orientation la plus

favorable lorsque l'espace est végétalisé ne correspond pas à celle si cet espace n'est pas végétalisé

- Les espaces denses offrent un confort optimal durant les journées chaudes, mais leur confort diminue lors des journées moins chaudes. Cela suggère que l'influence de la densité est dépendante des conditions météorologiques. Par conséquent, nous observons que les espaces denses peuvent présenter des conditions thermiques moins favorables en cas de baisse de température.
- La configuration spatiale et de la disposition des bâtiments du tissu urbain dans lequel est situé un espace public modifient son microclimat.

### Recommandations

Le confort thermique est une notion complexe qui dépend de plusieurs facteurs physiques, psychologiques, physiologiques et sociologiques. Parmi ces facteurs physiques, on trouve les paramètres microclimatiques de l'environnement urbain. Ces paramètres sont influencés par la morphologie des bâtiments, l'occupation du sol, les activités urbaines, la chaleur anthropique, etc. Dans la littérature, on trouve plusieurs approches et méthodes pour étudier le confort thermique. Le choix de la méthode appropriée est donc essentiel pour atteindre les objectifs de recherche et obtenir des résultats pertinents.

Le rayonnement solaire constitue un facteur essentiel dans l'étude du confort thermique extérieur, sa modification peut être un moyen efficace de créer un espace extérieur thermiquement confortable. Par conséquent, il est nécessaire de le prendre en compte lors de la conception de l'espace public extérieur. La hauteur, la densité du bâti et l'orientation sont des paramètres morphologiques qui participent à la modification du rayonnement solaire et le changement de l'environnement thermique. Il est donc important d'évaluer l'impact de ces paramètres morphologique sur le microclimat lors de la conception de l'espace public extérieur.

La recherche dans le domaine du confort thermique extérieur pourrait grandement bénéficier du développement d'une base de données normalisée consacré à ce sujet. Etant donné que la sensation de confort thermique diffère d'une région à une autre et d'une personne à l'autre en raison des différences personnelles, culturelles, sociales et d'autres facteurs individuels, il serait judicieux de mener des investigations expérimentales pour déterminer les valeurs neutres pour chaque région.

### Futurs axes de recherche

- La combinaison des outils de simulation numérique tels que Envimet, Rayman, etc., avec les outils SIG tels qu'UMEP, LCZ Generator, etc., permettra d'effectuer une étude multi-échelle du phénomène d'îlot de chaleur urbain et des phénomènes microclimatiques.
- Étude de l'impact combiné de la hauteur et de la densité du bâti.
- Étude de l'impact combiné de l'orientation de l'espace public et de la hauteur du bâti qui l'entoure.
- Cette étude a montré le rôle de la végétation dans la modification de l'impact de l'orientation sur le microclimat et le confort thermique de l'espace public. Par conséquent, l'étude de l'impact combiné de l'orientation de l'espace public et de la végétation constitue un axe de recherche intéressant.
- Comparaison de l'impact de la morphologie de l'espace sur le microclimat et le confort thermique pendant la période diurne et nocturne, ainsi que pendant la période estivale et hivernale.
- L'Algérie est un pays qui se caractérise par des zones climatiques distinctes. Il serait intéressant de mener des investigations expérimentales pour déterminer les valeurs neutres du confort thermique spécifiques à chaque région.
- L'impact des facteurs sociaux et comportementaux pourrait fournir une meilleure compréhension des exigences des personnes vis-à-vis de l'environnement thermique.

## Bibliographie

- Abaas, Z. R. (2020). Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.040>
- Abd Elraouf, R., Elmokadem, A., Megahed, N., Abo Eleinen, O., & Eltarabily, S. (2022). The impact of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot-humid climate. *Building and Environment*, 225, 109632. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109632>
- Adolphe, L. (2001). A Simplified Model of Urban Morphology : Application to an Analysis of the Environmental Performance of Cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 183-200. <https://doi.org/10.1068/b2631>
- Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z.-H., & Akbari, H. (2017). Urban heat island mitigation strategies : A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.003>
- Ahmed, K. S. (2003). Comfort in urban spaces : Defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, 35(1), 103-110. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00085-3)
- Albdour, M. S., & Baranyai, B. (2019). An overview of microclimate tools for predicting the thermal comfort, meteorological parameters and design strategies in outdoor spaces. *Pollack Periodica*, 14(2), 109-118. <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.10>
- Al-Hagla, K. (2008). *TOWARDS A SUSTAINABLE NEIGHBORHOOD: THE ROLE OF OPEN SPACES*. 2, 162-177.
- Alhamad, I. M., AlSaleem, M. H., & Taleb, H. (2018). Natural ventilation potential strategies in warm winter climate zones—A case study of Dubai. *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2018.8376788>
- Ali, S. M., Khan, B., Mokryani, G., Mehmood, C. A., Jawad, M., & Farid, U. (2019). Environment driven consumer EC model incorporating complexities of consumer body dynamics. *IET Energy Systems Integration*, 1(2), 53-64. <https://doi.org/10.1049/iet-esi.2018.0051>
- Ali-Toudert, F., Djenane, M., Bensalem, R., & Mayer, H. (2005). Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 28(3), 243-256.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>

- Al-Sudani, AH. (2018). *Analyzing the Influence of Urban Morphology on Thermal Microclimate in a Temperate Maritime Climate*. <https://doi.org/10.17638/03027452>
- Alves, F. M. B. (2003). *Avaliação da qualidade do espaço público urbano : Proposta metodológica*. Fundação Calouste Gulbenkian : Fundação para a Ciência e a Tecnologia.
- Amindeldar, S., Heidari, S., & Khalili, M. (2017). The effect of personal and microclimatic variables on outdoor thermal comfort : A field study in Tehran in cold season. *Sustainable Cities and Society*, 32, 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.024>
- ASHRAE, 2010. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- ANSI/ASHRAE 55 (2017). Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- AOUCHAL, H. (2013). *Pour une reconnaissance politique et sociale des valeurs des abords du patrimoine bâti en Algérie. La basilique St-Augustin et ses abords à Annaba. - [UNIVERSITE DE CONSTANTINE 3]*. [https://www.memoireonline.com/05/14/8885/m\\_Pour-une-reconnaissance-politique-et-sociale-des-valeurs-des-abords-du-patrimoine-bti-en-Algerie104.html](https://www.memoireonline.com/05/14/8885/m_Pour-une-reconnaissance-politique-et-sociale-des-valeurs-des-abords-du-patrimoine-bti-en-Algerie104.html)
- Arakawa Martins, L., Soebarto, V., & Williamson, T. (2022). A systematic review of personal thermal comfort models. *Building and Environment*, 207, 108502. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108502>
- Athamena, K. (2012). *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers [Phdthesis, Ecole Centrale de Nantes (ECN)]*. <https://theses.hal.science/tel-00811583>
- Aymonino, C. (1977). *Lo studio dei fenomeni urbani*. Officina Edizioni. [https://books.google.dz/books?id=5u\\_lwAEACAAJ](https://books.google.dz/books?id=5u_lwAEACAAJ)
- BACON, E. (1965). *Design of cities, Princeton, Princeton university Press*.
- Baghaei Daemei, A., Khotbehsara, E. M., Nobarani, E. M., & Bahrami, P. (2019). Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular-shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coefficient. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(3), 541-548. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.008>
- Bailey, W. G., Oke, T. R., & Rouse, W. R. (Éds.). (1997). *The surface climates of Canada*. McGill-Queen's University Press.
- Baker, H. D. (2009). A waste of space? Unbuilt land in the Babylonian cities of the first millennium BC. *Iraq*, 71, 89-98. <https://doi.org/10.1017/S0021088900000759>
- Barradas, V. L. (1991). Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology*, 35(1), 24-28. <https://doi.org/10.1007/BF01040959>

- Batty, M. (2008). The Size, Scale, and Shape of Cities. *Science*, 319(5864), 769-771. <https://doi.org/10.1126/science.1151419>
- Bensaâd Redjel, N., & Labii, B. (2019). *Annaba : Formes Urbaines Et Architecturales Héritées De La Colonisation Française*. 51, 439-452.
- Berdahl, P., & Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*, 25(2), 149-158. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01004-3)
- Berkovic, S., Yezioro, A., & Bitan, A. (2012). Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate. *Solar Energy*, 86(5), 1173-1186. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.010>
- Bherwani, H., Singh, A., & Kumar, R. (2020). Assessment methods of urban microclimate and its parameters : A critical review to take the research from lab to land. *Urban Climate*, 34, 100690. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100690>
- Binarti, F., Koerniawan, M. D., Triyadi, S., Utami, S. S., & Matzarakis, A. (2020). A review of outdoor thermal comfort indices and neutral ranges for hot-humid regions. *Urban Climate*, 31, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100531>
- BOUSSOUALIM, A. (2002). *Contribution à la caractérisation de l'impact et de l "incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espaces public extérieu* [Thèse de Doctorat]. École Polytechnique de Nantes.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bröde, P., Krüger, E., & Fiala, D. (2013). UTCI : Validation and practical application to the assessment of urban outdoor thermal comfort. *Geographia Polonica*, 86(1), 11-20. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.2>
- Carmona, M. (2010a). Contemporary Public Space : Critique and Classification, Part One: Critique. *Journal of Urban Design*, 15(1), 123-148. <https://doi.org/10.1080/13574800903435651>
- Carmona, M. (2010b). Contemporary Public Space, Part Two : Classification. *Journal of Urban Design*, 15(2), 157-173. <https://doi.org/10.1080/13574801003638111>
- Carmona, M. (Éd.). (2010c). *Public places - urban spaces : The dimensions of urban design* (2nd ed). Architectural Press.
- Carr, S. (Éd.). (1992). *Public space*. Cambridge University Press.
- Castro, K. B. de, Roig, H. L., Neumann, M. R. B., Rossi, M. S., Seraphim, A. P. A. C. C., Réquia, W. J., Costa, A. B. B. da, & Höfer, R. (2019). New perspectives in land use mapping based on urban morphology : A case study of the Federal District, Brazil. *Land Use Policy*, 87, 104032. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104032>

- Chandler, T. J., & Gregory, S. (1976). *The Climate of the British Isles. London ; New York : Longman*, 307-329.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.019>
- Chen, H., Ooka, R., Harayama, K., Kato, S., & Li, X. (2004). Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction. *Energy and Buildings*, 36(12), 1247-1258. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.07.003>
- Chen, L., & Ng, E. (2012). Outdoor thermal comfort and outdoor activities : A review of research in the past decade. *Cities*, 29(2), 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>
- Chen, R. (2018). Application of CFD in building performance simulation for airflow analysis and architectural design : A case study. *2018 International Conference on Cloud Computing, Big Data and Blockchain (ICCB)*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICCB.2018.8756454>
- Chen, Y., Wang, Y., & Zhou, D. (2021). Knowledge Map of Urban Morphology and Thermal Comfort : A Bibliometric Analysis Based on CiteSpace. *Buildings*, 11(10), 427. <https://doi.org/10.3390/buildings11100427>
- 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(1), 43-56. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0396-z>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>
- Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2013). Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*, 37, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.001>
- Colombert, M. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville* [THÈSE doctorat]. Paris-Est.
- Colquhoun, A. (1991). *Modernity and the classical tradition : Architectural essays 1980 - 1987* (1. paperback ed). MIT Press.
- Cortês, J., Alves, F. B., & Corvacho, H. (2013, septembre 17). *URBAN SUSTAINABILITY AND PUBLIC SPACE A BIOCLIMATIC APPROACH*. 39th IAHS Congress on Housing Science, Milan.
- CULLEN, G. (1961). *Townscape*, Architectural press.

- Dahech, S., & Saihia, A. (2019). Pollution atmosphérique et brise de mer à Annaba (Nord-Est de l'Algérie): Cas de l'ozone et du dioxyde de soufre. *Climatologie*, *16*, 1-22. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1367>
- Davies, M., Steadman, P., & Oreszczyn, T. (2008). Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use. *Energy Policy*, *36*(12), 4548-4551. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.013>
- de Dear, R. (2011). Revisiting an old hypothesis of human thermal perception : Alliesthesia. *Building Research & Information*, *39*(2), 108-117. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.552269>
- de Dear, R., Xiong, J., Kim, J., & Cao, B. (2020). A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy and Buildings*, *214*, 109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>
- Dissanayake, C., & Weerasinghe, U. G. D. (2021). Urban Microclimate and Outdoor Thermal Comfort of Public Spaces in Warm-Humid Cities : A Comparative Bibliometric Mapping of the Literature. *American Journal of Climate Change*, *10*(04), 433-466. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2021.104023>
- Dissanayake, C., Weerasinghe, U. G. D., & Dharmasena, J. (2021). *Assessment of Thermal Comfort and Microclimate in Urban Street Canyons – A Review of Recent Research*. 77-95. <https://doi.org/10.22492/issn.2432-8642.2021.6>
- Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(9), 2626-2640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.040>
- Dzyuban, Y., Ching, G. N. Y., Yik, S. K., Tan, A. J., Banerjee, S., Crank, P. J., & Chow, W. T. L. (2022). Outdoor thermal comfort research in transient conditions : A narrative literature review. *Landscape and Urban Planning*, *226*, 104496. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104496>
- Elnabawi, M. H., & Hamza, N. (2019). Behavioural Perspectives of Outdoor Thermal Comfort in Urban Areas : A Critical Review. *Atmosphere*, *11*(1), 51. <https://doi.org/10.3390/atmos11010051>
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2012). *Urban Microclimate* (0 éd.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775397>
- FAHED, J. (2018). *Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des ICU sous climat méditerranéens* [Thèse de Doctorat]. UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.
- Fanger, P. O. (1972). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill.
- Fathi, S., Sajadzadeh, H., Mohammadi Sheshkal, F., Aram, F., Pinter, G., Felde, I., & Mosavi, A. (2020). The Role of Urban Morphology Design on Enhancing Physical Activity and Public

- Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2359. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072359>
- Fouad, A. O. (2007). *Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : Étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec*. Université Laval. <https://books.google.dz/books?id=AhCjPgAACAAJ>
- Gagge, A. P. (1936). THE LINEARITY CRITERION AS APPLIED TO PARTITIONAL CALORIMETRY. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 116(3), 656-668. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1936.116.3.656>
- Gauthier, P., & Gilliland, J. (2005). *Mapping Urban Morphology : A Classification Scheme for Interpreting contributions to the study of urban form*. 41-50.
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2007). Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, 42(10), 3669-3684. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.09.011>
- Givoni, B. (1963). *Estimation of the effect of climate on man; development of a new thermal index*. Hebrew University.
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77-86. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)
- Golicnik, B. (2005). *A Configuration of Physical Form and the Dynamic Patterns of Spatial Occupancy in Urban Open Public Space*. Heriot-Watt University.
- Grifoni, R. C., Passerini, G., & Pierantozzi, M. (2013). *Assessment of outdoor thermal comfort and its relation to urban geometry*. 3-14. <https://doi.org/10.2495/SDP130011>
- Hadjoannou, L. (1987). *Three years of operation of the radiation centre in Nicosia, Cyprus*. 15.
- Hafner, J., & Kidder, S. Q. (1999). Urban Heat Island Modeling in Conjunction with Satellite-Derived Surface/Soil Parameters. *Journal of Applied Meteorology*, 38(4), 448-465. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<0448:UHIMIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<0448:UHIMIC>2.0.CO;2)
- Hamdan, D. M. A., & de Oliveira, F. L. (2019). The impact of urban design elements on microclimate in hot arid climatic conditions : Al Ain City, UAE. *Energy and Buildings*, 200, 86-103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.028>
- Han, L., Long, Z., & Wang, L. (s. d.). *Open space and urban morphology*.
- Hegazy, I. R., & Qurnfulah, E. M. (2020). Thermal comfort of urban spaces using simulation tools exploring street orientation influence of on the outdoor thermal comfort : A case study of Jeddah, Saudi Arabia. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(4), 594-606. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa028>

- Hensen, J. J. (1991). *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system*. <https://doi.org/10.6100/IR353263>
- Hertzberger, H., & Rike, I. (2009). *Lessons for students in architecture* (6th rev. ed). 010 Publishers.
- Hillier, B. (2007). Space is the machine : A configurational theory of architecture. In *Space Syntax : London, UK. (2007)*. Space Syntax. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/3881/>
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34(6), 661-665. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8)
- Hsu, B. (1993). *urban Square as a Theatre : Issues of continuity and discontinuity in urban design* [MASTER OF SCIENCE IN ARCHITECTURE STUDIES, National Cheng-Kung University]. <http://hdl.handle.net/1721.1/67417>
- Hu, Y., Peng, Y., Gao, Z., & Xu, F. (2023). Application of CFD plug-ins integrated into urban and building design platforms for performance simulations : A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 12(1), 148-174. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.06.005>
- Hussein ELNABAWI, M., Hamza, N., & Dudek, S. (2013, août 28). *Use And Evaluation Of The Envi-met Model For Two Different Urban Forms In Cairo, Egypt : Measurements And Model Simulations*. 2017 Building Simulation Conference. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1237>
- Jänicke, B., Milošević, D., & Manavvi, S. (2021). Review of User-Friendly Models to Improve the Urban Micro-Climate. *Atmosphere*, 12(10), 1291. <https://doi.org/10.3390/atmos12101291>
- Johnson, G. T., & Watson, I. D. (1984). The Determination of View-Factors in Urban Canyons. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 329-335. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0329:TDOVFI>2.0.CO;2)
- Kamal, A., Abidi, S. M. H., Mahfouz, A., Kadam, S., Rahman, A., Hassan, I. G., & Wang, L. L. (2021). Impact of urban morphology on urban microclimate and building energy loads. *Energy and Buildings*, 253, 111499. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111499>
- Kebir, B., & Zeghiche, A. (2014). Le renouvellement de la ville algérienne par la démolition-reconstruction du vieux bâti. De la sanction à la recherche de légitimité, Cas de la ville d'Annaba. *Cybergeogeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.26597>
- Krier, L. (2006). *Classicus and Vernaculus*. 8, 25-30.
- Krüger, E. L., Minella, F. O., & Rasia, F. (2011). Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. *Building and Environment*, 46(3), 621-634. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.006>
- Kumar, P., & Sharma, A. (2020). Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort –A review. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102297. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102297>

- Kwok, A. G., & Rajkovich, N. B. (2010). Addressing climate change in comfort standards. *Building and Environment*, 45(1), 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.005>
- Lai, D., Lian, Z., Liu, W., Guo, C., Liu, W., Liu, K., & Chen, Q. (2020). A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces. *Science of The Total Environment*, 742, 140092. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140092>
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019). A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of The Total Environment*, 661, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Lam, C. K. C., Lee, H., Yang, S.-R., & Park, S. (2021). A review on the significance and perspective of the numerical simulations of outdoor thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102971. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102971>
- Larkham Peter J, & Jones, A. N. (Éds.). (1991). *A Glossary of urban form*. Urban Morphology Research Group, School of Geography, University of Birmingham.
- Lee, H., Mayer, H., & Chen, L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>
- Lee, H., Mayer, H., & Kuttler, W. (2020). Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban street canyons under Central European conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48, 126558. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126558>
- Lenzholzer, S., & Brown, R. D. (2016). Post-positivist microclimatic urban design research : A review. *Landscape and Urban Planning*, 153, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.05.008>
- Levy, A. (2005). Formes urbaines et significations : Revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, 122(3), 25-48. <https://doi.org/10.3917/esp.122.0025>
- Li, J., Mao, Y., Ouyang, J., & Zheng, S. (2022). A Review of Urban Microclimate Research Based on CiteSpace and VOSviewer Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(8), 4741. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084741>
- Lin, P., Gou, Z., Lau, S., & Qin, H. (2017). The Impact of Urban Design Descriptors on Outdoor Thermal Environment: A Literature Review. *Energies*, 10(12), 2151. <https://doi.org/10.3390/en10122151>
- Lin, Z., & Deng, S. (2008). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*, 43(1), 70-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.026>
- Lindberg, F., Holmer, 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*, 52(7), 697-713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>

- Lopes, H. S., Remoaldo, P. C., Ribeiro, V., & Martín-Vide, J. (2022). A comprehensive methodology for assessing outdoor thermal comfort in touristic city of Porto (Portugal). *Urban Climate*, 45, 101264. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101264>
- Mahmoud, H., & Ghanem, H. (2019). URBAN GEOMETRY MITIGATION GUIDELINES TO IMPROVE OUTDOOR THERMAL PERFORMANCE IN EGYPTIAN HOT ARID NEW CITIES. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 47(2), 172-193. <https://doi.org/10.21608/jesaun.2019.115119>
- Majid, N. H. A. (2004). *Thermal Comfort of Urban Spaces in the Hot Humid Climate*.
- Maleki, A., Kiesel, K., Vuckovic, M., & Mahdavi, A. (2014). Empirical and Computational Issues of Microclimate Simulation. In Linawati, M. S. Mahendra, E. J. Neuhold, A. M. Tjoa, & I. You (Éds.), *Information and Communication Technology* (Vol. 8407, p. 78-85). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-55032-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-55032-4_8)
- Mansi, S. A., Pigliautile, I., Arnesano, M., & Pisello, A. L. (2022). A novel methodology for human thermal comfort decoding via physiological signals measurement and analysis. *Building and Environment*, 222, 109385. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109385>
- Martin-Vide, J., & Moreno-Garcia, M. C. (2020). Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). *Atmospheric Research*, 240, 104877. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., & Pirani, A. (2021). *Climate change 2021 : The physical science basis : summary for policymakers : working group I contribution to the sixth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index : Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Mayer, H., & Hoppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43-49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- MEBIROUK, H. (2005). *La fragmentation socio spatiale à Annaba, un paradigme de crise urbaine*. Colloque international, Les villes au défi du développement durable, Sfax, Tunisie. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03834350>
- Mehare, N. P., & Joshi, M. (2022). An Urban Built Form and its Microclimate on Urban Heat Island—A Review. *Ecology, Environment and Conservation*, 922-927. <https://doi.org/10.53550/EEC.2022.v28i02.053>
- Mirzaei, P. A. (2015). Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustainable Cities and Society*, 19, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>
- Mishra, A. K., & Ramgopal, M. (2013). Field studies on human thermal comfort—An overview. *Building and Environment*, 64, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.015>

- Molnár, G., Gyöngyösi, A. Z., & Gál, T. (2019). Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1-2), 1139-1158. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02881-1>
- Morganti, M., Salvati, A., Coch, H., & Cecere, C. (2017). Urban morphology indicators for solar energy analysis. *Energy Procedia*, 134, 807-814. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.533>
- Moudon, A. V. (2022). Urban Morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology*, 1(1), 3-10. <https://doi.org/10.51347/jum.v1i1.3860>
- Murat, Z. M. (2013). Designing Urban Squares. In M. Ozyavuz (Éd.), *Advances in Landscape Architecture*. InTech. <https://doi.org/10.5772/55826>
- Nagano, K., & Horikoshi, T. (2011). New index indicating the universal and separate effects on human comfort under outdoor and non-uniform thermal conditions. *Energy and Buildings*, 43(7), 1694-1701. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.012>
- Nikolopoulou, M. (2004). *Designing open spaces in the urban environment : A bioclimatic approach*. Centre for Renewable Energy Sources (CRES).
- Nikolopoulou, M. (2011). Outdoor thermal comfort. *Frontiers in Bioscience*, S3(1), 1552. <https://doi.org/10.2741/245>
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces : Understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227-235. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)
- Nikolopoulou, M., & Lykoudis, S. (2006a). Thermal comfort in outdoor urban spaces : Analysis across different European countries. *Building and Environment*, 41(11), 1455-1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>
- Nikolopoulou, M., & Lykoudis, S. (2006b). Thermal comfort in outdoor urban spaces : Analysis across different European countries. *Building and Environment*, 41(11), 1455-1470. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95-101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Oke, T. R. (1974). *Review of urban climatology 1968-1973*. Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4), 268-277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237-254. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>

- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1-3), 103-113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Oke, T. R. (2006). *Boundary layer climates* (2nd ed). Routledge.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates* (1<sup>re</sup> éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Ornstein, S. W. (2006). O chão da cidade : Guia de avaliação do design de espaço público. *Pós. Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP*, 0(19), 250. <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v0i19p250-254>
- Palme, M., & Salvati, A. (Éds.). (2021). *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4>
- Pont, M. B., & Haupt, P. (2005). *The Spacemate : Density and the Typomorphology of the Urban Fabric*. 4, 55-68.
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates : A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 631-632, 390-406. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- Ragheb, A. A., El-Darwish, I. I., & Ahmed, S. (2016). Microclimate and human comfort considerations in planning a historic urban quarter. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.003>
- Rehman, N. U., & Uzair, M. (2017). The proper interpretation of analytical sky view factors for isotropic diffuse solar irradiance on tilted planes. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(5), 053702. <https://doi.org/10.1063/1.4993069>
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>
- Sadeghi, A. R., & Bahadori, Y. (2021). Urban Sustainability and Climate Issues : The Effect of Physical Parameters of Streetscape on the Thermal Comfort in Urban Public Spaces; Case Study: Karimkhan-e-Zand Street, Shiraz, Iran. *Sustainability*, 13(19), 10886. <https://doi.org/10.3390/su131910886>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy. *Building and Environment*, 96, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.023>
- Salmanian, M., & Khosravi, H. (2022). Effect of Urban Morphology on Micro Climatic Comfort of Public Open Spaces Using Genetic Algorithm : A Case Study on Tehran. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4100351>
- Scheer, B. C. (2015). The epistemology of urban morphology. *Urban Morphology*, 20(1), 5-17. <https://doi.org/10.51347/jum.v20i1.4052>

- Shafaghat, A., Manteghi, G., Keyvanfar, A., Bin Lamit, H., Saito, K., & Ossen, D. R. (2016). Street Geometry Factors Influence Urban Microclimate in Tropical Coastal Cities : A Review. *Environmental and Climate Technologies*, 17(1), 61-75. <https://doi.org/10.1515/rtuct-2016-0006>
- Sharifi, E., & Boland, J. (2020). Passive activity observation (PAO) method to estimate outdoor thermal adaptation in public space : Case studies in Australian cities. *International Journal of Biometeorology*, 64(2), 231-242. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1570-y>
- Sharmin, T., & Steemers, K. (2019, avril 10). *Impact of urban geometry on indoor air temperature and cooling energy consumption in traditional and formal urban environments*.
- Shashua-Bar, L., Tsiros, I. X., & Hoffman, M. (2012). Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment*, 57, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.019>
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- Sima, Y., & Zhang, D. (2009). *Comparative Precedents on the Study of Urban Morphology*. Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium.
- Simon, H., Lindén, J., Hoffmann, D., Braun, P., Bruse, M., & Esper, J. (2018). Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. *Landscape and Urban Planning*, 174, 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.003>
- Sitte, C., Wiczorek, D., & Choay, F. (1996). *L'art de bâtir les villes : L'urbanisme selon ses fondements artistiques*. Éd. du Seuil.
- Spagnolo, J., & de Dear, R. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 38(5), 721-738. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3)
- Stähle, A. (2008). *Compact sprawl : Exploring public open space and contradictions in urban density*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-9193>
- Stanley, B. W., Stark, B. L., Johnston, K. L., & Smith, M. E. (2012). Urban Open Spaces in Historical Perspective : A Transdisciplinary Typology and Analysis. *Urban Geography*, 33(8), 1089-1117. <https://doi.org/10.2747/0272-3638.33.8.1089>
- Stolwijk, J. A. J., & Hardy, J. D. (1977). Control of Body Temperature. In R. Terjung (Éd.), *Comprehensive Physiology* (1<sup>re</sup> éd., p. 45-68). Wiley. <https://doi.org/10.1002/cphy.cp090104>
- Sun, X. (2013). *Comparative Analysis of Urban Morphology : Evaluating Space Syntax and Traditional Morphological Methods*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hig:diva-15492>

- Svensson, M. K., Thorsson, S., & Lindqvist, S. (2003). A geographical information system model for creating bioclimatic maps – examples from a high, mid-latitude city. *International Journal of Biometeorology*, 47(2), 102-112. <https://doi.org/10.1007/s00484-002-0150-2>
- Swaid, H., & Hoffman, M. E. (1990). Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model. *Energy and Buildings*, 14(4), 313-324. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90094-Y](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90094-Y)
- TEBBANI, H. (2006). *Impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique des espaces urbains publics « cas du cours de la révolution »* [Pour l'obtention du diplôme de magister]. Université Mentouri.
- Thorsson, S., Honjo, T., Lindberg, F., Eliasson, I., & Lim, E.-M. (2007). Thermal Comfort and Outdoor Activity in Japanese Urban Public Places. *Environment and Behavior*, 39(5), 660-684. <https://doi.org/10.1177/0013916506294937>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613-1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Tseliou, A., Tsiros, I. X., Lykoudis, S., & Nikolopoulou, M. (2010). An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions. *Building and Environment*, 45(5), 1346-1352. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.009>
- Tseliou, A., Tsiros, I. X., Nikolopoulou, M., & Papadopoulos, G. (2016). Outdoor thermal sensation in a Mediterranean climate (Athens): The effect of selected microclimatic parameters. *Architectural Science Review*, 59(3), 190-202. <https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1028022>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, K., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2020). Urban Warming and Cities' Microclimates : Investigation Methods and Mitigation Strategies—A Review. *Energies*, 13(6), 1414. <https://doi.org/10.3390/en13061414>
- Tumini, I., Higuera García, E., & Baereswyl Rada, S. (2016). Urban microclimate and thermal comfort modelling : Strategies for urban renovation. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7(1), 22-37. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2016.1152204>
- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1/2/3), 59. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021817>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Watson, I. D., & Johnson, G. T. (1987). Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology*, 7(2), 193-197. <https://doi.org/10.1002/joc.3370070210>

- Wei, R., Song, D., Wong, N. H., & Martin, M. (2016). Impact of Urban Morphology Parameters on Microclimate. *Procedia Engineering*, 169, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.017>
- Whitehand, J. W. R. (2007). *CONZENIAN URBAN MORPHOLOGY AND URBAN LANDSCAPES*. Proceedings, 6th International Space Syntax Symposium, İstanbul.
- Wilson, E., Nicol, F., Nanayakkara, L., & Ueberjahn-Tritta, A. (2008). Public Urban Open Space and Human Thermal Comfort : The Implications of Alternative Climate Change and Socio-economic Scenarios. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 10(1), 31-45. <https://doi.org/10.1080/15239080701652615>
- Xu, J. (2019). From walking buffers to active places : An activity-based approach to measure human-scale urban form. *Landscape and Urban Planning*, 191, 103452. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.008>
- Xu, N., Wang, J., & Wang, W. (2019). Revealing Urban Public Space Patterns through Quantitative Comparison between the Old City of Nanjing and Zurich. *Sustainability*, 11(13), 3687. <https://doi.org/10.3390/su11133687>
- Yin, J., Zheng, Y., Wu, R., Tan, J., Ye, D., & Wang, W. (2012). An analysis of influential factors on outdoor thermal comfort in summer. *International Journal of Biometeorology*, 56(5), 941-948. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0503-9>
- Zacharias, J., Stathopoulos, T., & Wu, H. (2001). Microclimate and Downtown Open Space Activity. *Environment and Behavior*, 33(2), 296-315. <https://doi.org/10.1177/0013916501332008>
- Zambrano, L., Malafaia, C., & Bastos, L. E. G. (2006, septembre 6). *Thermal comfort evaluation in outdoor space of tropical humid climate*. The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland.
- Zeka, B. (2011). *The humanistic meaning of urban squares : The case of çayyolu urban square project* [MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY]. <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12612950/index.pdf>
- Zennir, R., Derradji, S. E., Guessoum, D. E., Djakjak, A., & Lekoui, A. (2020). Identification of the phenomenon of urban sprawl in the bipolar space of the municipalities of Annaba and El Bouni (Algerian North-East) by the relationship between landforms and land use. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 28(4), Art. 4.
- Zhou, Y., An, N., & Yao, J. (2022). Characteristics, Progress and Trends of Urban Microclimate Research : A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. *Buildings*, 12(7), 877. <https://doi.org/10.3390/buildings12070877>

## **Bibliographie**

# ANNEXES

# ANNEXE 01

COMPARAISON ENTRE LES ESPACES « SANS VEGETATION »

### Vitesse de l'air

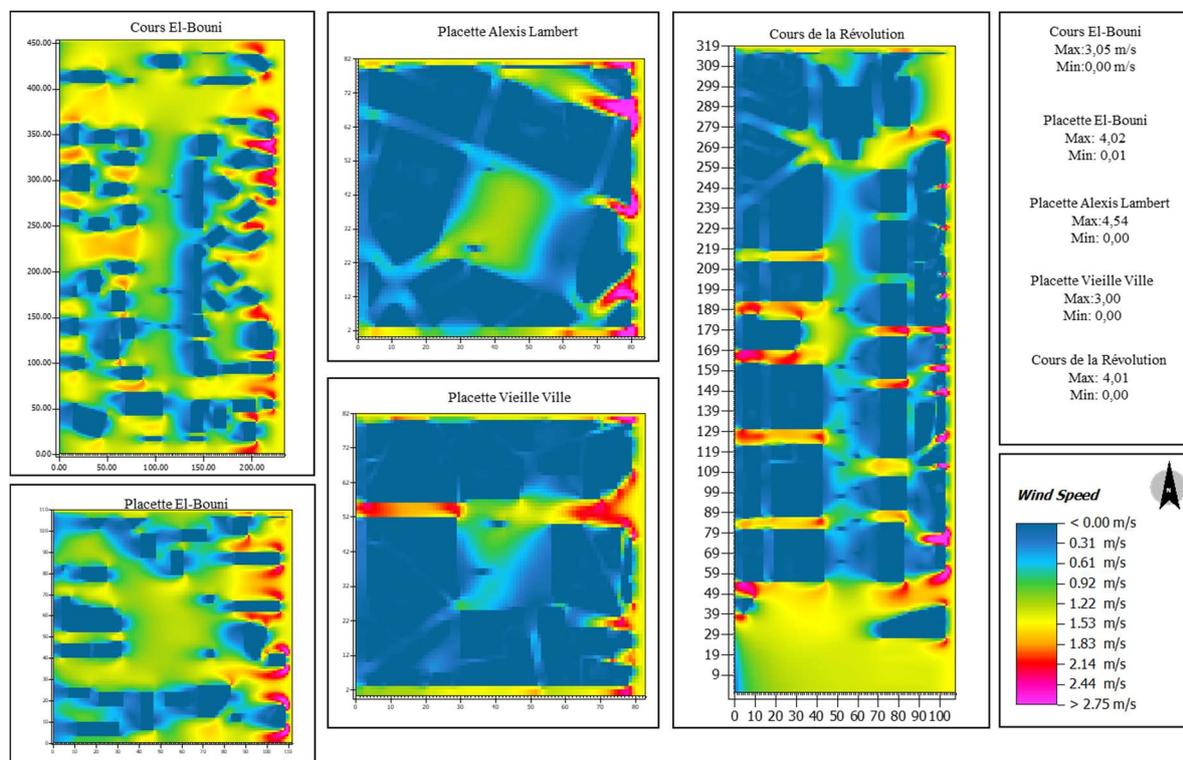


Figure 1 : Carte de la vitesse de l'air pour les cinq placettes sans végétation

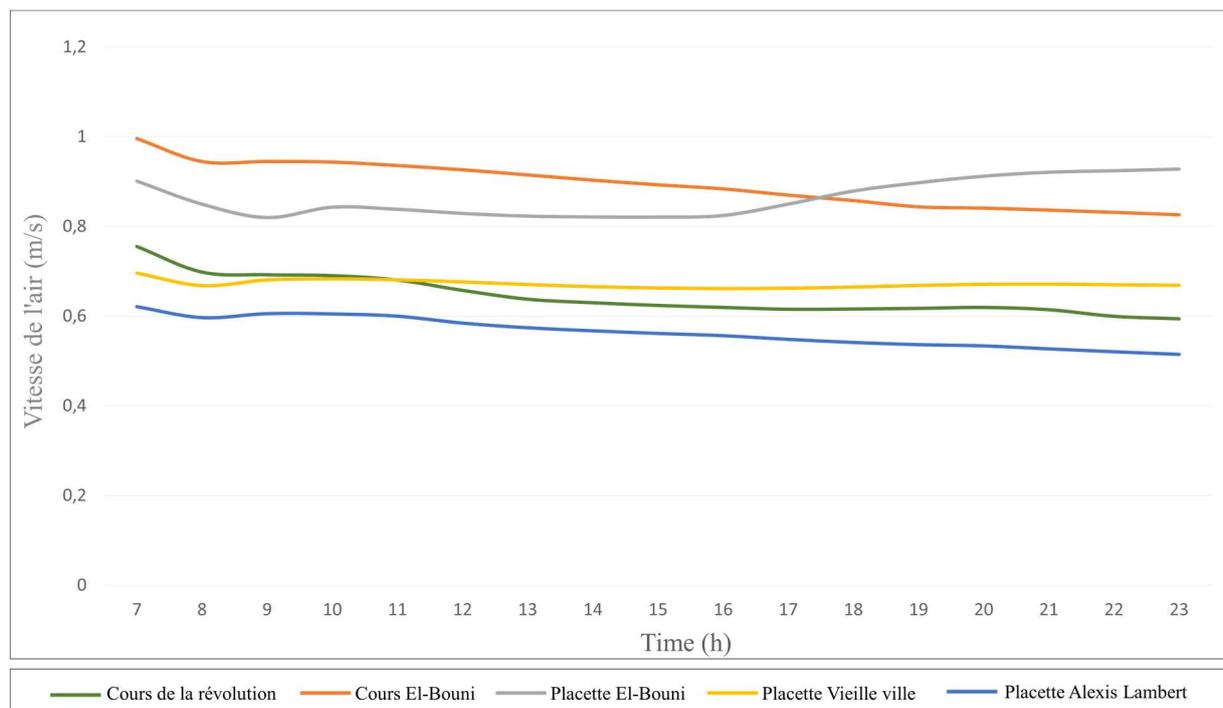


Figure 2 : Graphe représentant la variation de la vitesse de l'air pour les cinq placettes sans végétation

### Température de l'air

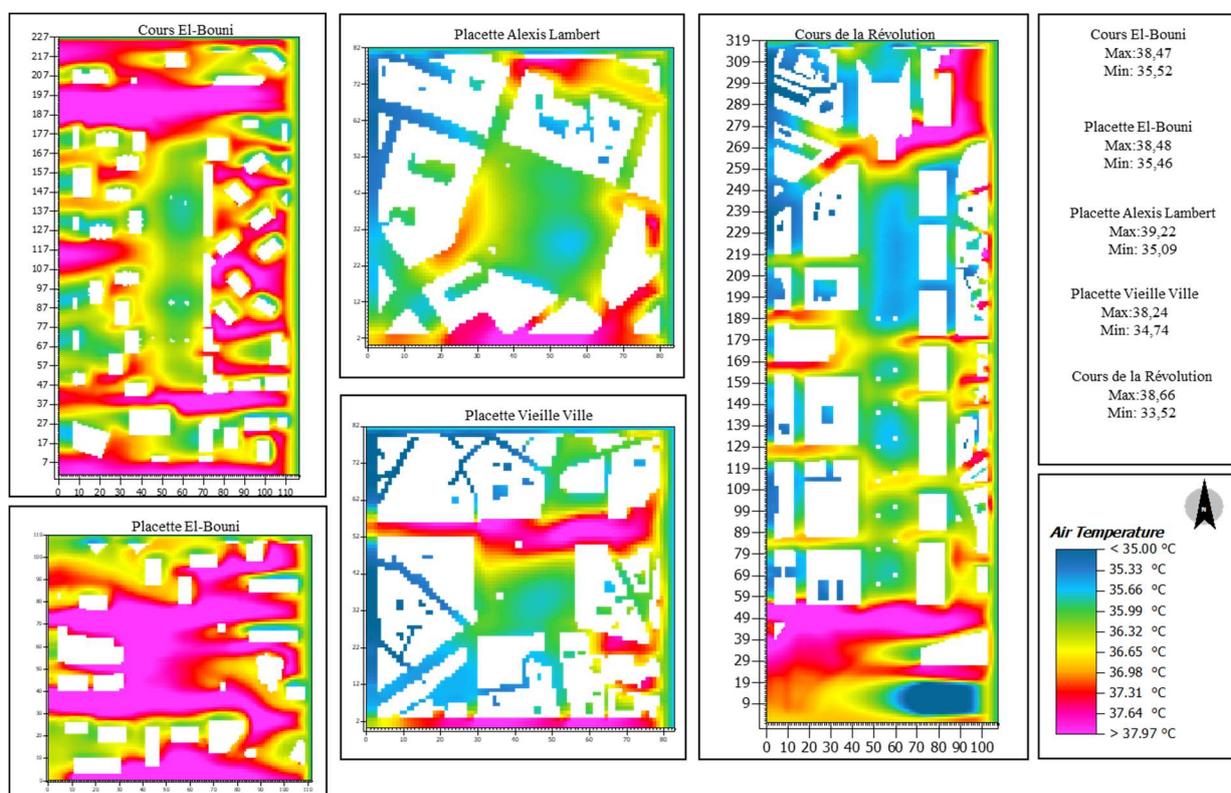


Figure 3 : Carte de la température de l'air pour les cinq placettes sans végétation

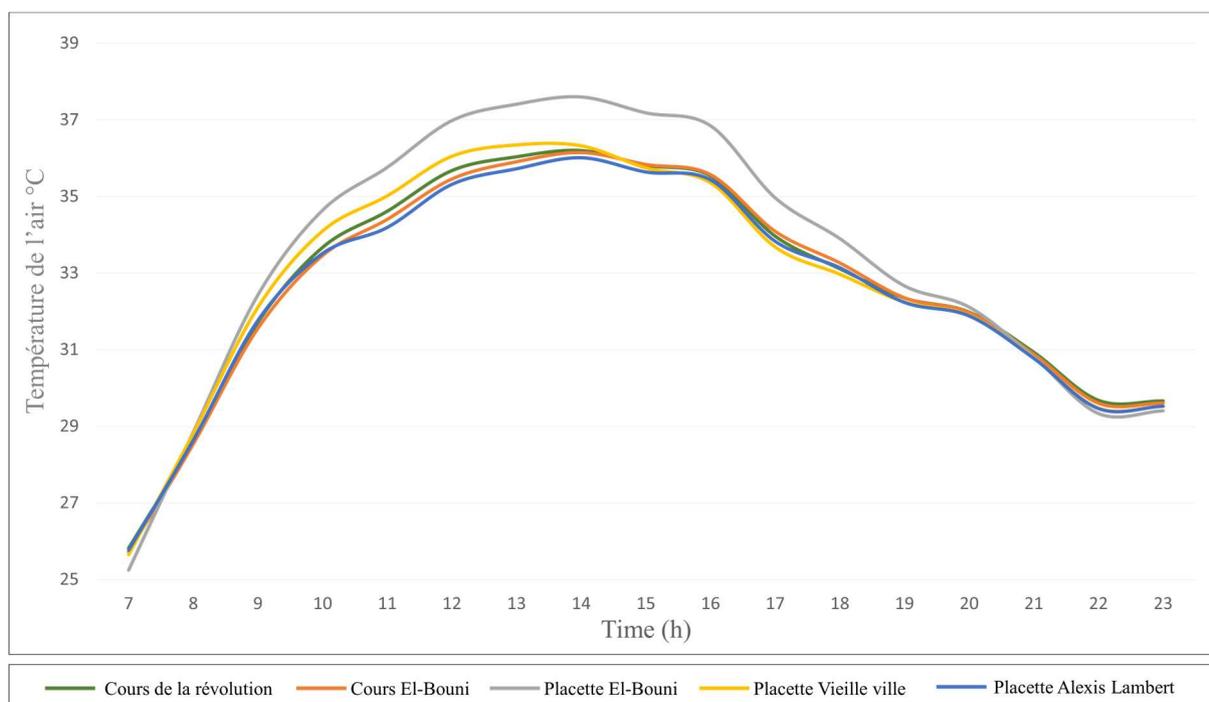


Figure 4 : Graphe représentant la variation de la température de l'air pour les cinq placettes sans végétation

### Humidité relative

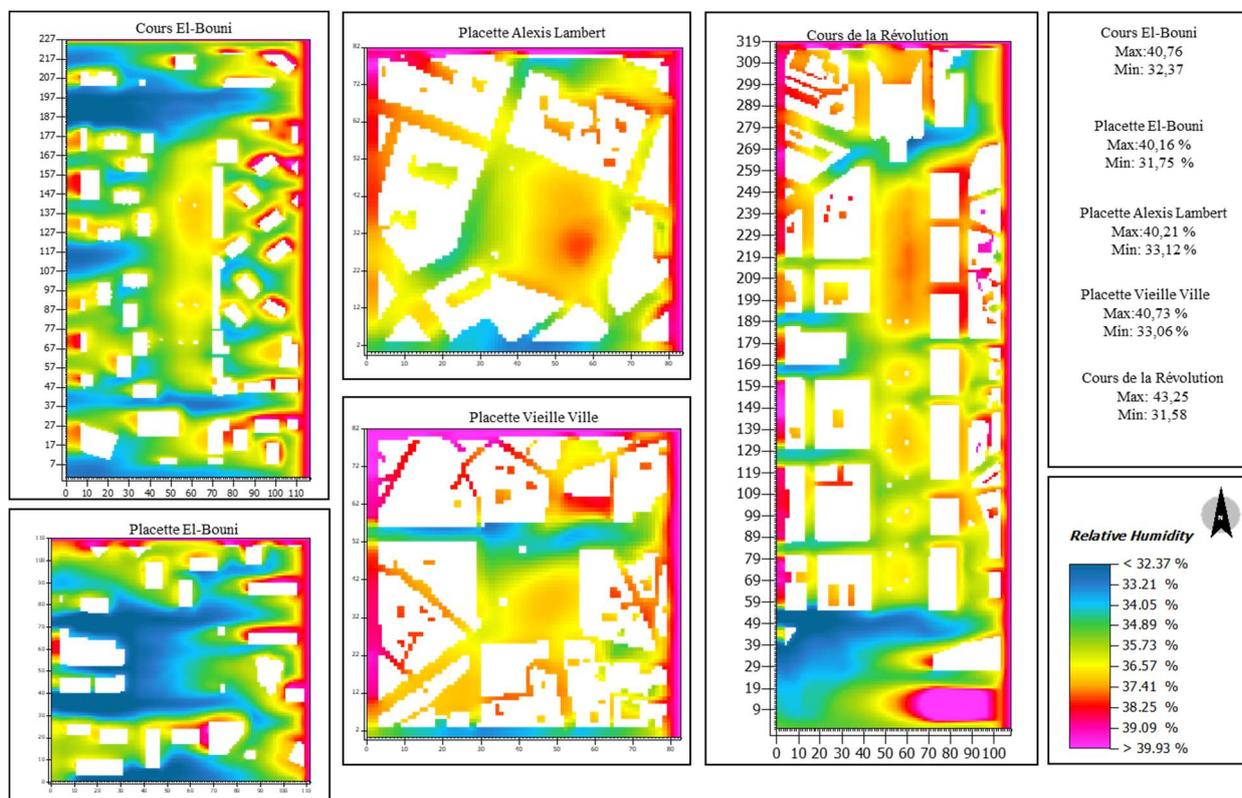


Figure 5 : Carte de l'humidité relative pour les cinq placettes sans végétation

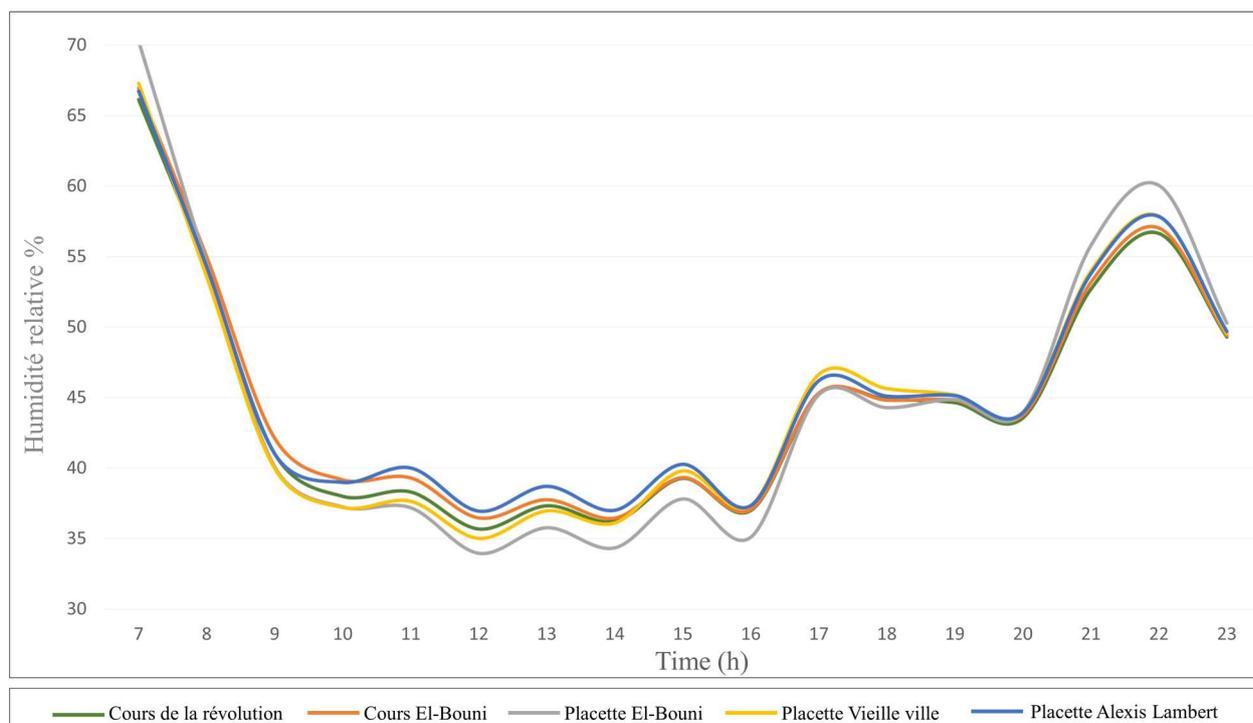


Figure 6 : Graphe représentant la variation de l'humidité relative pour les cinq placettes sans végétation

### Température moyenne radiante

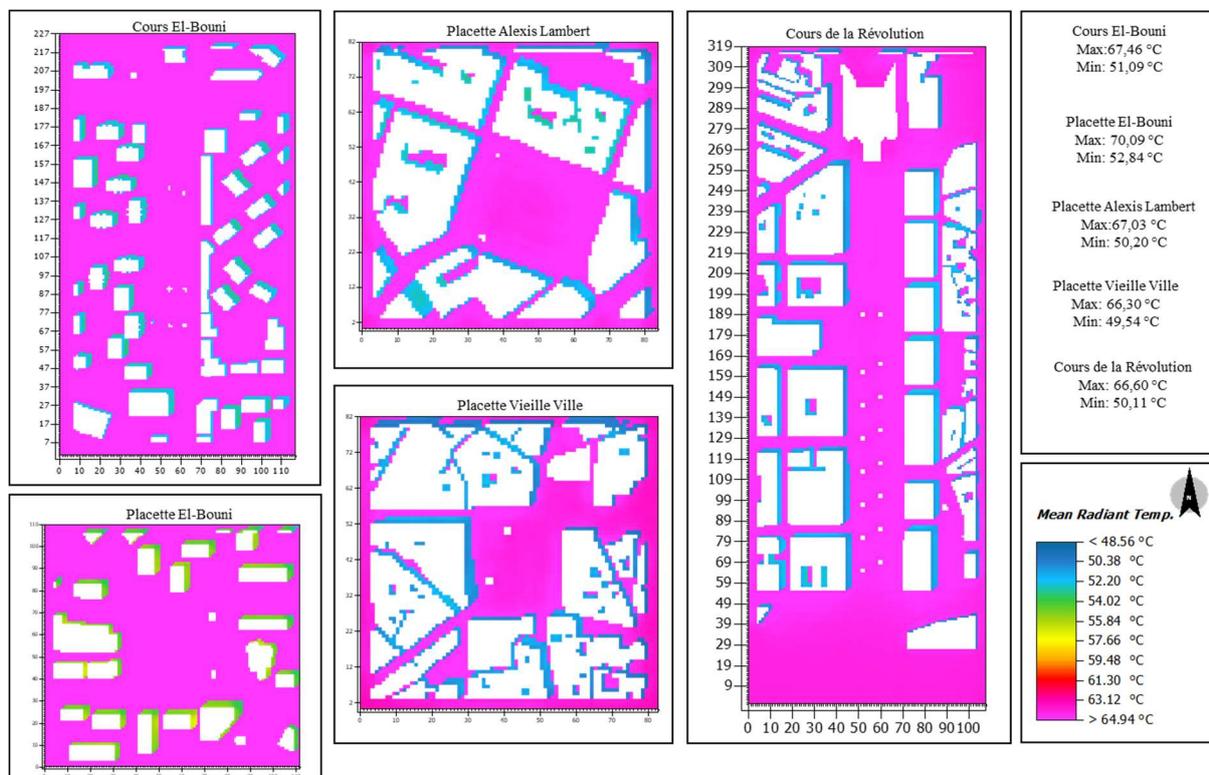


Figure 7 : Carte de la température moyenne radiante pour les cinq placettes sans végétation

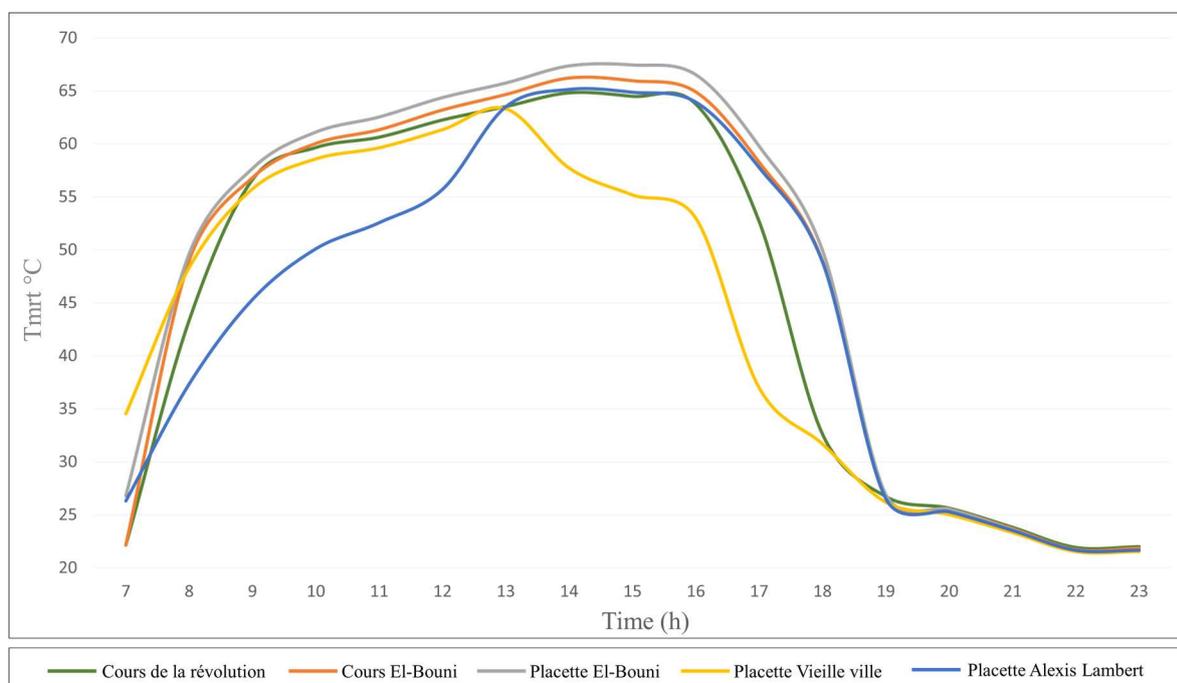


Figure 8 : Graphe représentant la variation de la température moyenne radiante pour les cinq placettes sans végétation

PET

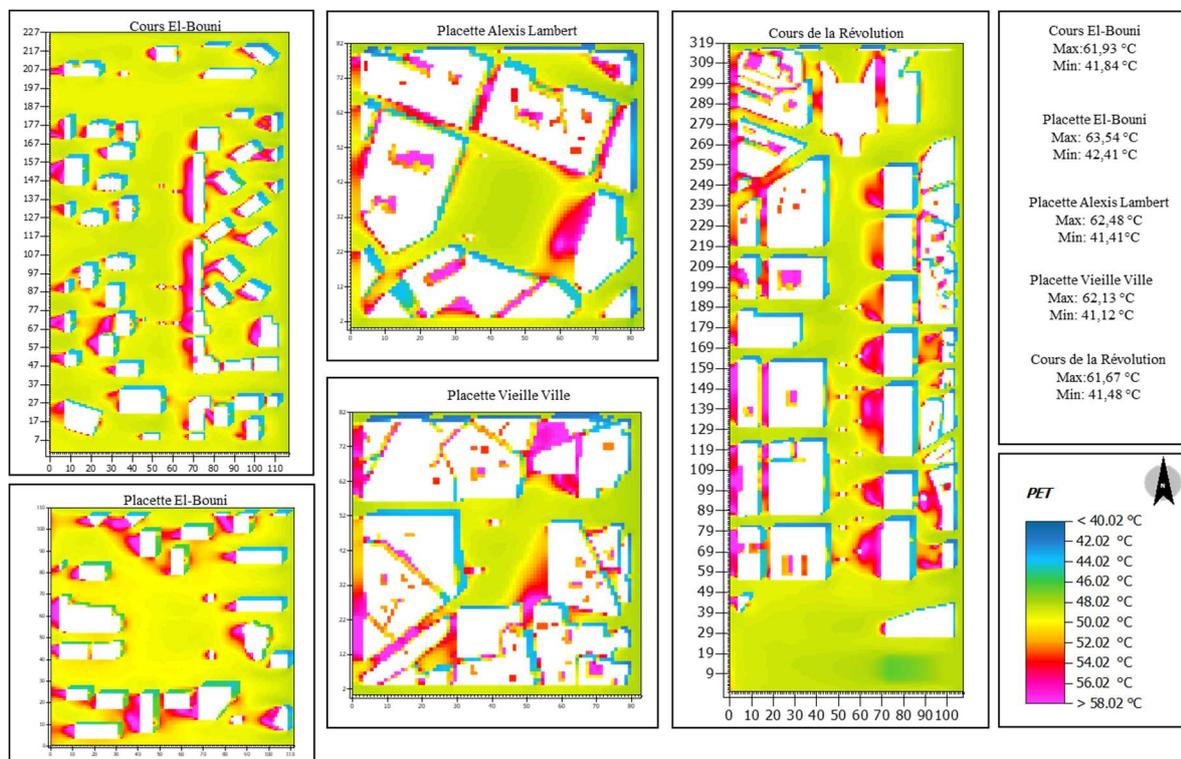


Figure 9 : Carte du PET pour les cinq placettes sans végétation

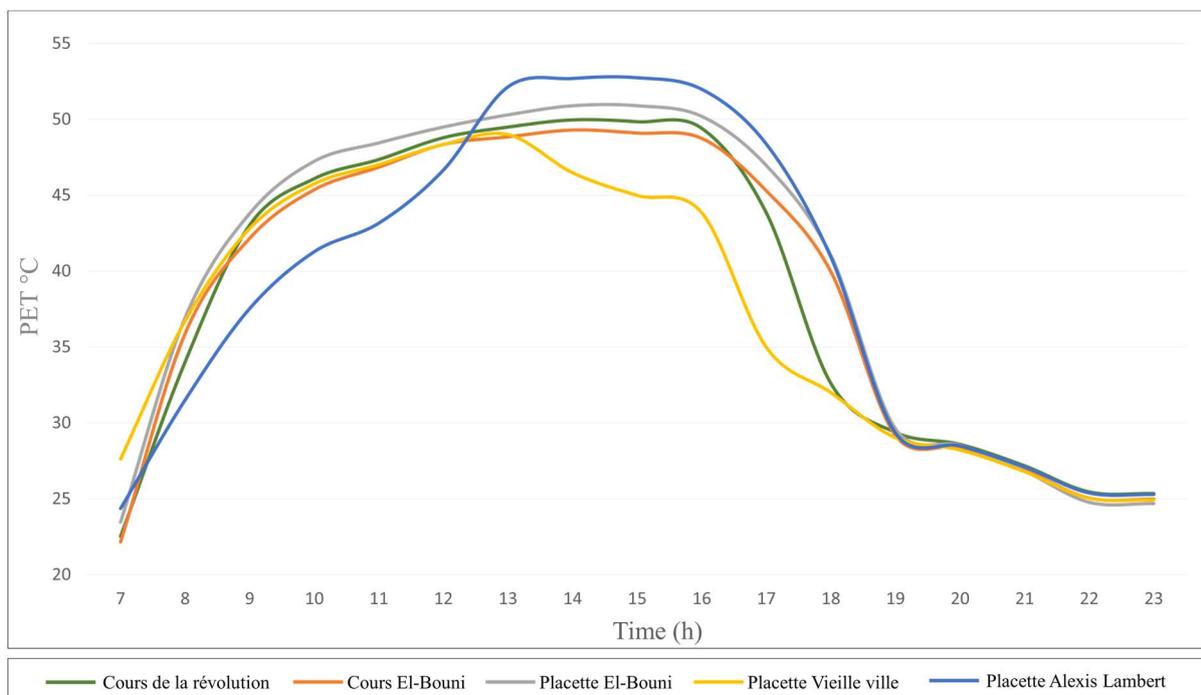


Figure 10 : Graphe représentant la variation du PET pour les cinq placettes sans végétation

SET

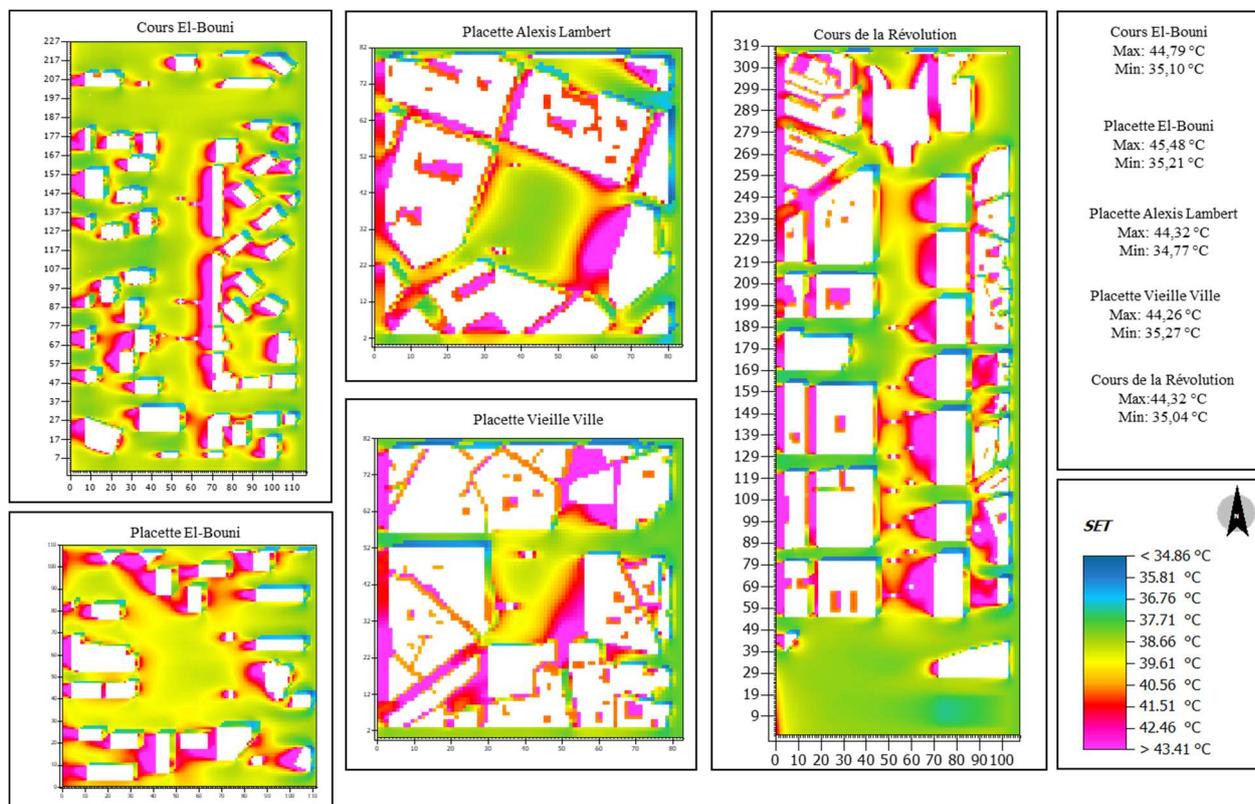


Figure 11 : Carte du SET pour les cinq placettes sans végétation

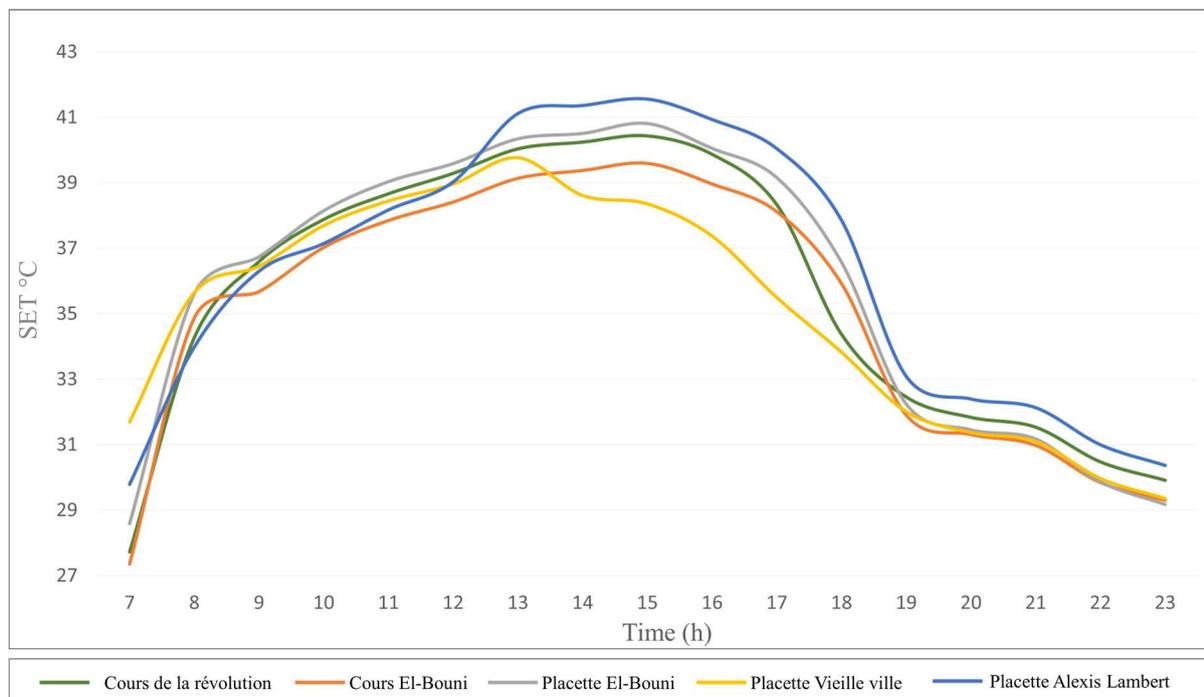


Figure 12 : Graphe représentant la variation du SET pour les cinq placettes sans végétation

## UTCI

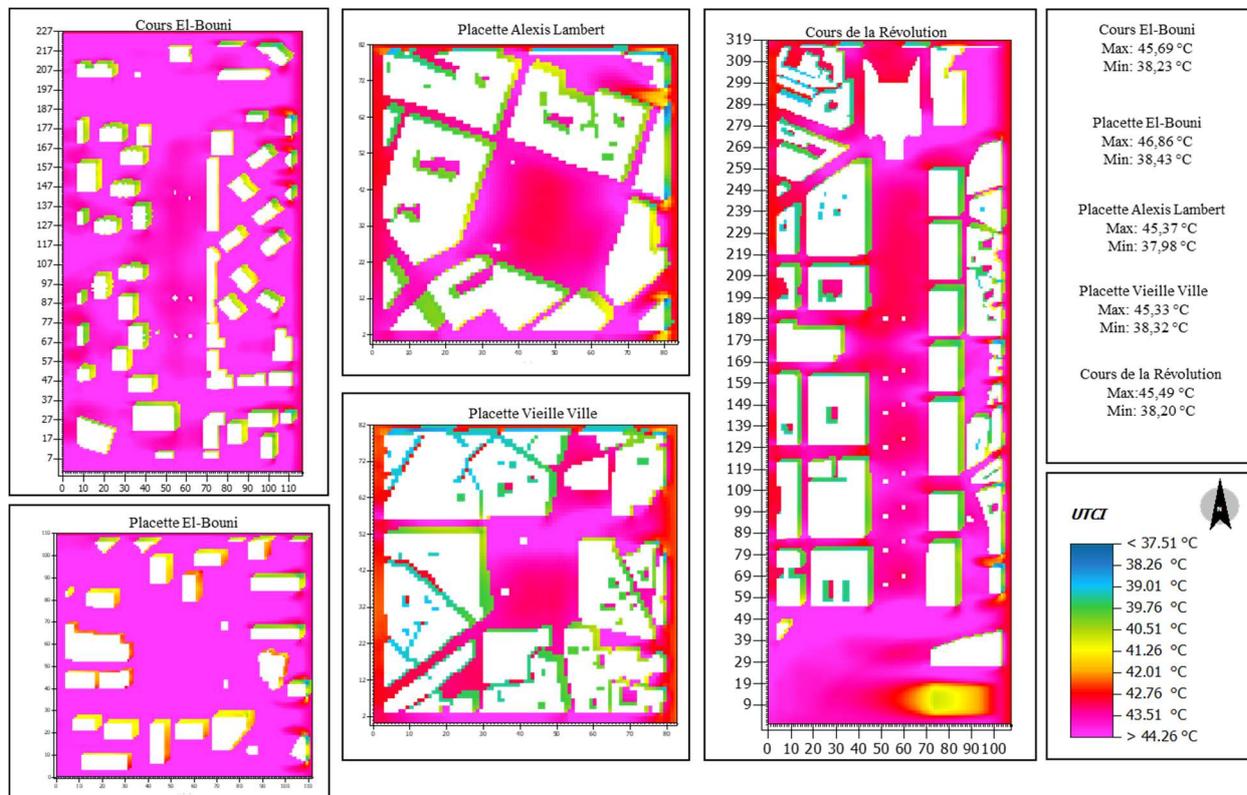


Figure 13 : Carte de la température de l'UTCI pour les cinq placettes sans végétation

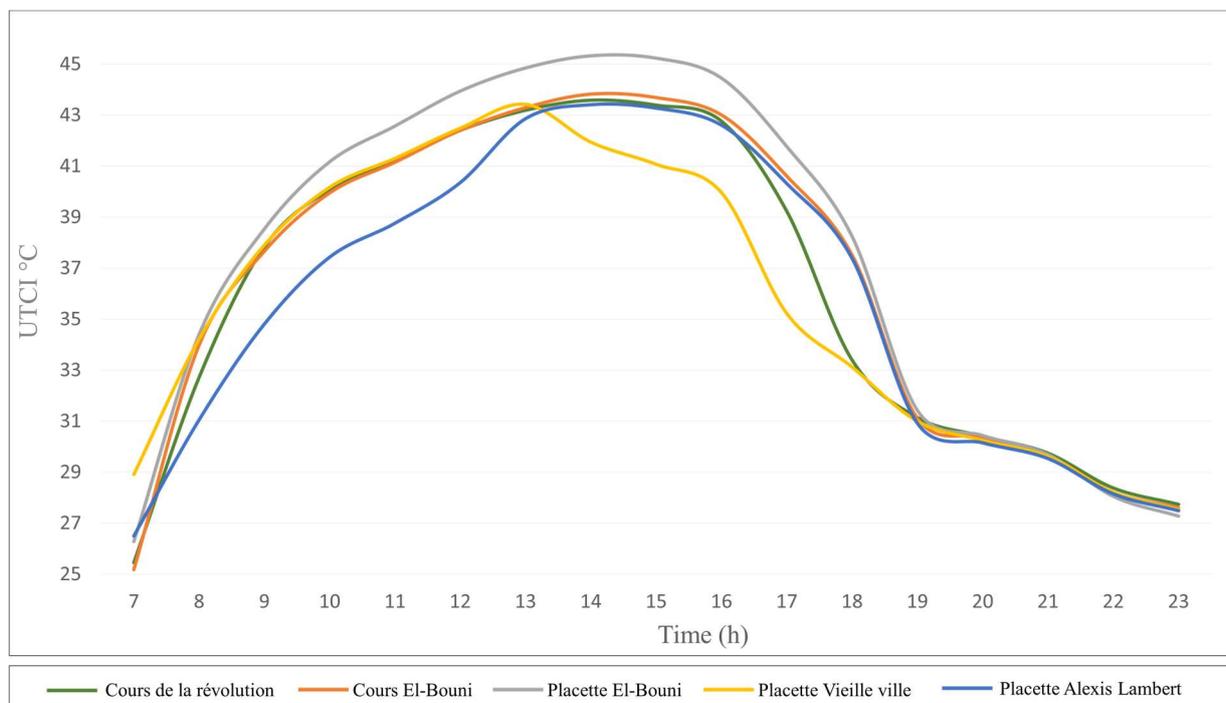


Figure 14 : Graphe représentant la variation de l'UTCI pour les cinq placettes sans végétation

# ANNEXE 02

RESULTATS DES SCENARIOS D'AMELIORATION

## 1. Scénario d'hauteur

## 1.1. Impact de la hauteur sur les paramètres climatique

## 1.1.1. Température de l'air

## -Cours El-Bouni

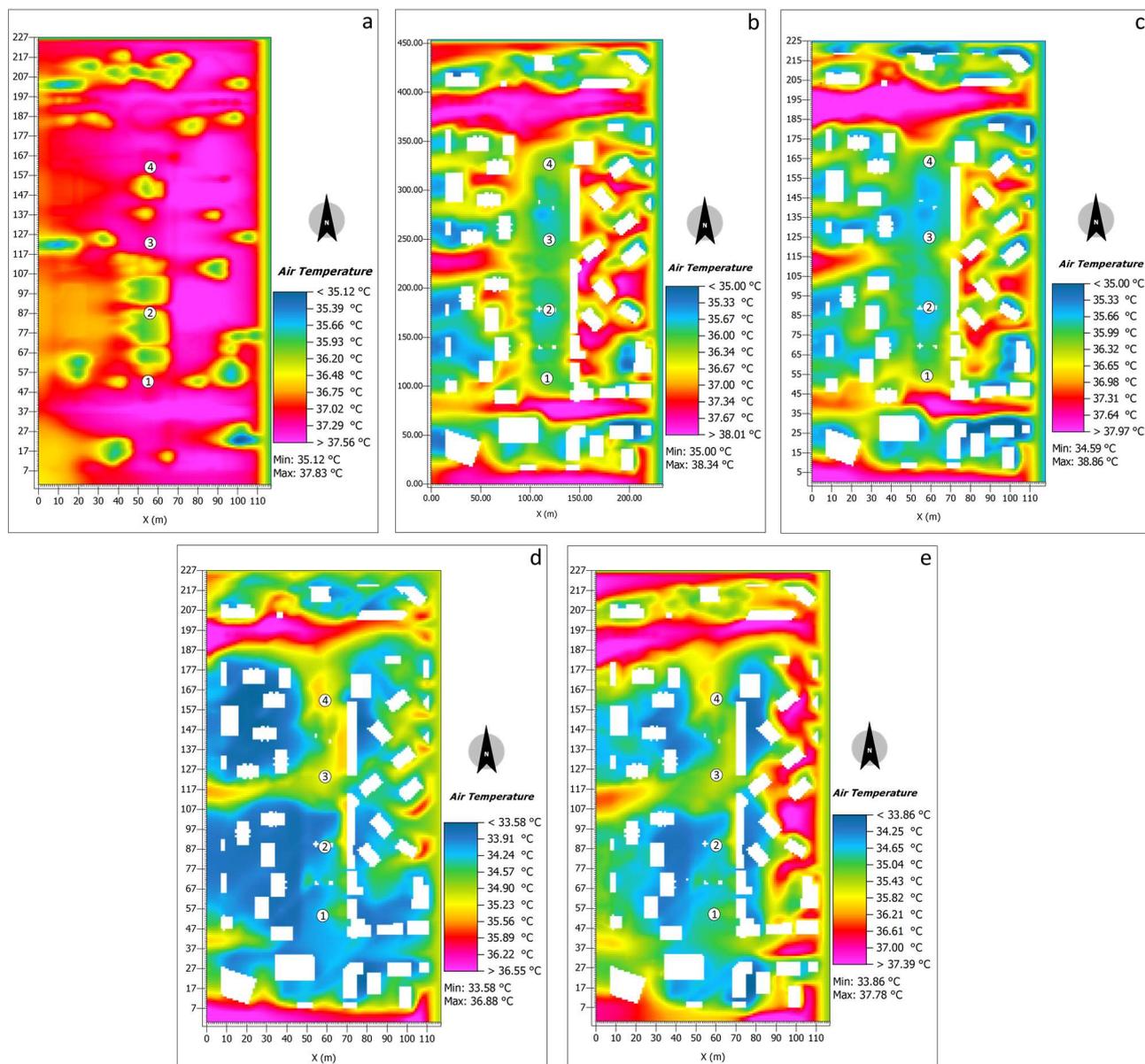


Figure 15 : Carte de la Température d'air pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur  $\times 2$ , d) hauteur  $\times 8$ , e) hauteur 50%

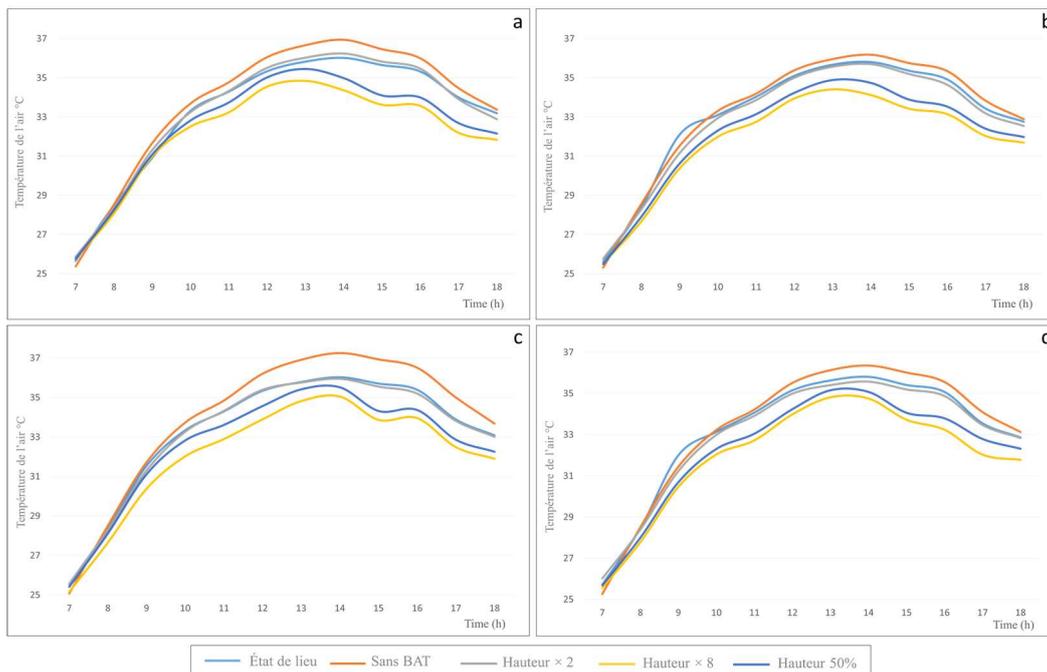


Figure 16 : Graphe représentant les Températures d'air enregistrées dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Placette Vieille ville**

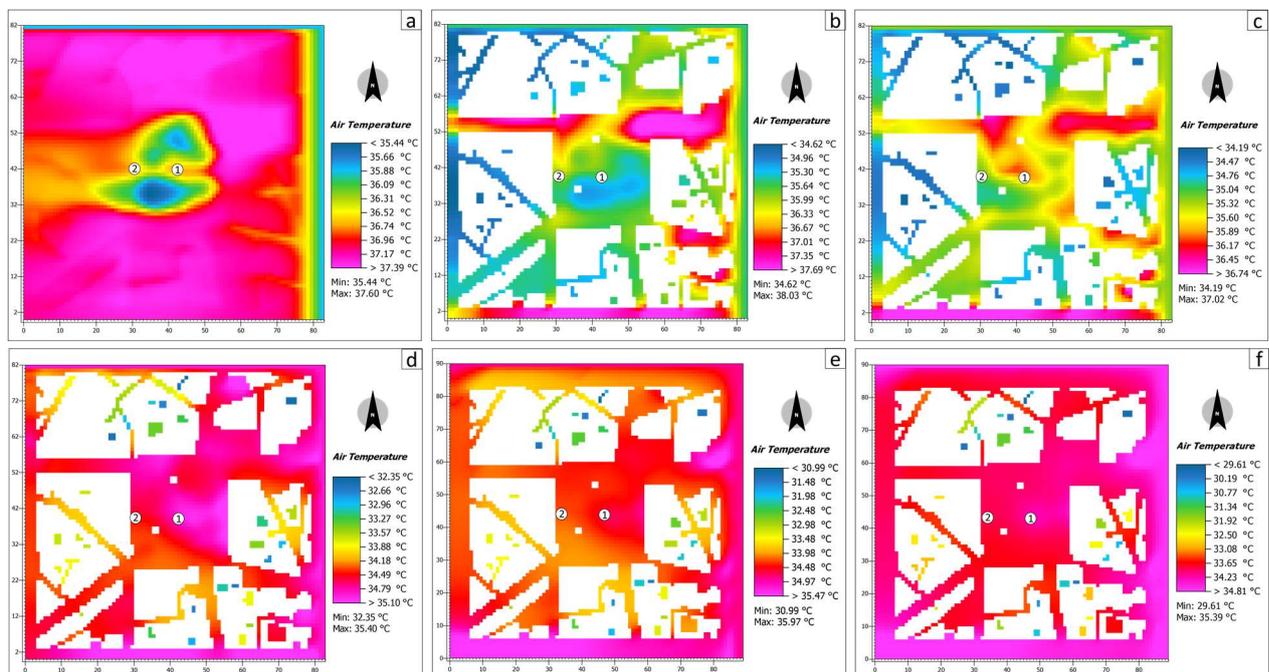


Figure 17 : Carte de la Température d'air pour le scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 4, e) hauteur x 6, e) hauteur x 8

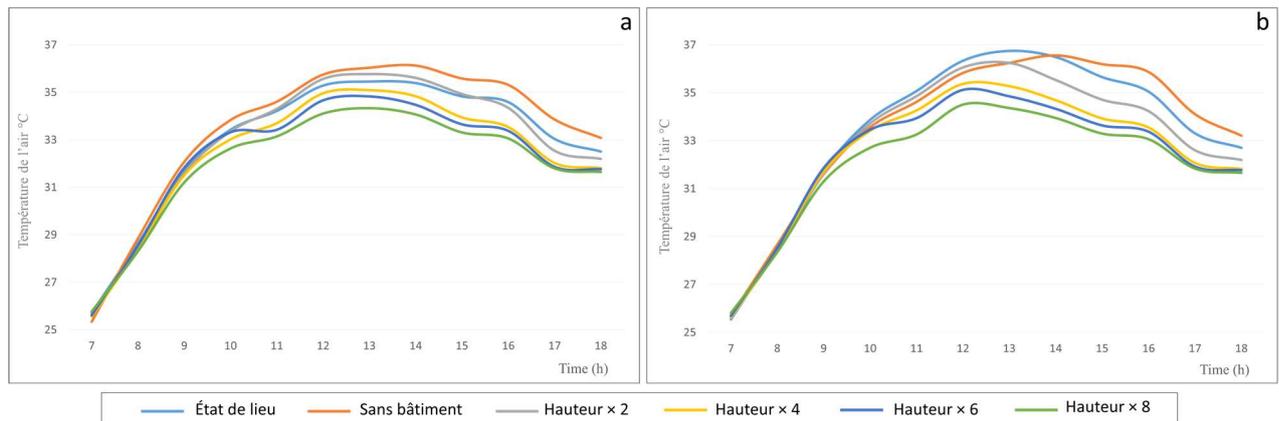


Figure 18 : Graphe représentant les Températures d'air enregistrées dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 1.1.2. Humidité relative

#### -Cours El-Bouni

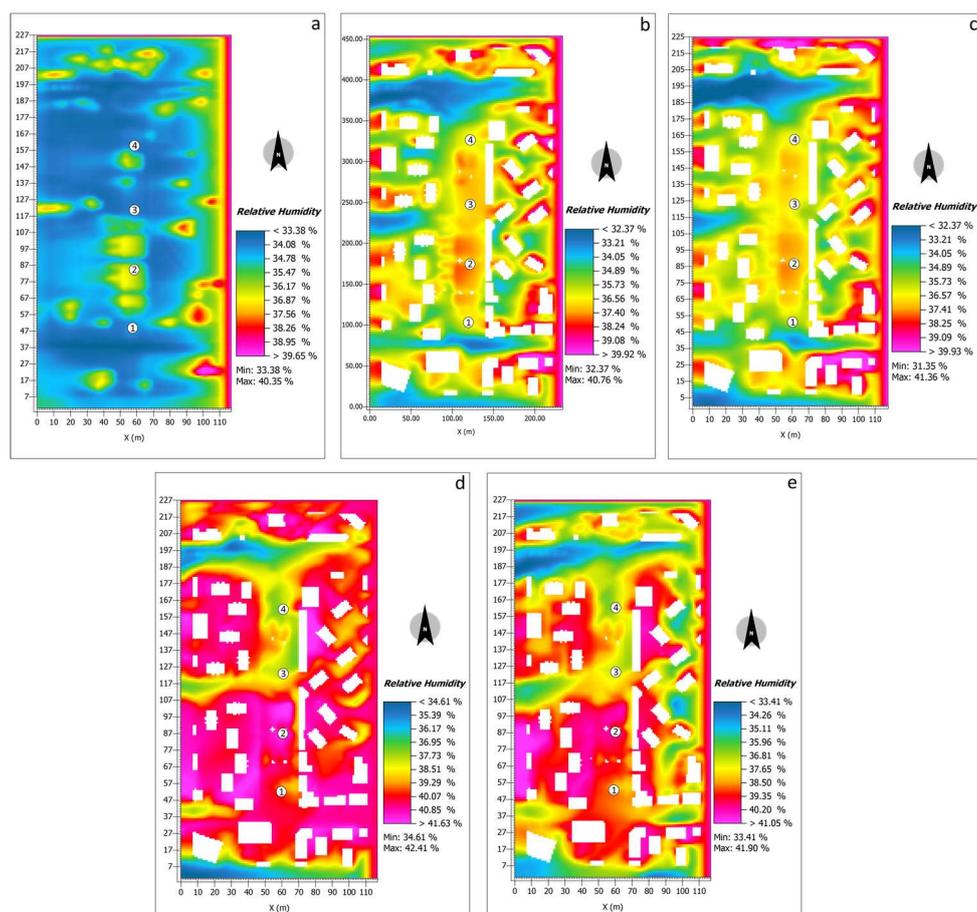


Figure 19 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur × 2, d) hauteur × 8, e) hauteur 50%

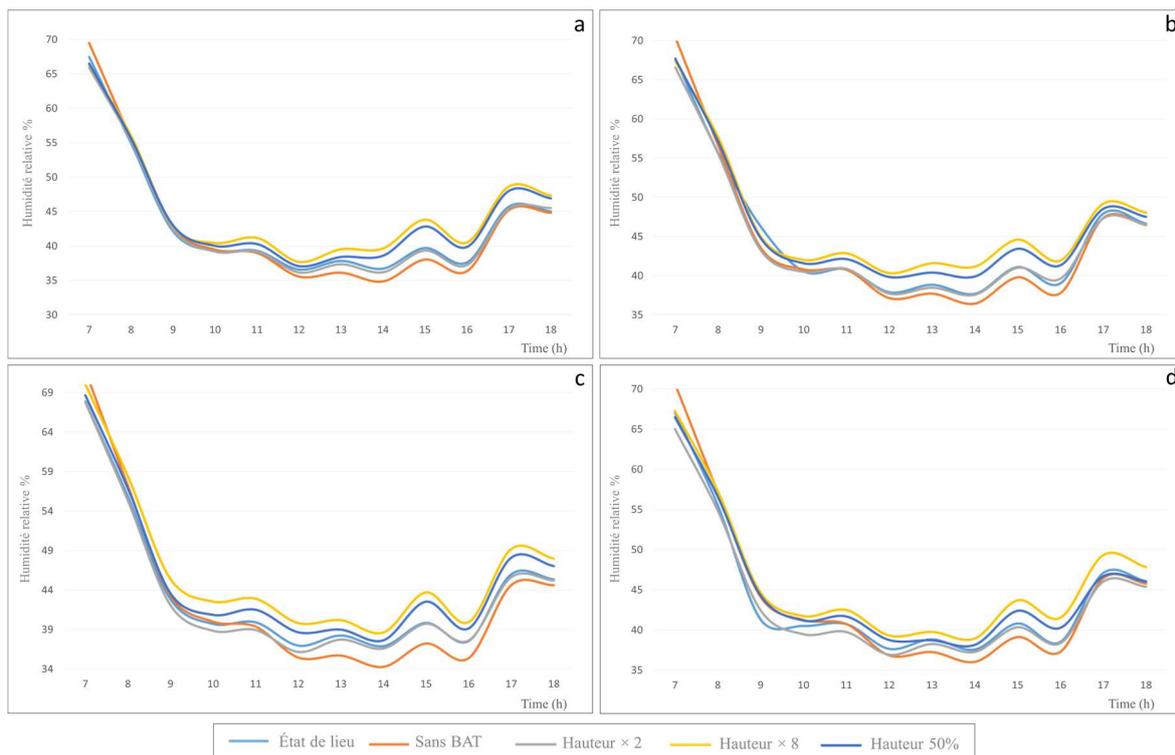


Figure 20 : Graphe représentant l'Humidité relative enregistrées dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Placette Vieille ville**

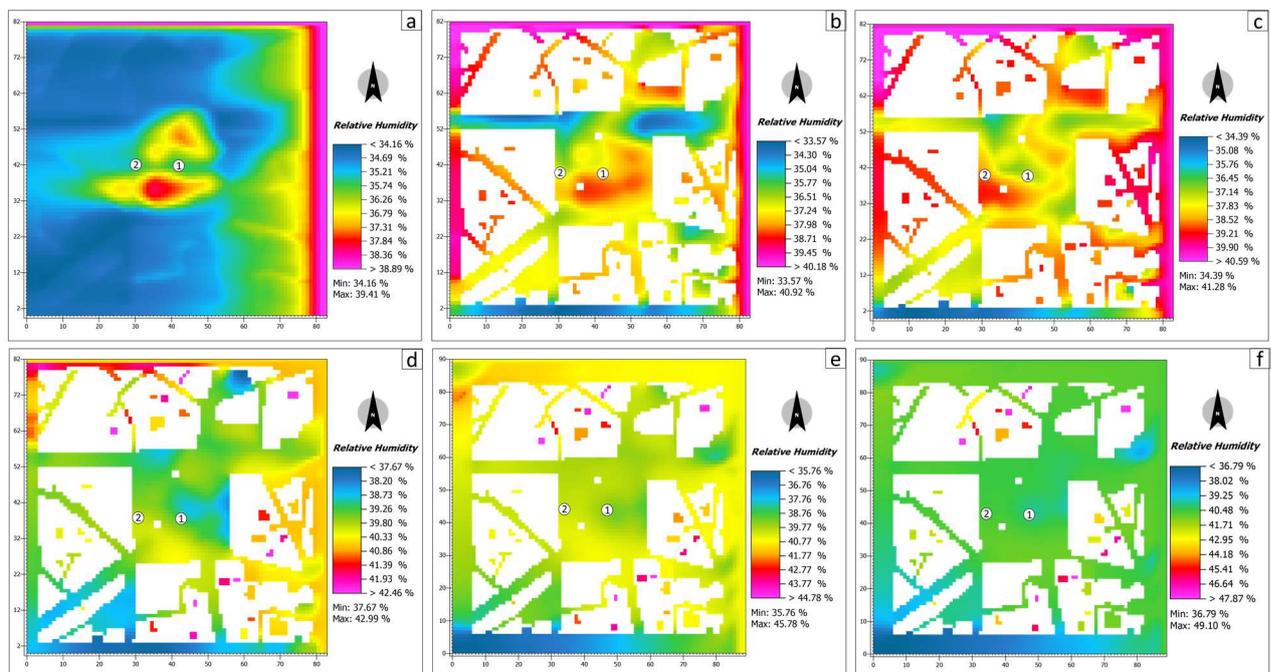


Figure 21 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 4, e) hauteur x 6, e) hauteur x 8

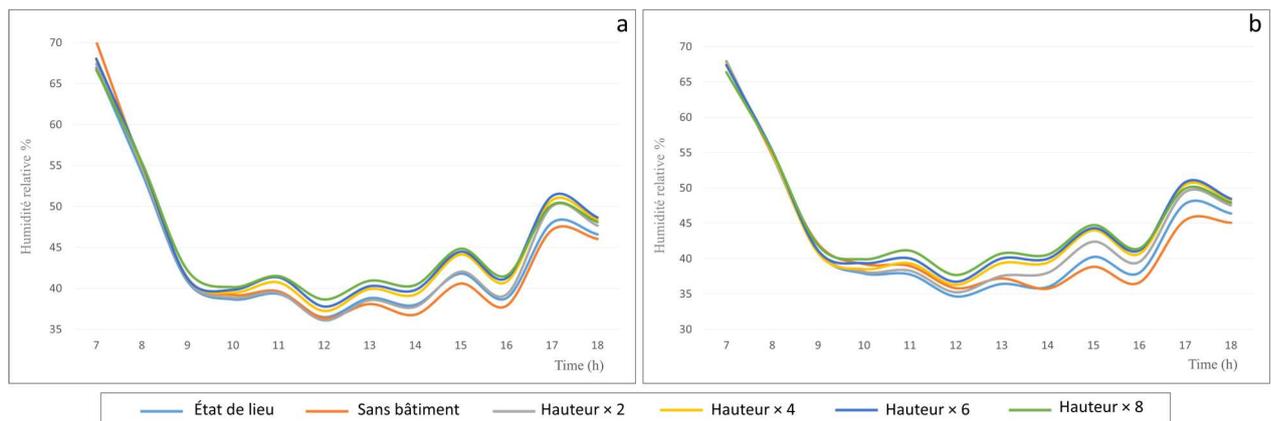


Figure 22 : Graphe représentant l'Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 1.1.3. Vitesse de l'air

#### -Cours El-Bouni

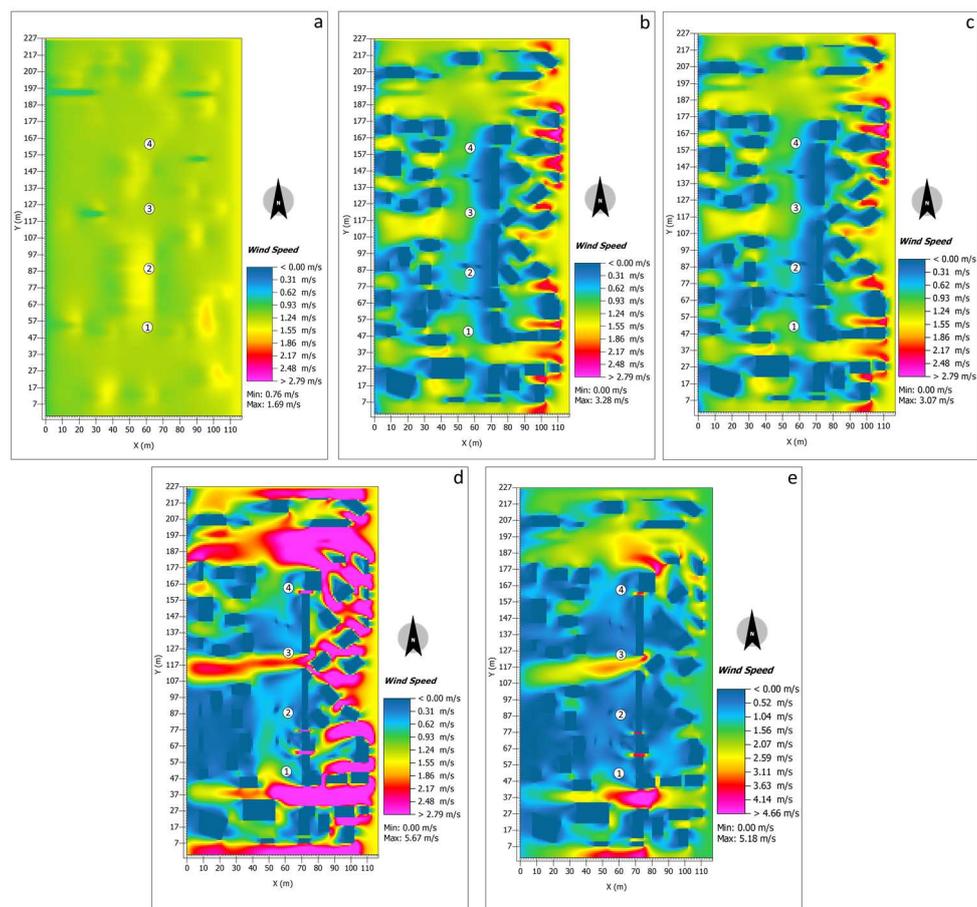


Figure 23 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur  $\times$  2, d) hauteur  $\times$  8, e) hauteur 50%

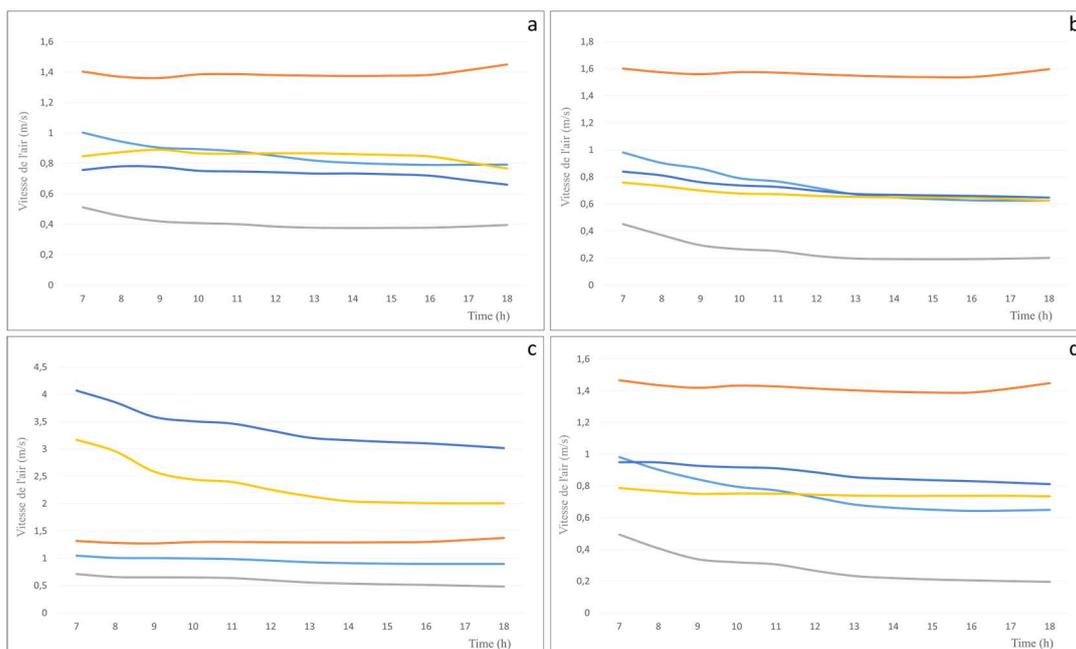


Figure 24 : Graphe représentant la vitesse de l'air enregistrées dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 1.1.4. Température moyenne radiante

#### -Cours El-Bouni

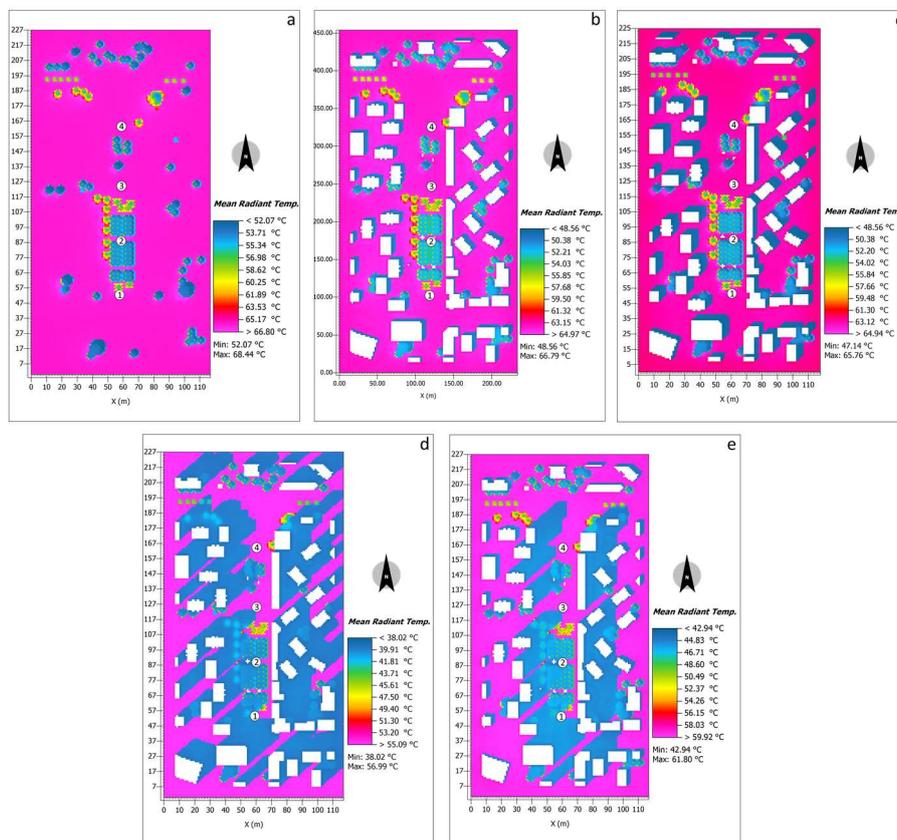


Figure 25 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 8, e) hauteur 50%

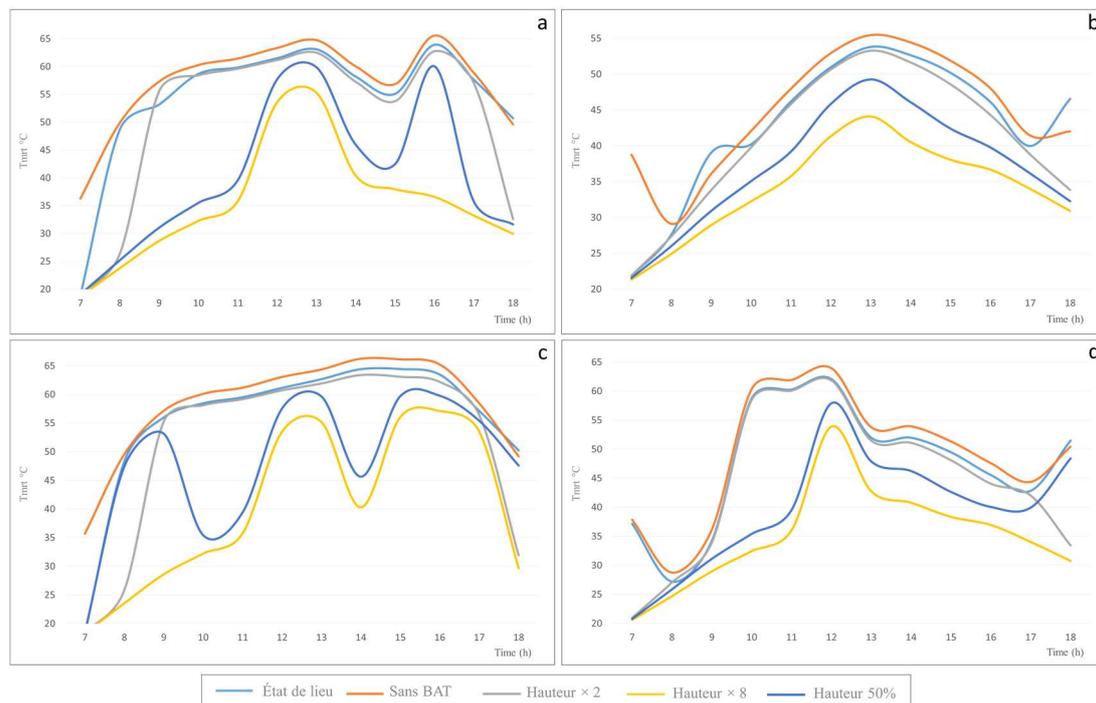


Figure 26 : Graphe représentant la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Placette Vieille ville**

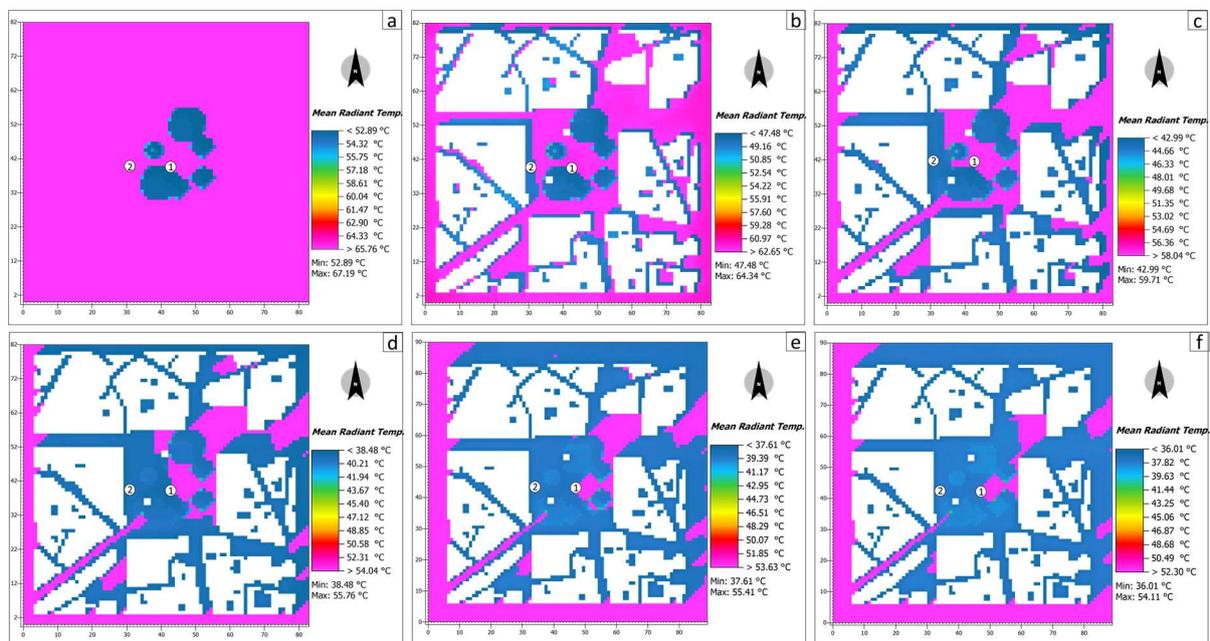


Figure 27 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 4, e) hauteur x 6, e) hauteur x 8

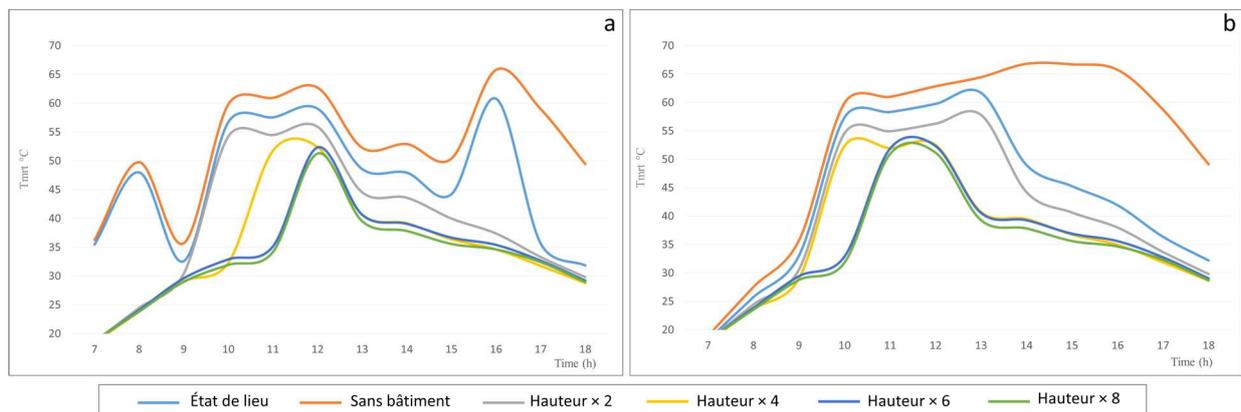


Figure 28 : Graphe représentant la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

## 1.2.Impact de la hauteur du bâti sur les indices de confort thermique

### 1.2.1. PET

#### -Cours El-Bouni

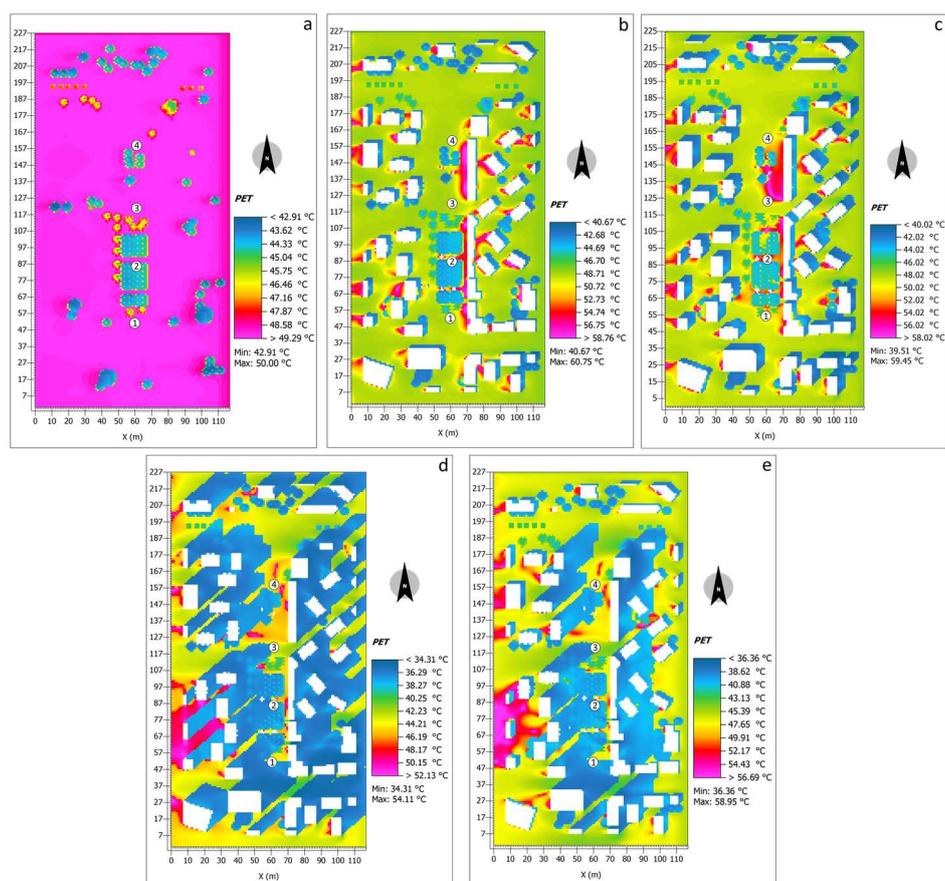


Figure 29 : Carte du PET pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 8, e) hauteur 50%

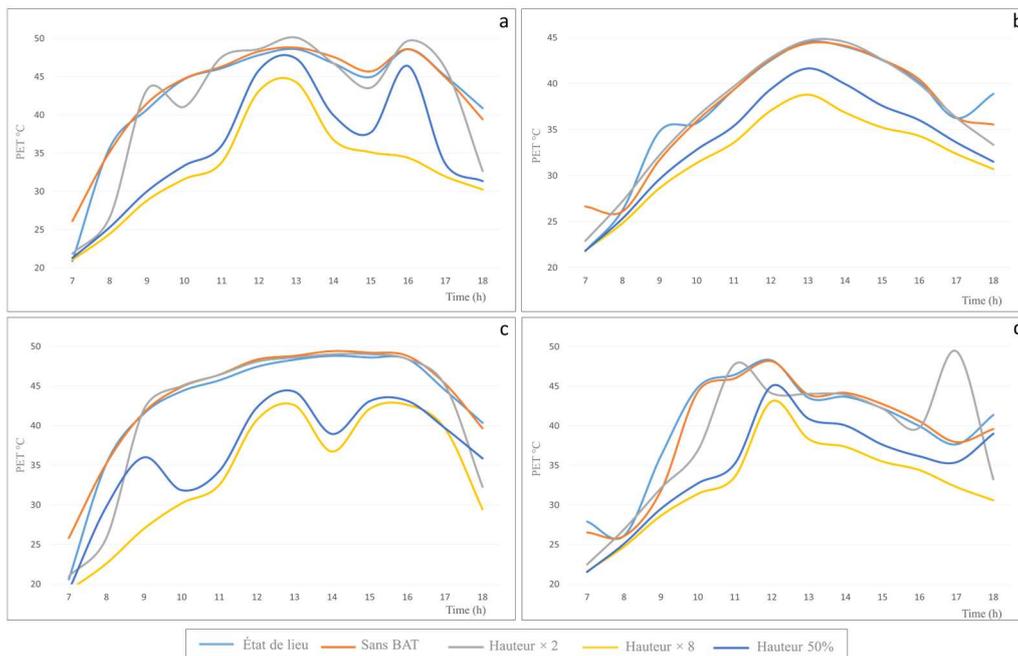


Figure 30 : Graphe représentant le PET enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Placette Vieille ville**

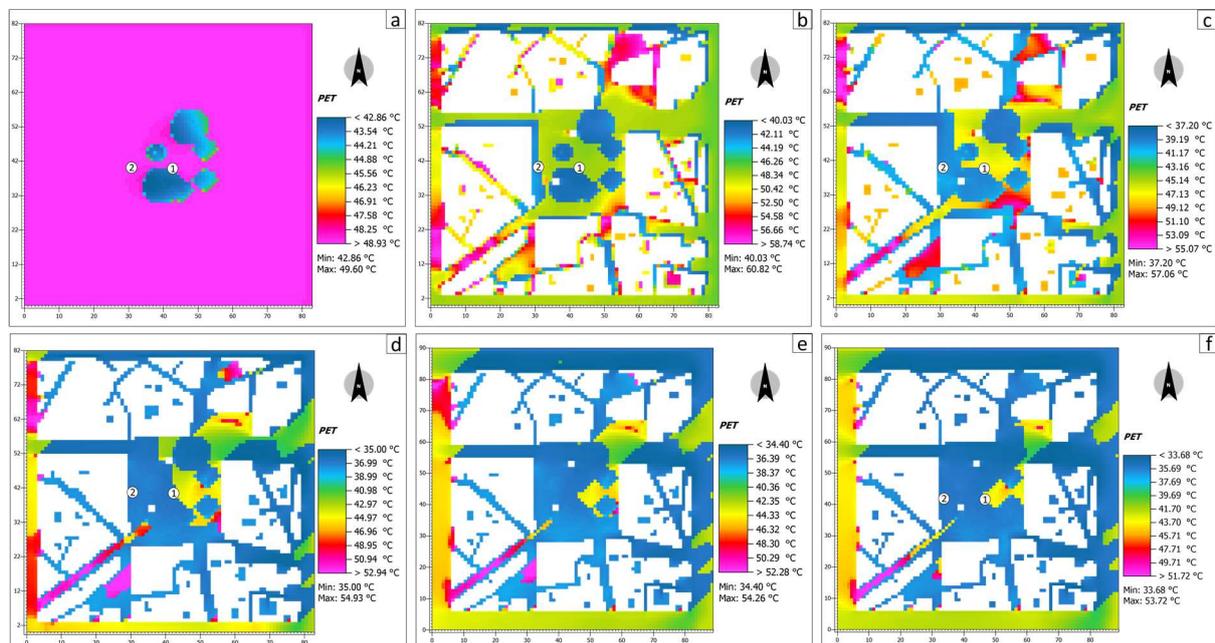


Figure 31 : Carte du PET pour le scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 4, e) hauteur x 6, e) hauteur x 8

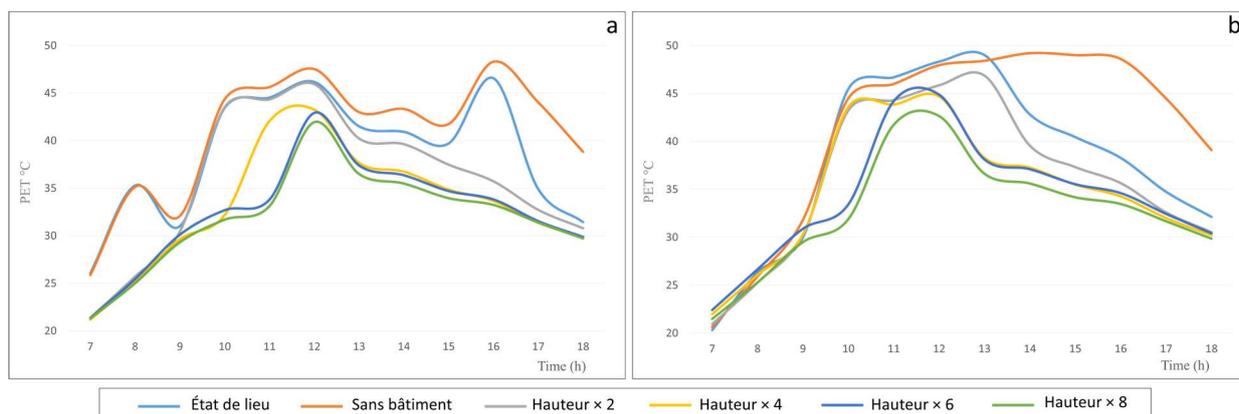


Figure 32 : Graphe représentant le PET enregistré dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 1.2.2. SET

#### -Cours El-Bouni

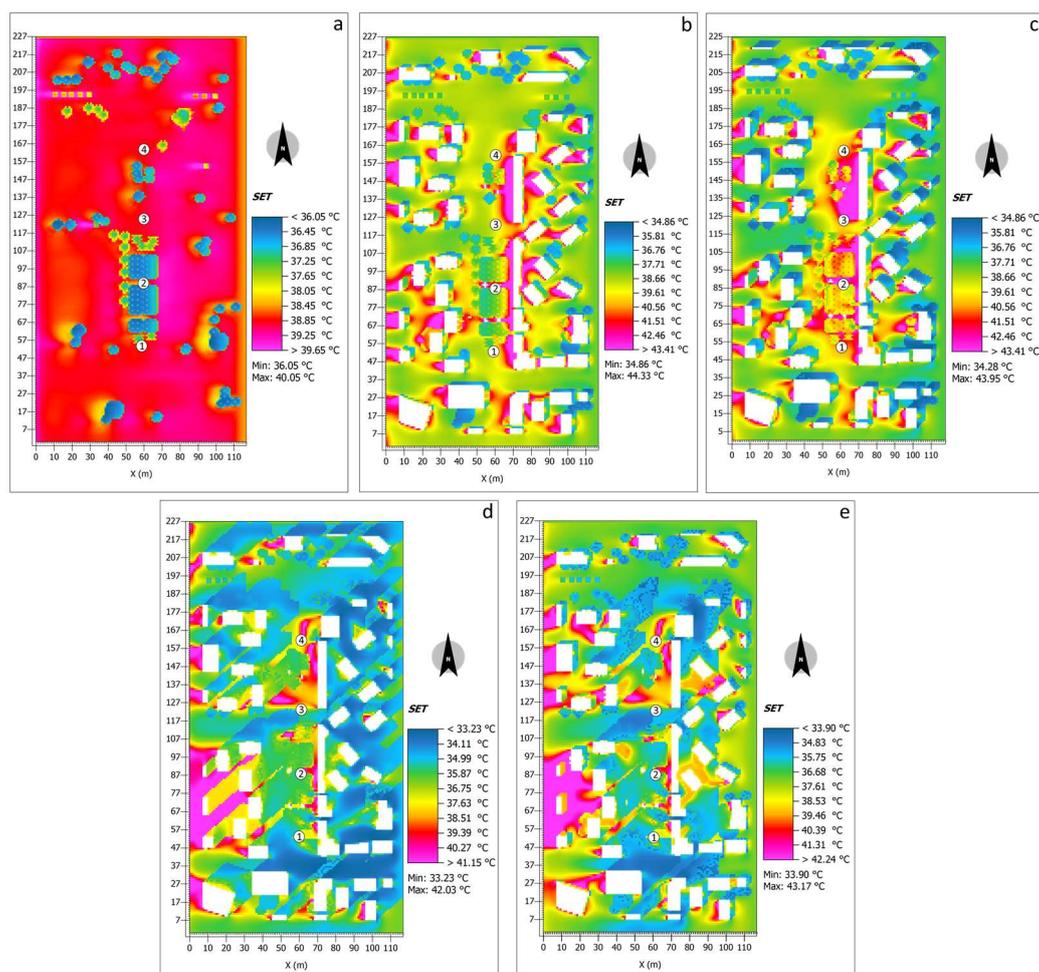


Figure 33 : Carte du SET pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 8, e) hauteur 50%

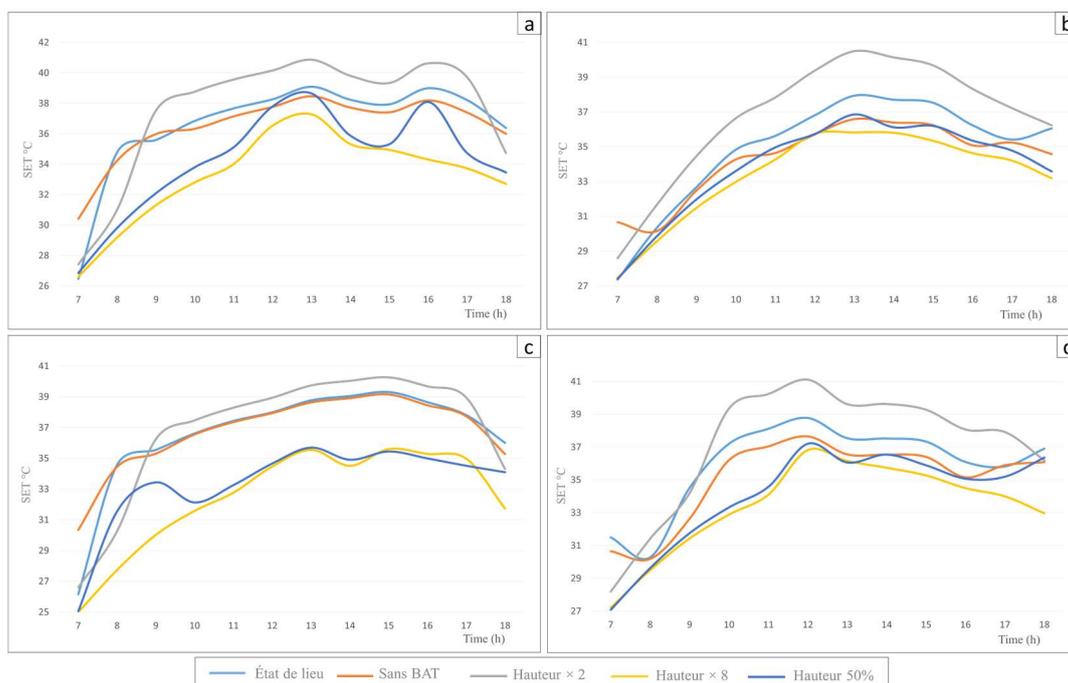


Figure 34 : Graphe représentant le SET enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Placette Vieille ville**

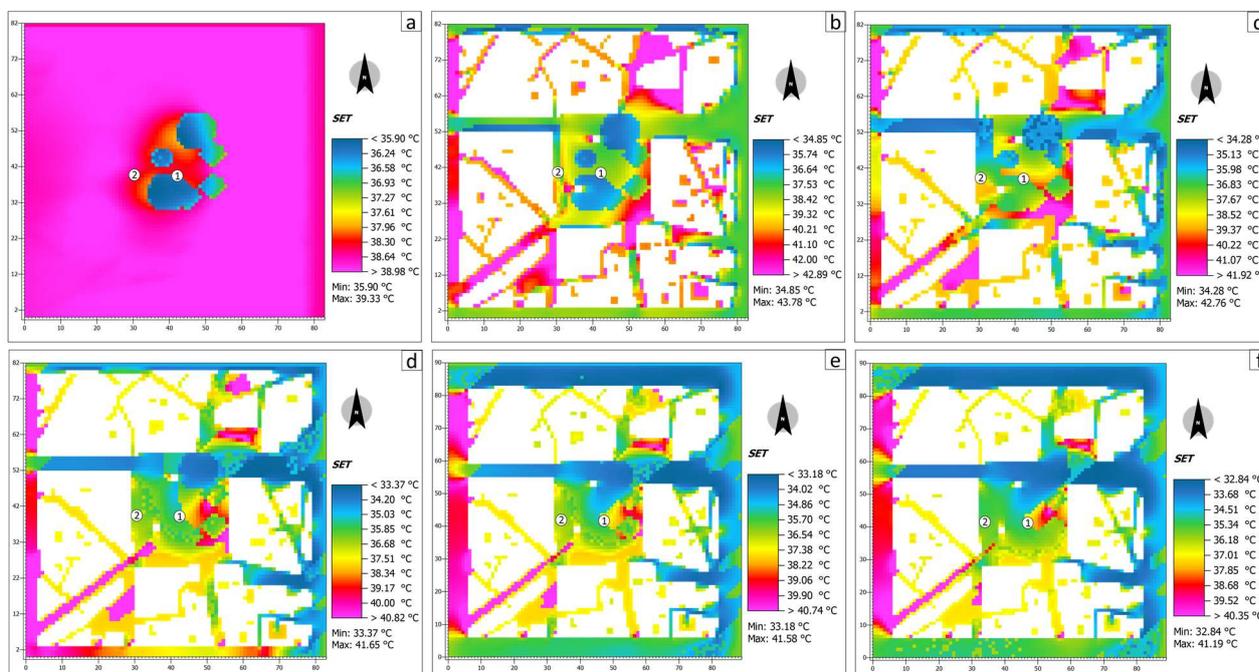


Figure 35 : Carte du SET pour le scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 4, e) hauteur x 6, e) hauteur x 8

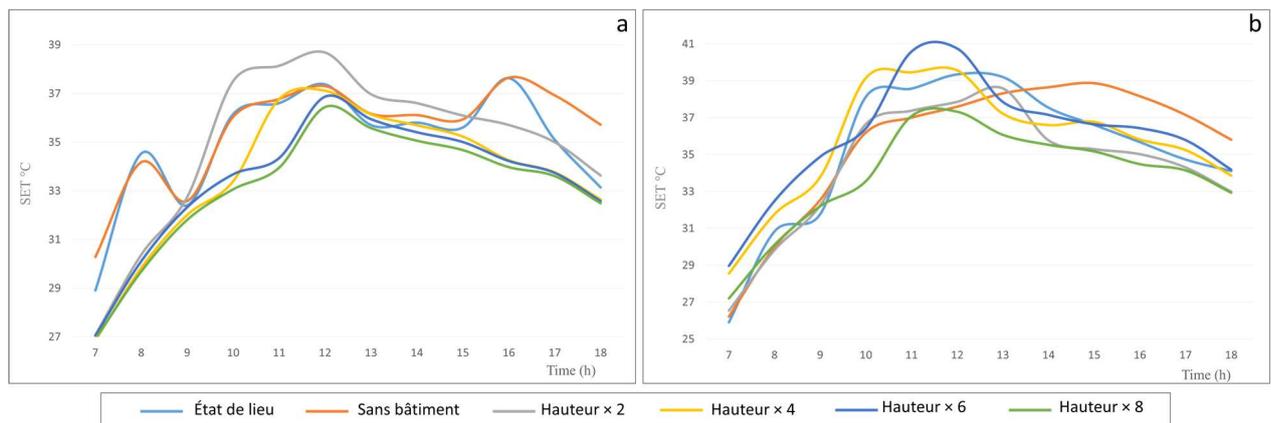


Figure 36 : Graphe représentant le SET enregistré dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 1.2.3. UTCI

#### -Cours El-Bouni

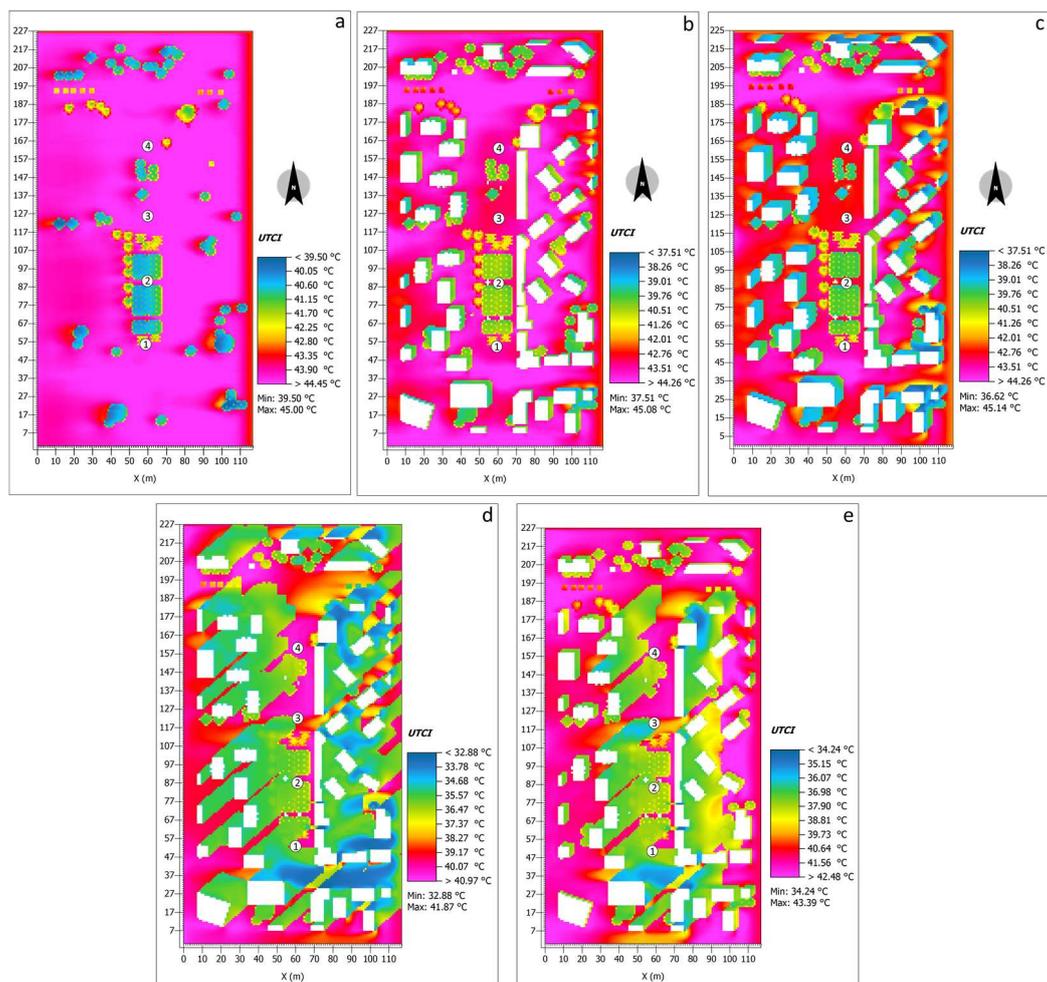


Figure 37 : Carte de l'UTCI pour le scénario d'hauteur du cours d'El-Bouni : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 8, e) hauteur 50%

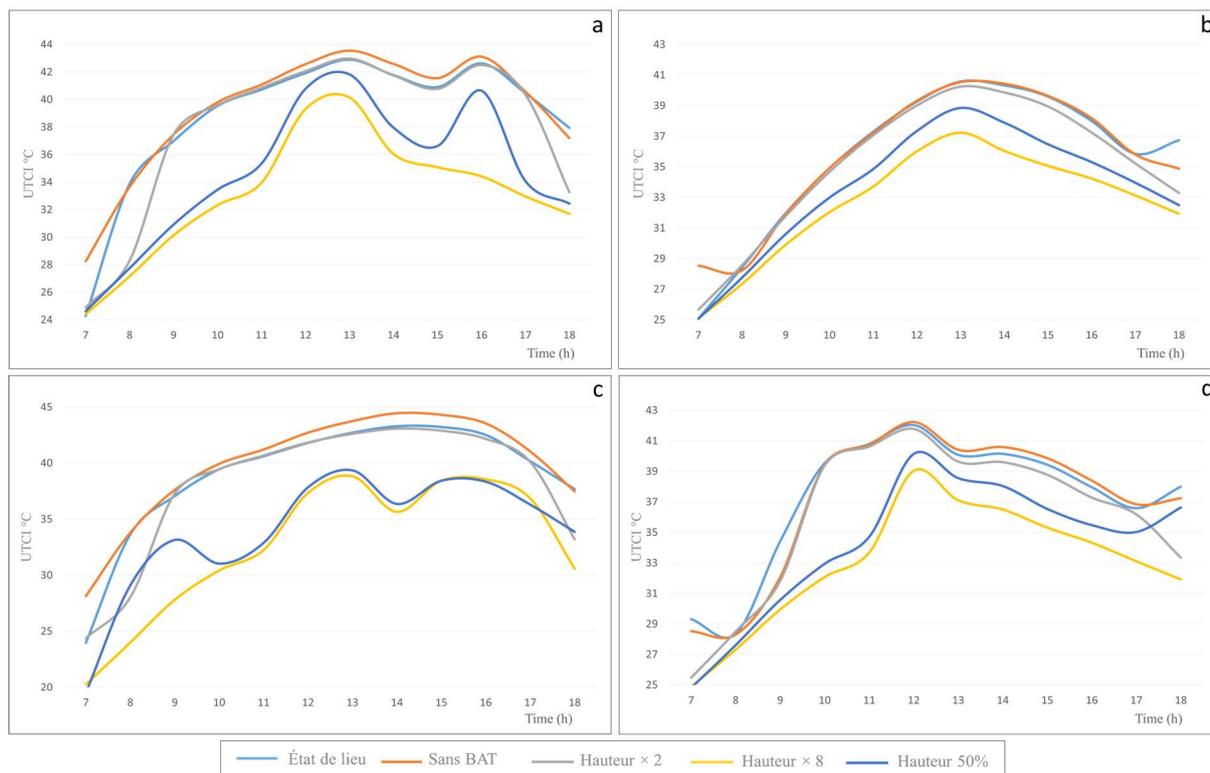


Figure 38 : Graphe représentant l'UTCI relative enregistrées dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Placette Vieille ville**

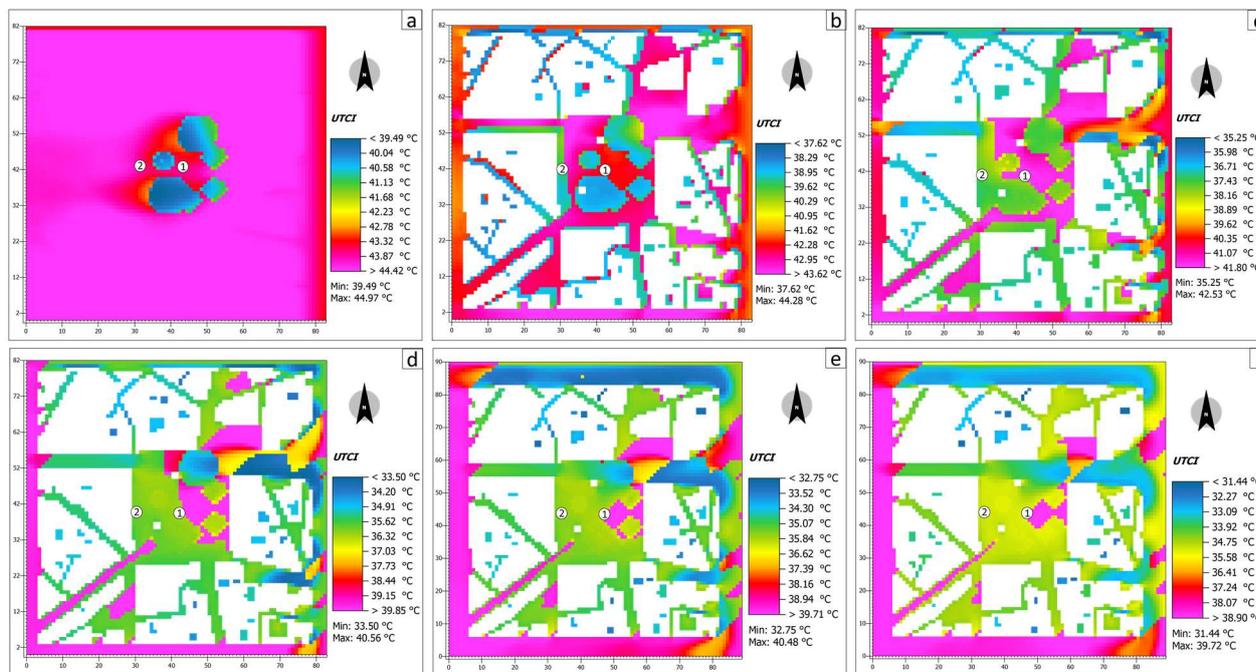


Figure 39 : Carte de l'UTCI pour le scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) sans bâtiment, b) état de lieu, c) hauteur x 2, d) hauteur x 4, e) hauteur x 6, f) hauteur x 8

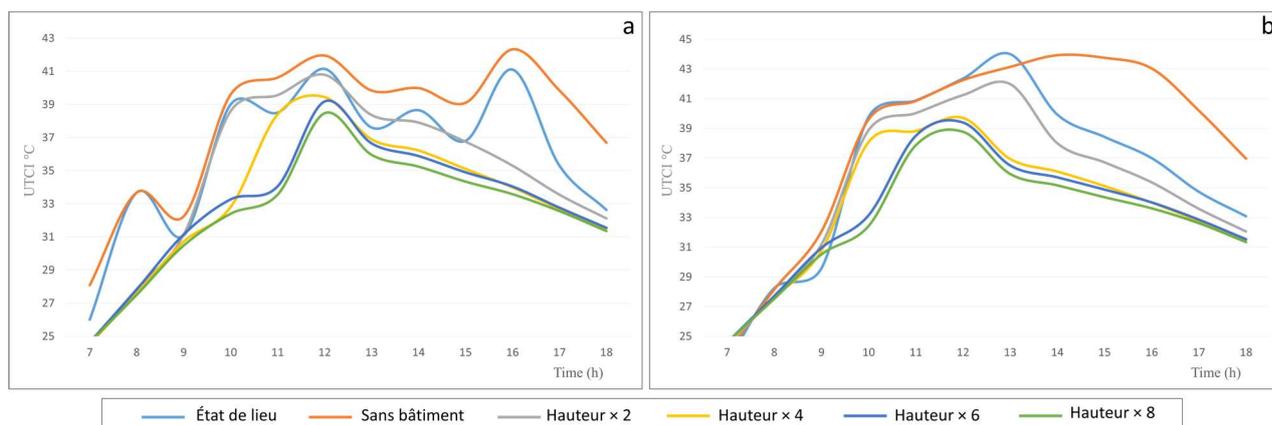


Figure 40 : Graphe représentant l'UTCI enregistré dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

## 2. Impact du pourcentage hauteur

### 2.1. Impact du pourcentage hauteur sur les paramètres climatiques

#### 2.1.1. Température de l'air

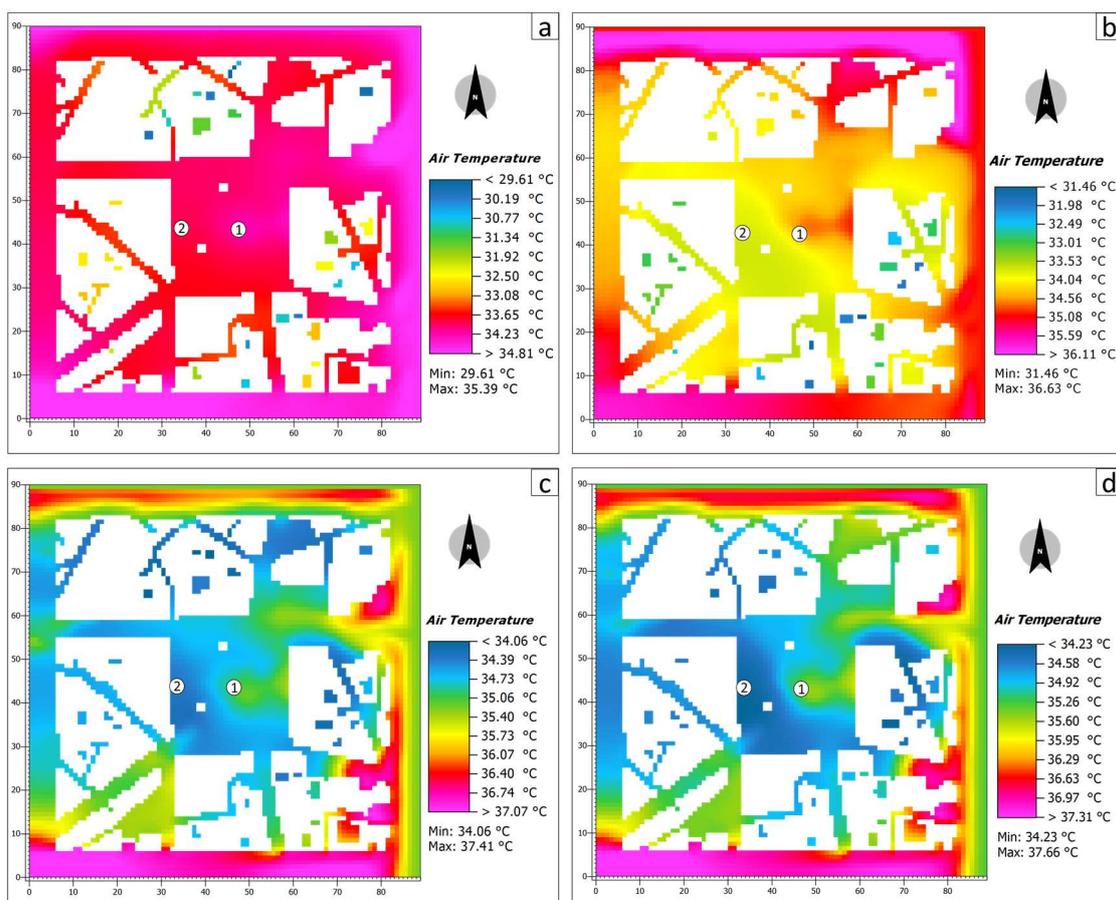


Figure 41 : Carte de la Température de l'air pour le deuxième scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

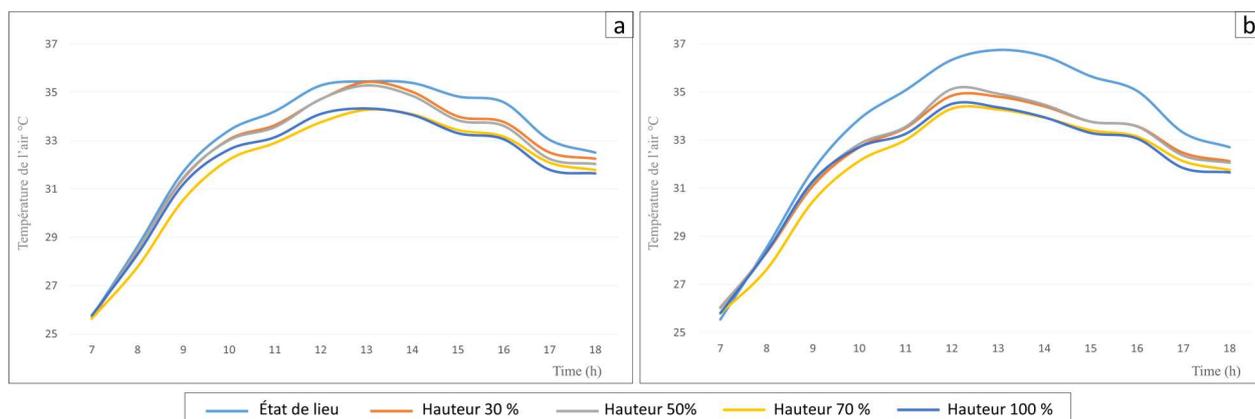


Figure 42 : Graphe représentant la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 2.1.2. Humidité relative

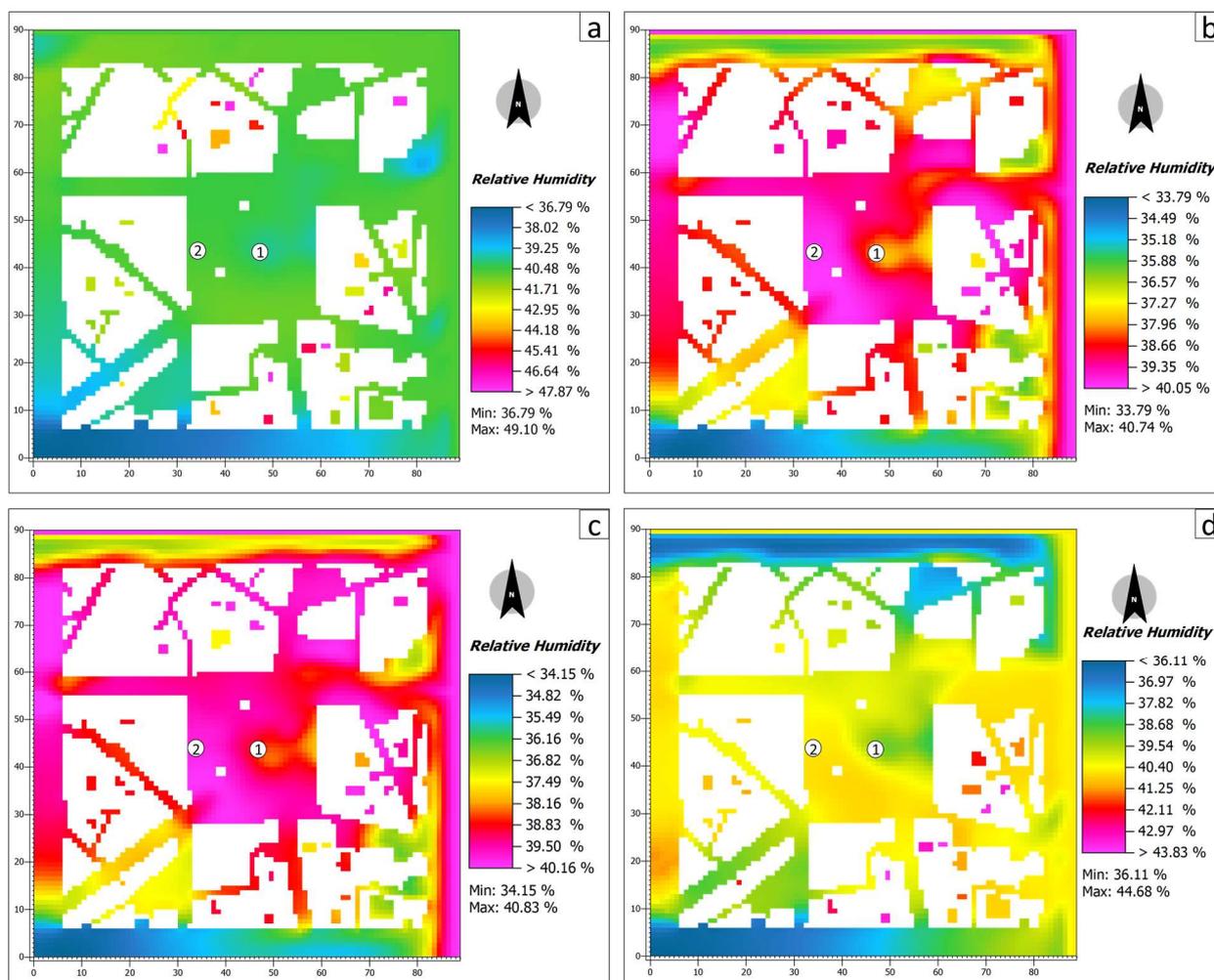


Figure 43 : Carte de l'Humidité relative pour le deuxième scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

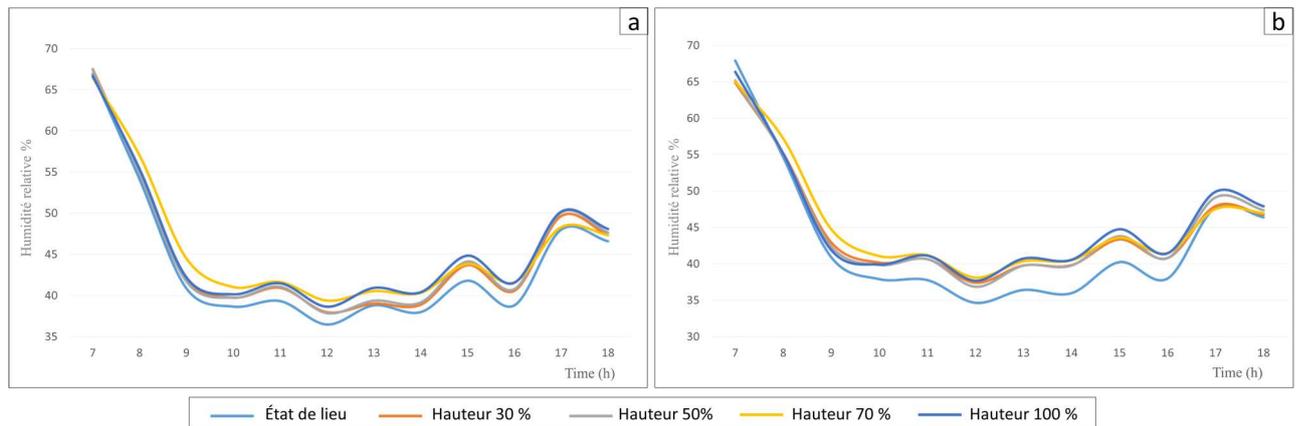


Figure 44 : Graphe représentant l’Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d’hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 2.1.3. Vitesse de l’air

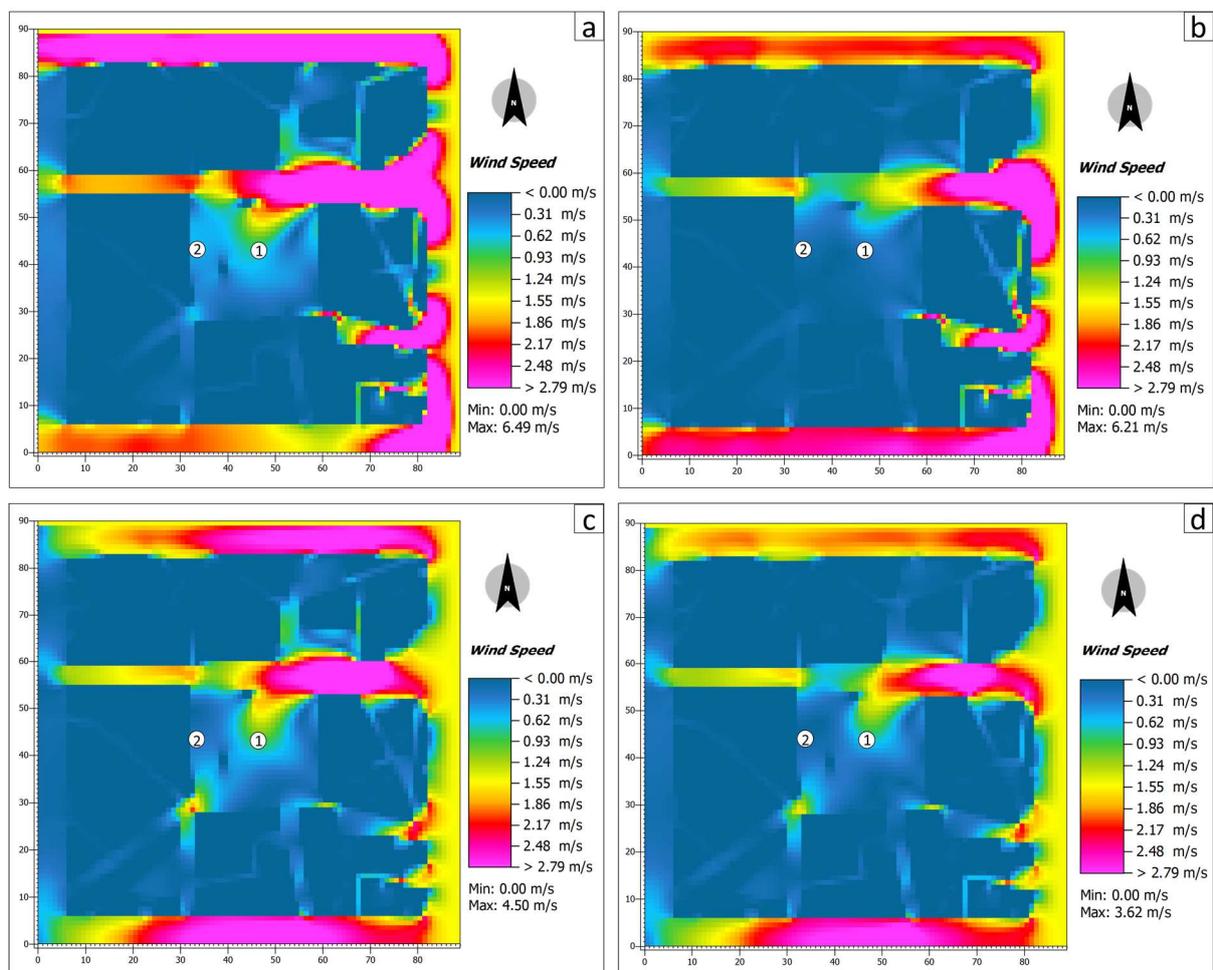


Figure 45 : Carte de la vitesse de l’air pour le deuxième scénario d’hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

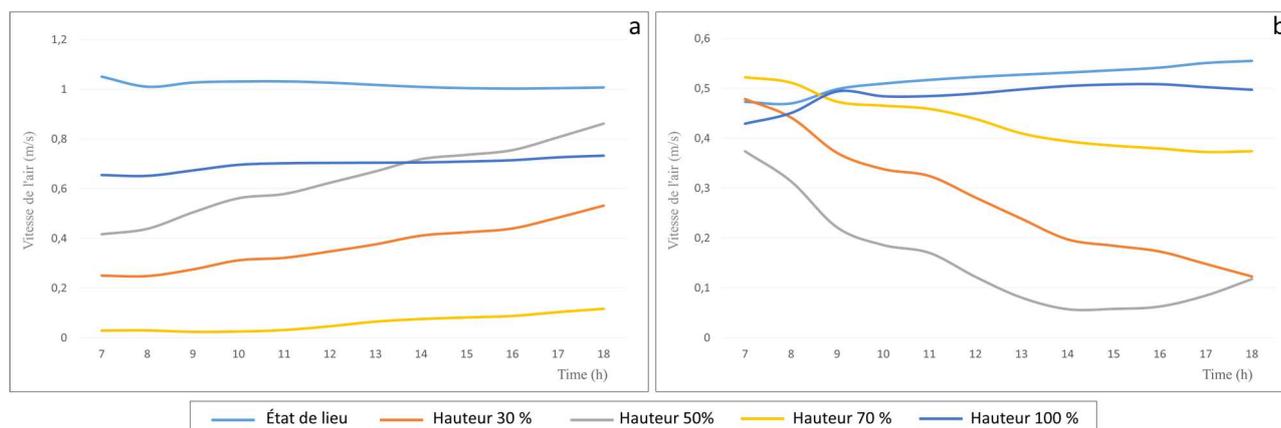


Figure 46 : Graphe représentant la vitesse de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 2.1.4. Température moyenne radiante

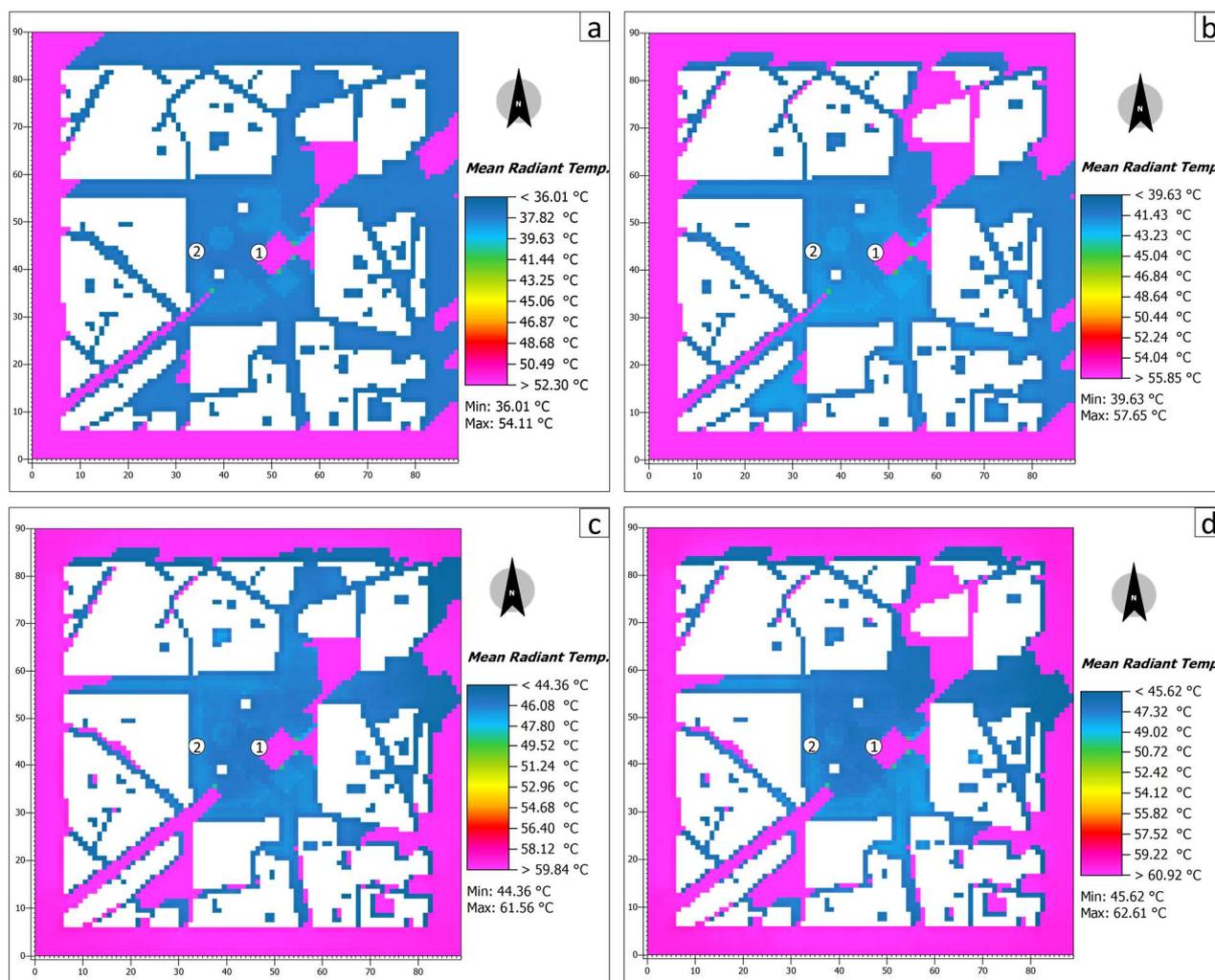


Figure 47 : Carte de la Température moyenne radiante pour le deuxième scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

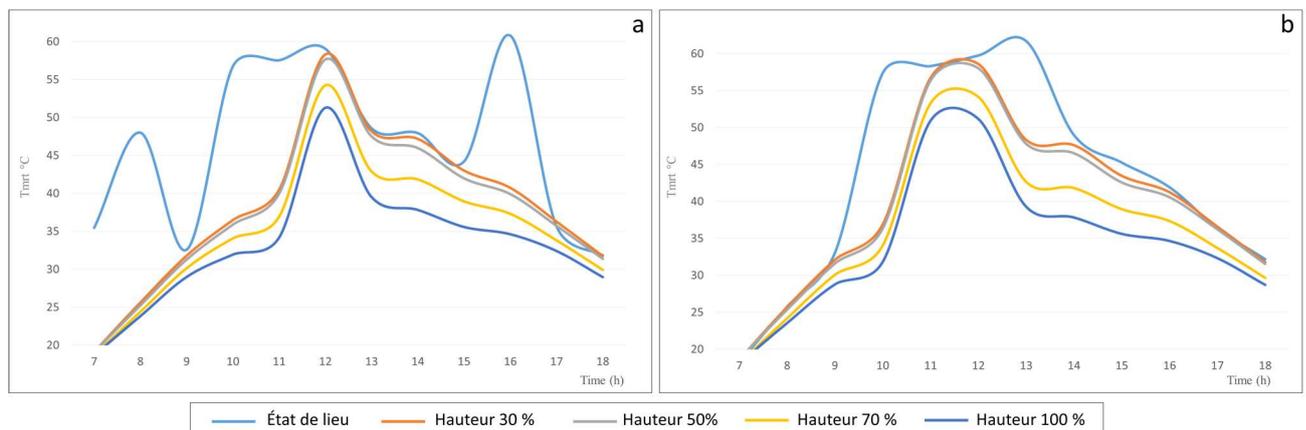


Figure 48 : Graphe représentant la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

## 2.2. Impact du pourcentage hauteur sur les indices de confort thermique

### 2.2.1. PET

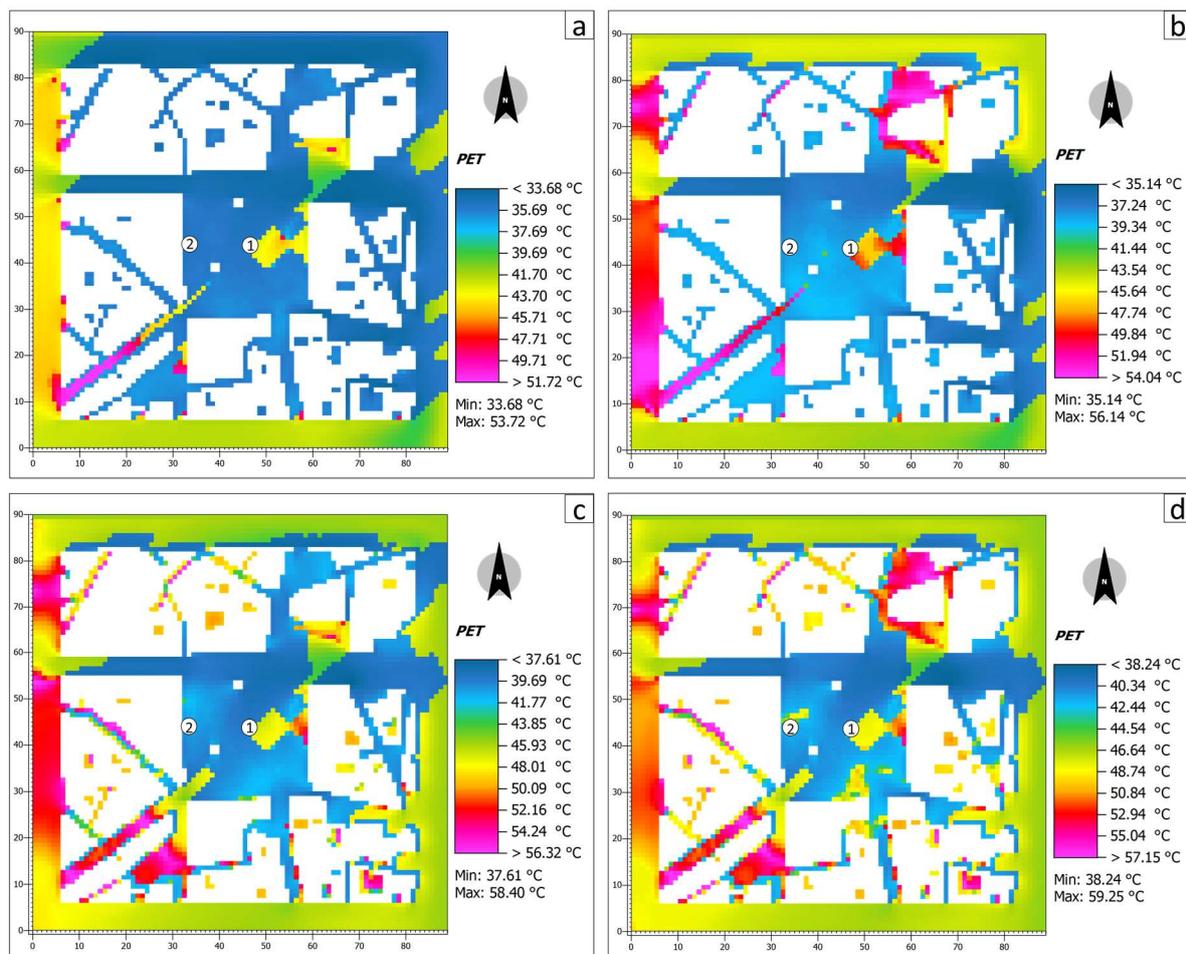


Figure 49 : Carte du PET pour le deuxième scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

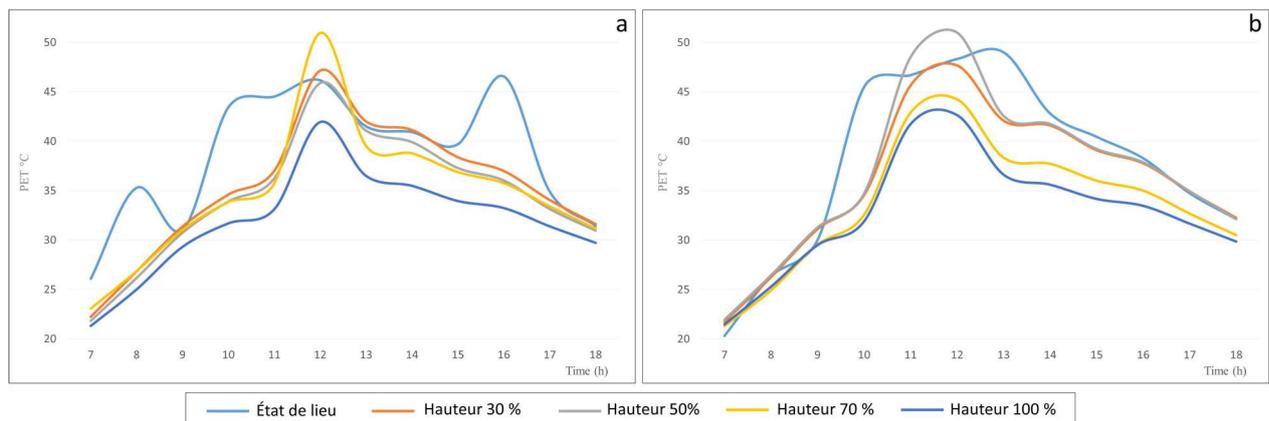


Figure 50 : Graphe représentant la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 2.2.2. SET

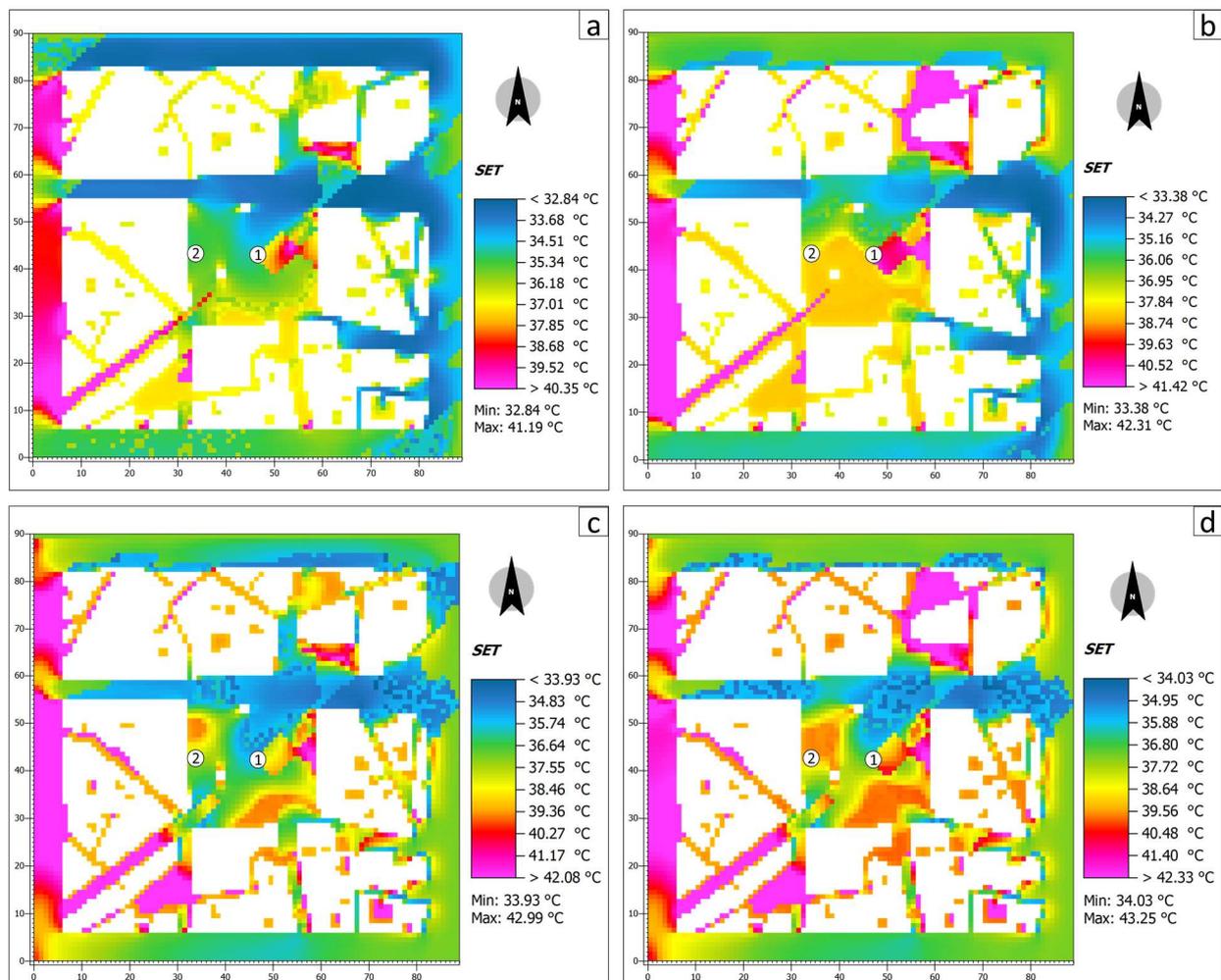


Figure 51 : Carte du SET pour le deuxième scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

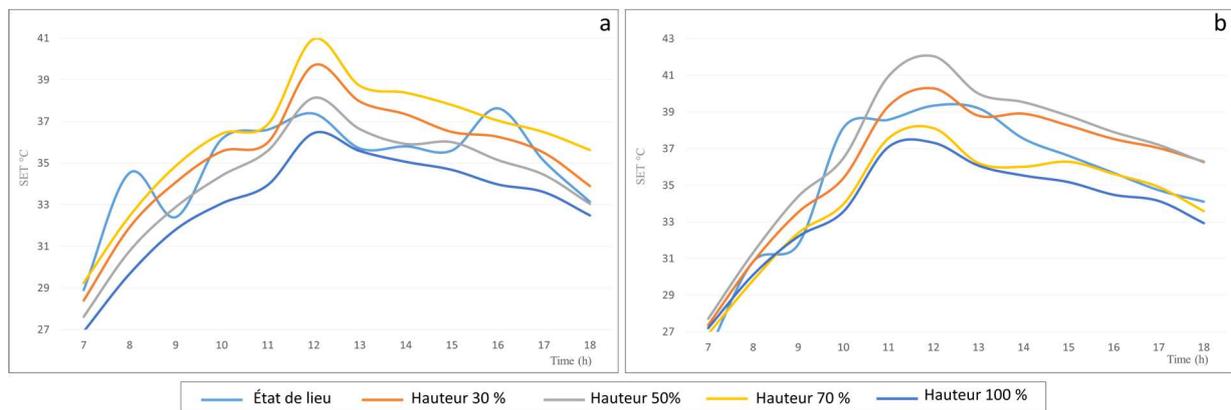


Figure 52 : Graphe représentant le SET enregistré dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 2.2.3. UTCI

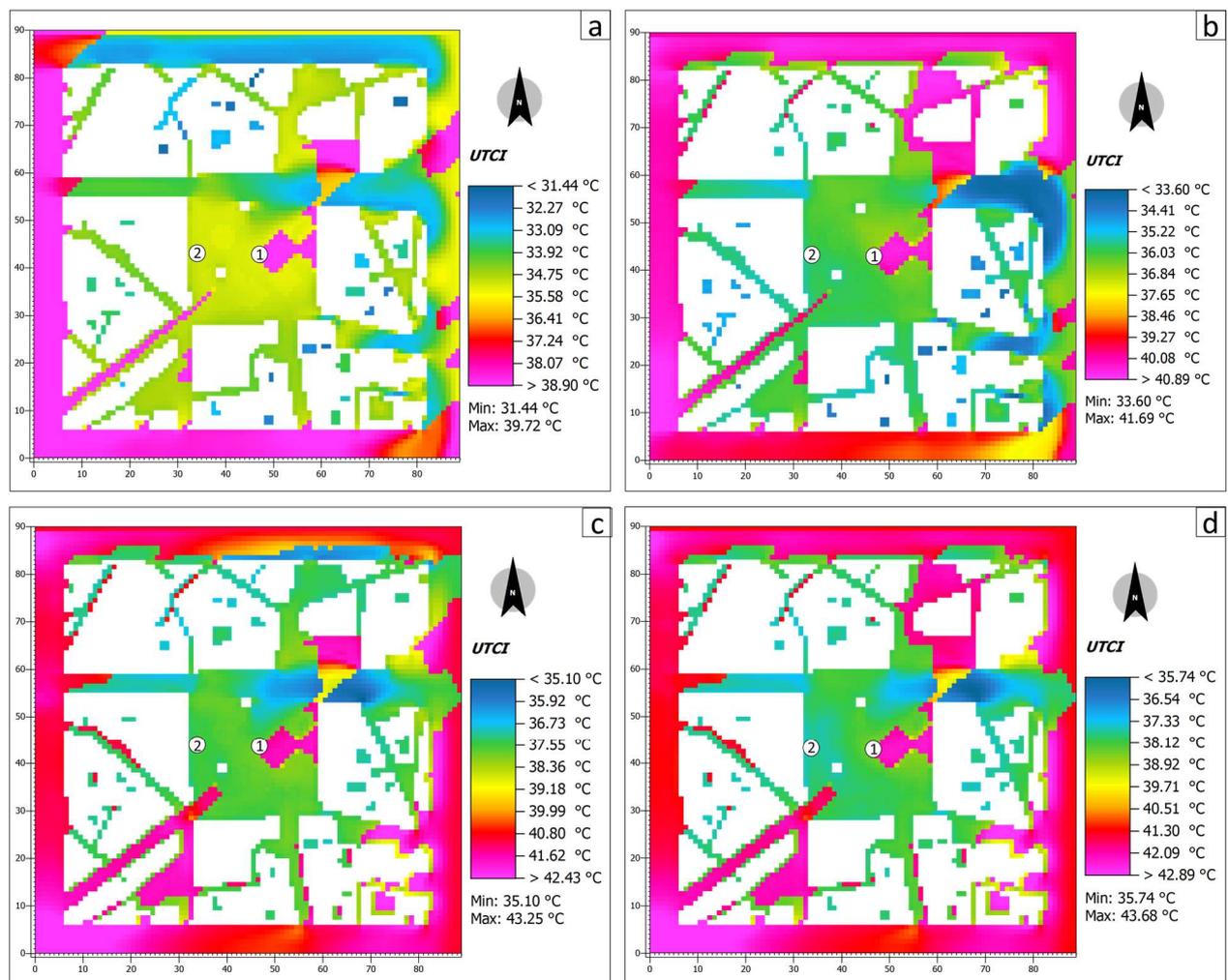


Figure 53 : Carte de l'UTCI pour le deuxième scénario d'hauteur de la placette de la vieille ville : a) hauteur 30%, b) hauteur 50%, c) hauteur 70%, d) hauteur 100%

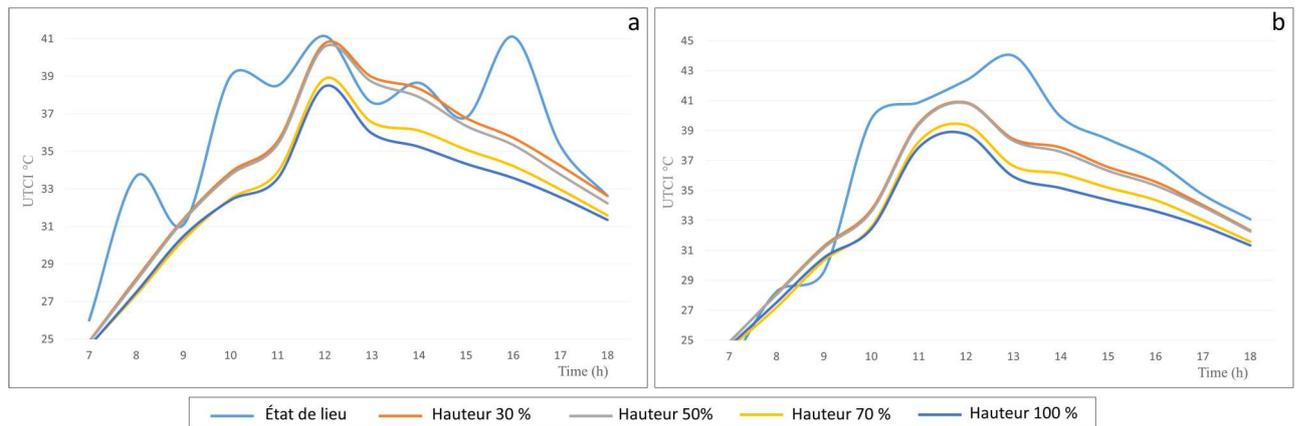


Figure 54 : Graphe représentant l'UTCI enregistré dans deux récepteurs de la placette de la vieille ville pour le deuxième scénario d'hauteur : a) récepteur 01, b) récepteur 02

### 3. Impact de la densité du bâti

#### 3.1. Impact de la densité du bâti sur les paramètres climatiques

##### 3.1.1. Température de l'air

#### -Cours El-Bouni

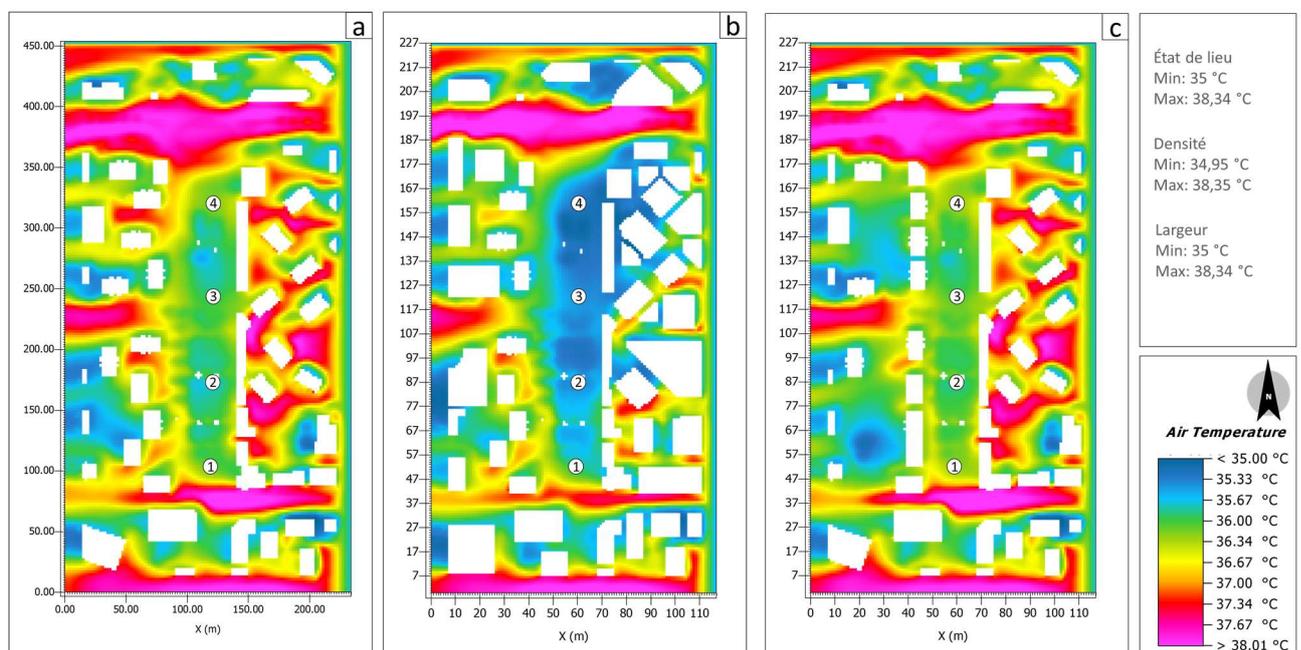


Figure 55 : Carte de la Température de l'air pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

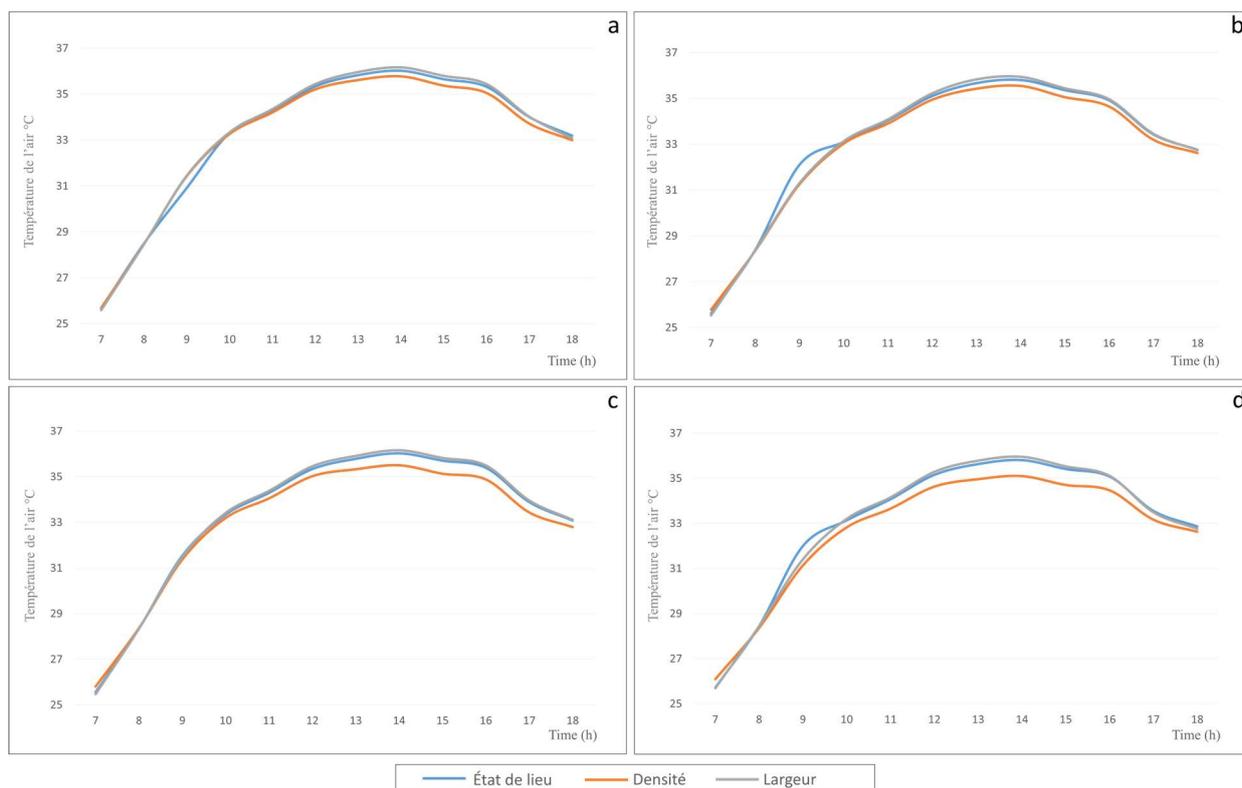


Figure 56 : Graphe représentant la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 3.1.2. Humidité relative

#### -Cours El-Bouni

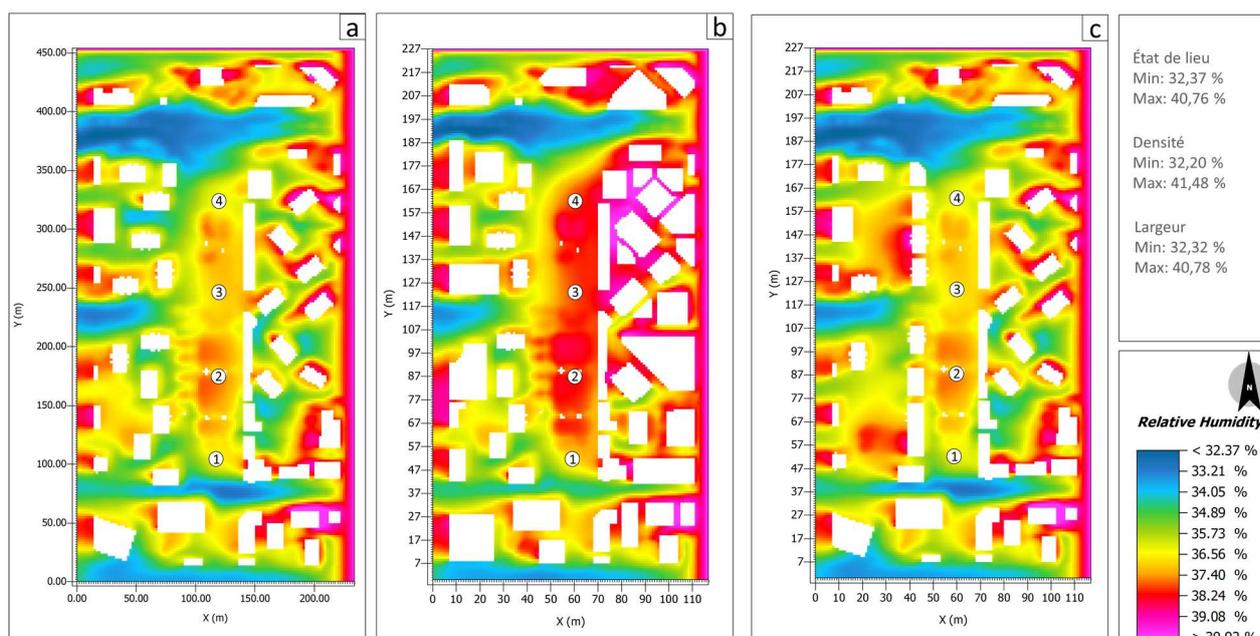


Figure 57 : Carte de l'Humidité relative pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

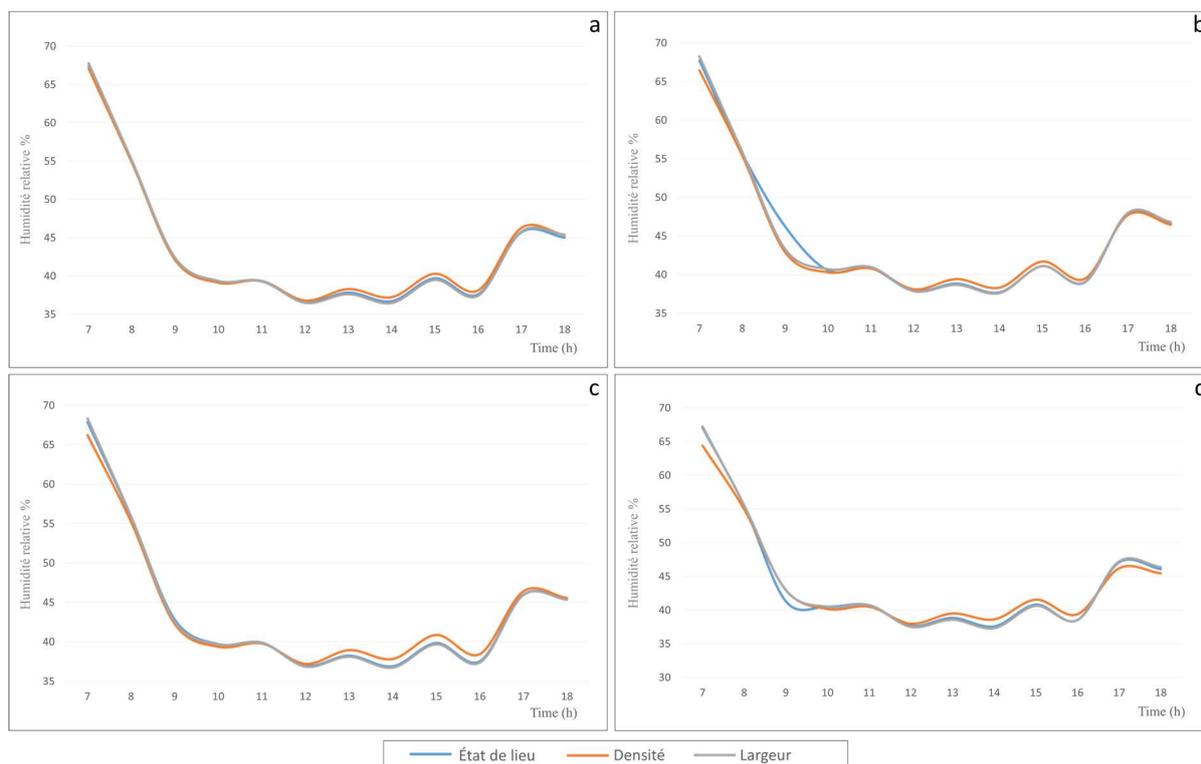


Figure 58 : Graphe représentant l’Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 3.1.3. Vitesse de l’air

#### -Cours El-Bouni

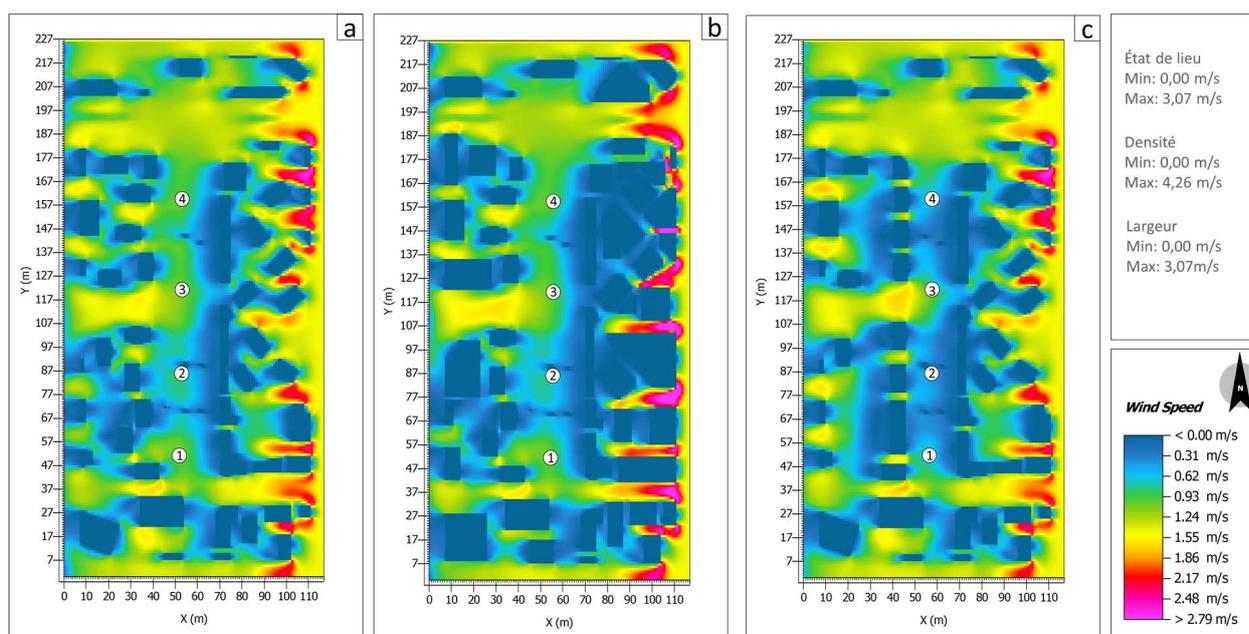


Figure 59 : Carte de la vitesse de l’air pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

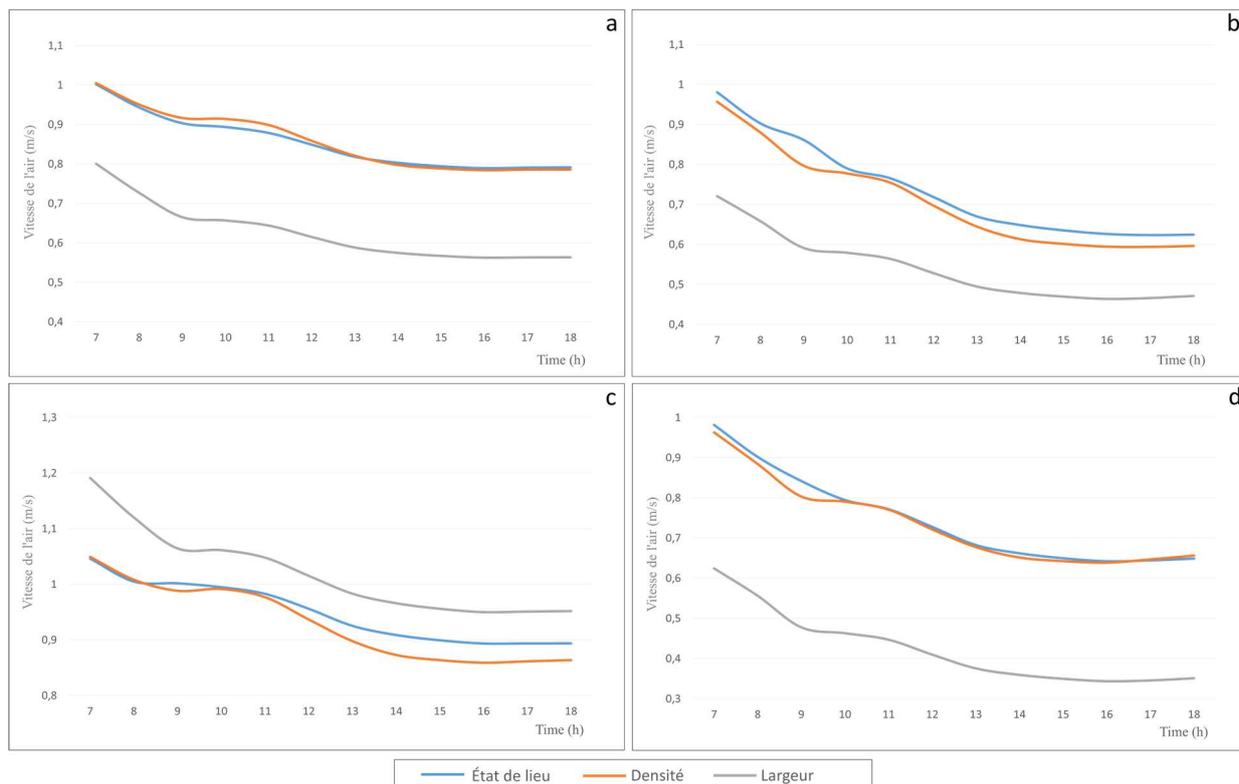


Figure 60 : Graphe représentant la vitesse de l'air enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 3.1.4. Température moyenne radiante

#### -Cours El-Bouni

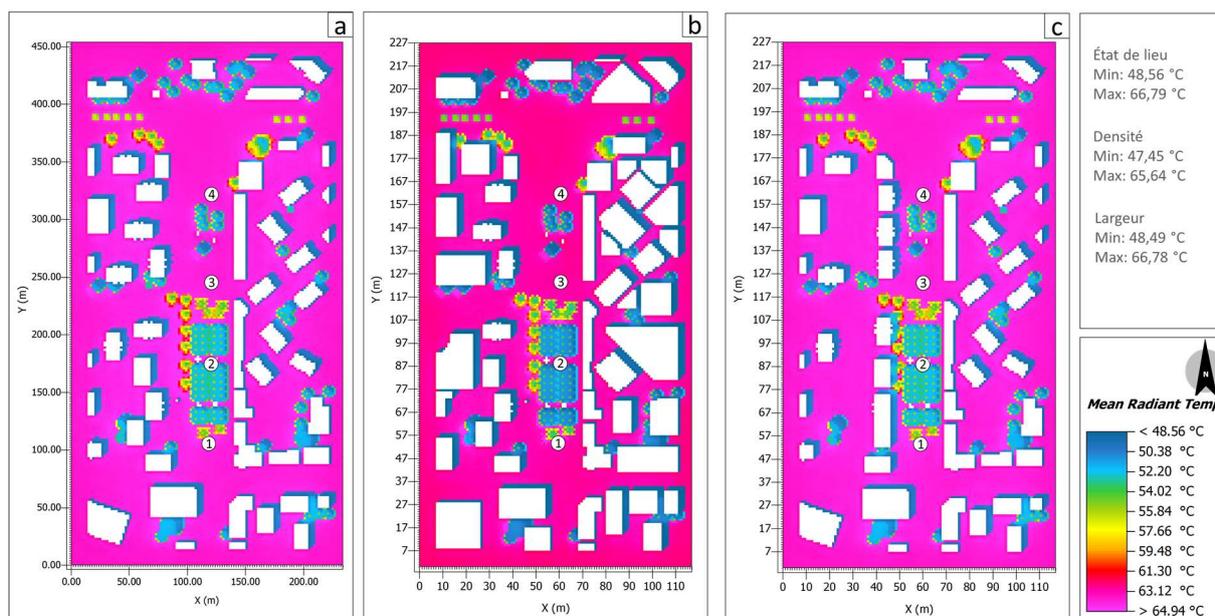


Figure 61 : Carte de la Température moyenne radiante pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

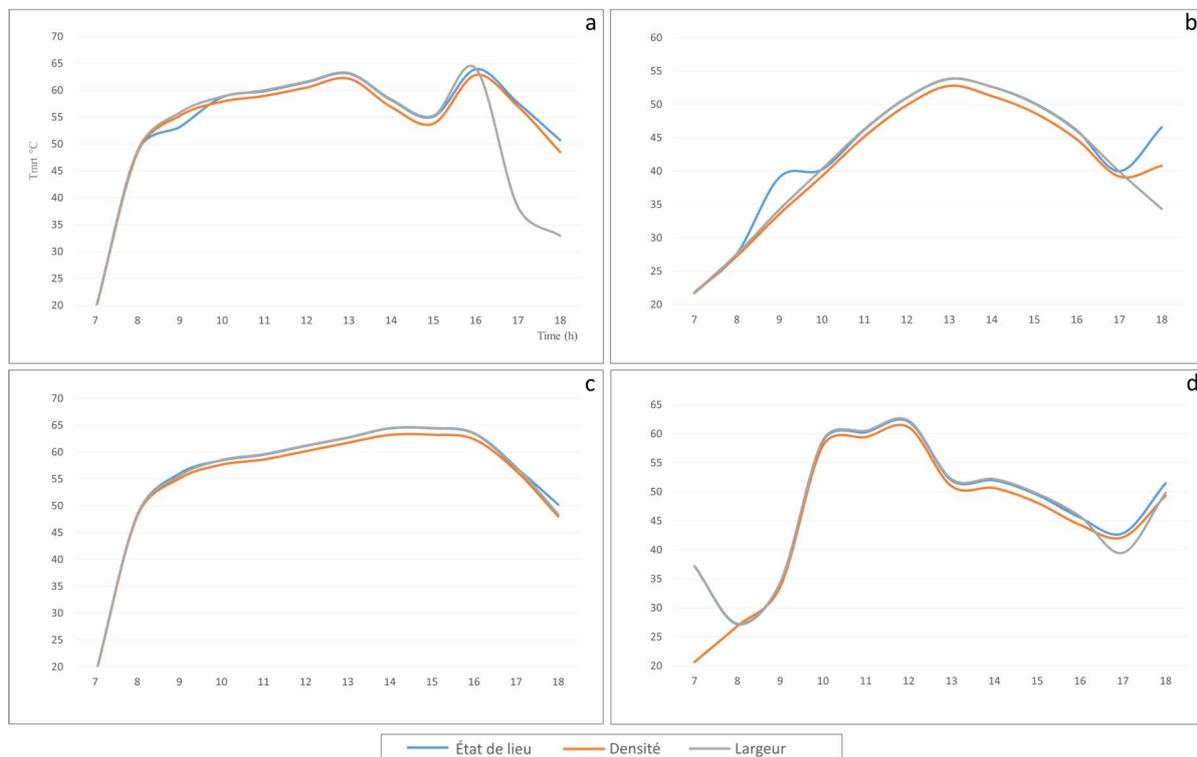


Figure 62 : Graphe représentant la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 3.2.Impact de la densité du bâti sur les indices de confort thermique

#### 3.2.1. PET

#### -Cours El-Bouni

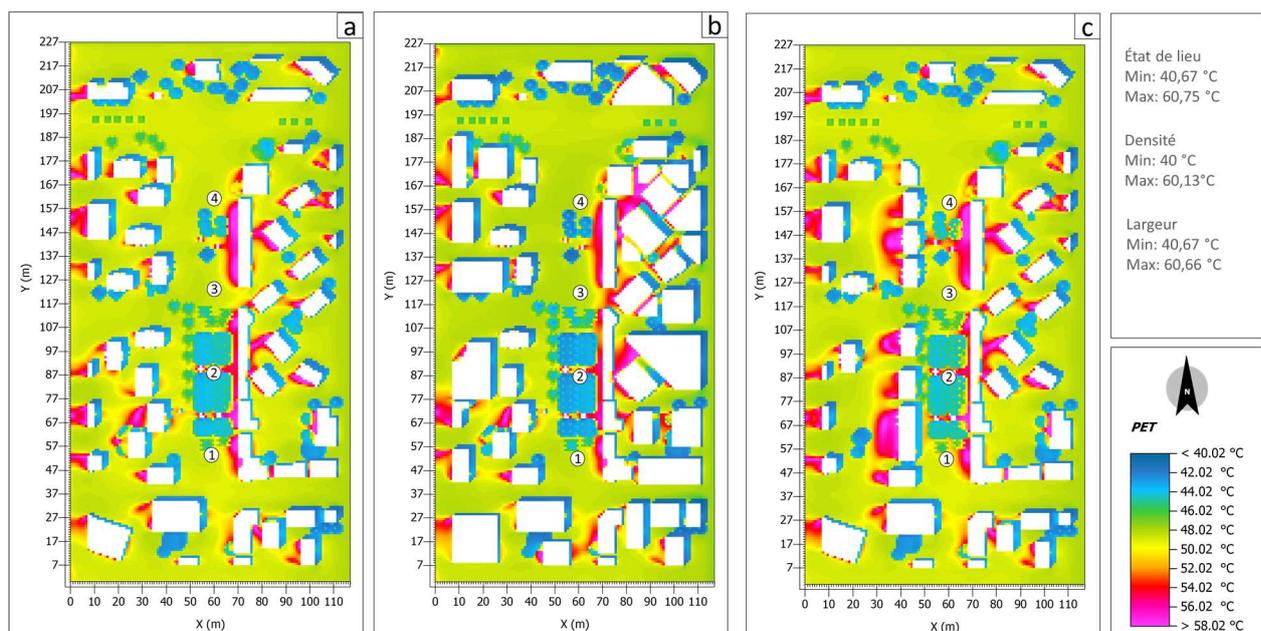


Figure 63 : Carte du PET pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

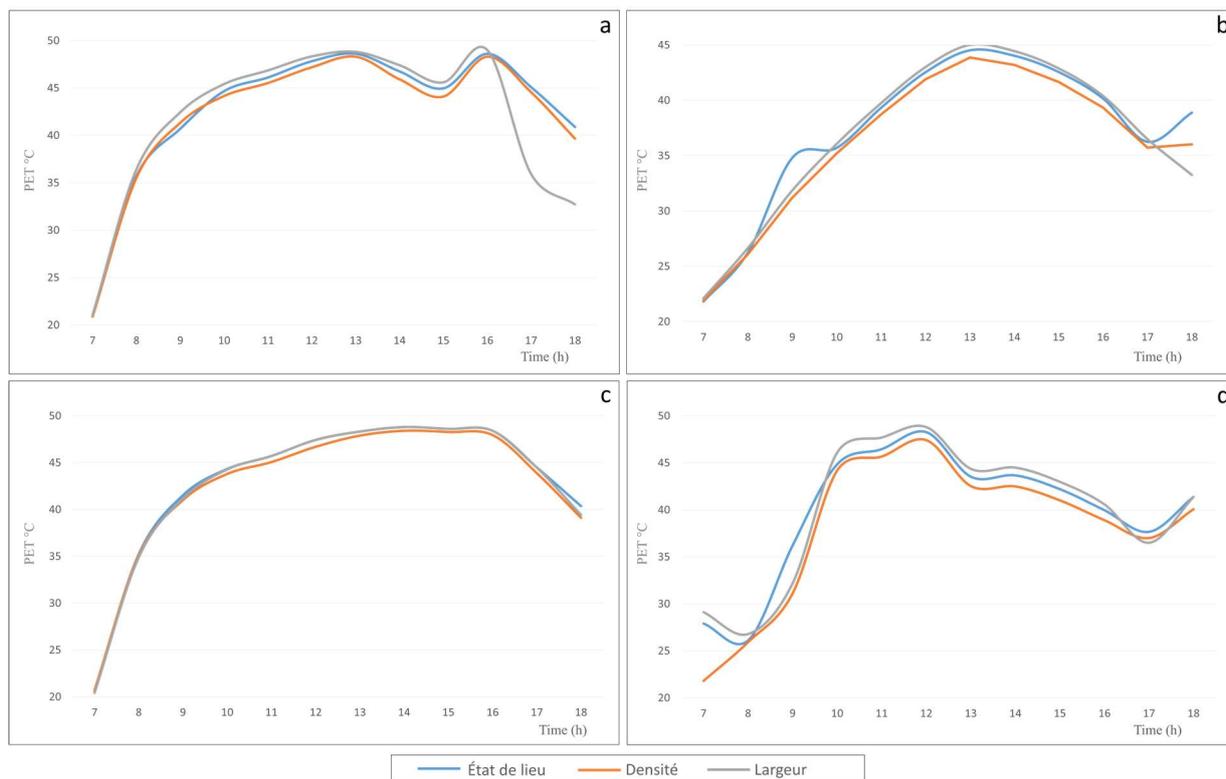


Figure 64 : Graphe représentant le PET enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 3.2.2. SET

#### -Cours El-Bouni

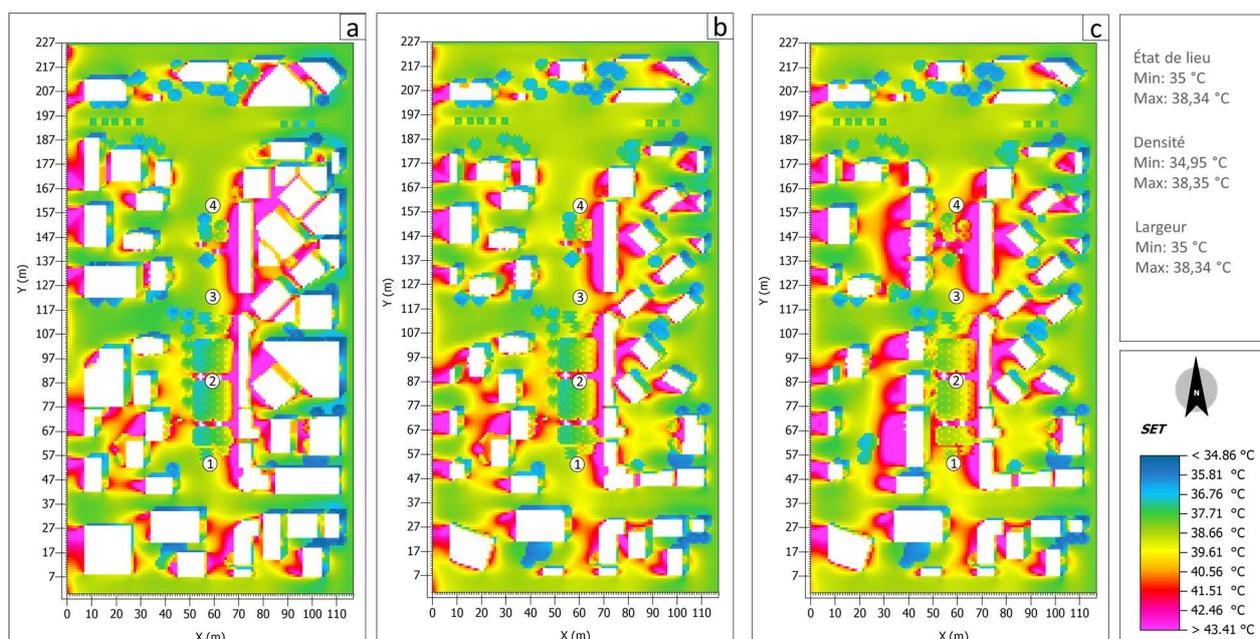


Figure 65 : Carte du SET pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

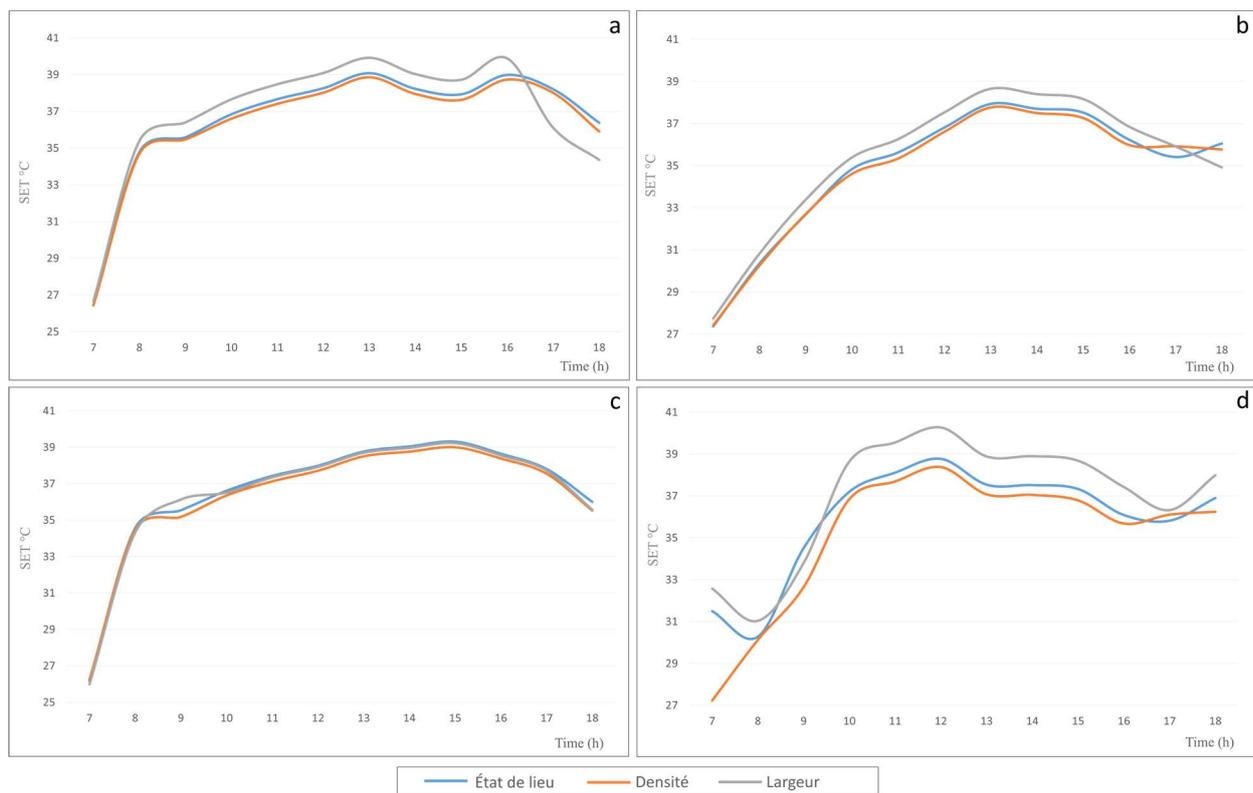


Figure 66 : Graphe représentant le SET enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 3.2.3. UTCI

#### -Cours El-Bouni

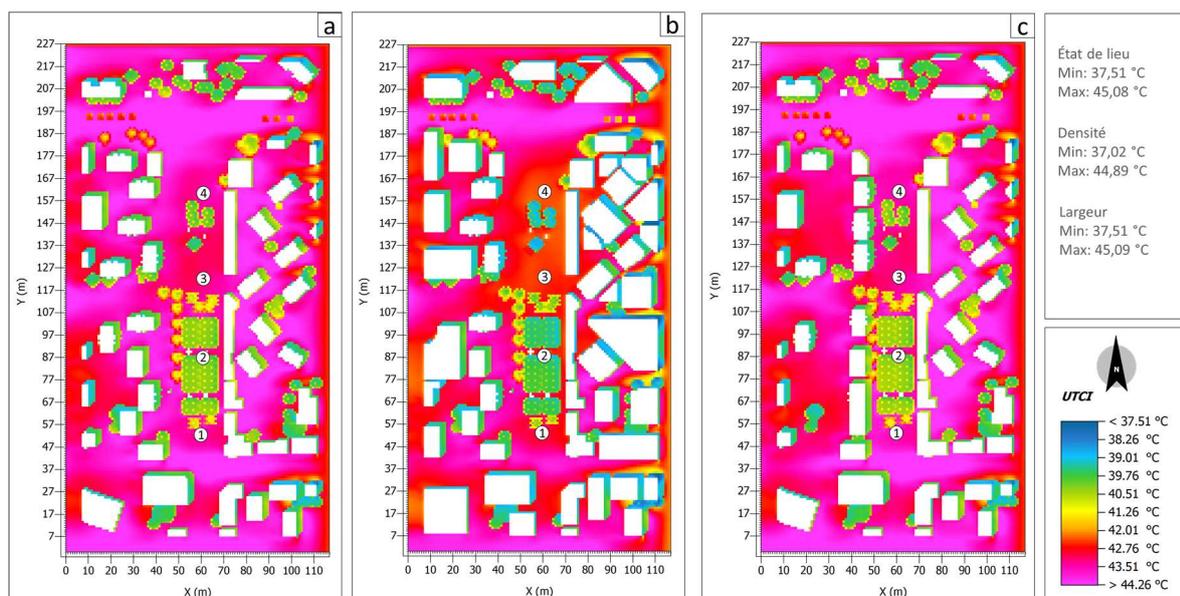


Figure 67 : Carte de l'UTCI pour le e scénario de la densité du cours El-Bouni : a) état de lieu, b) densité, c) largeur

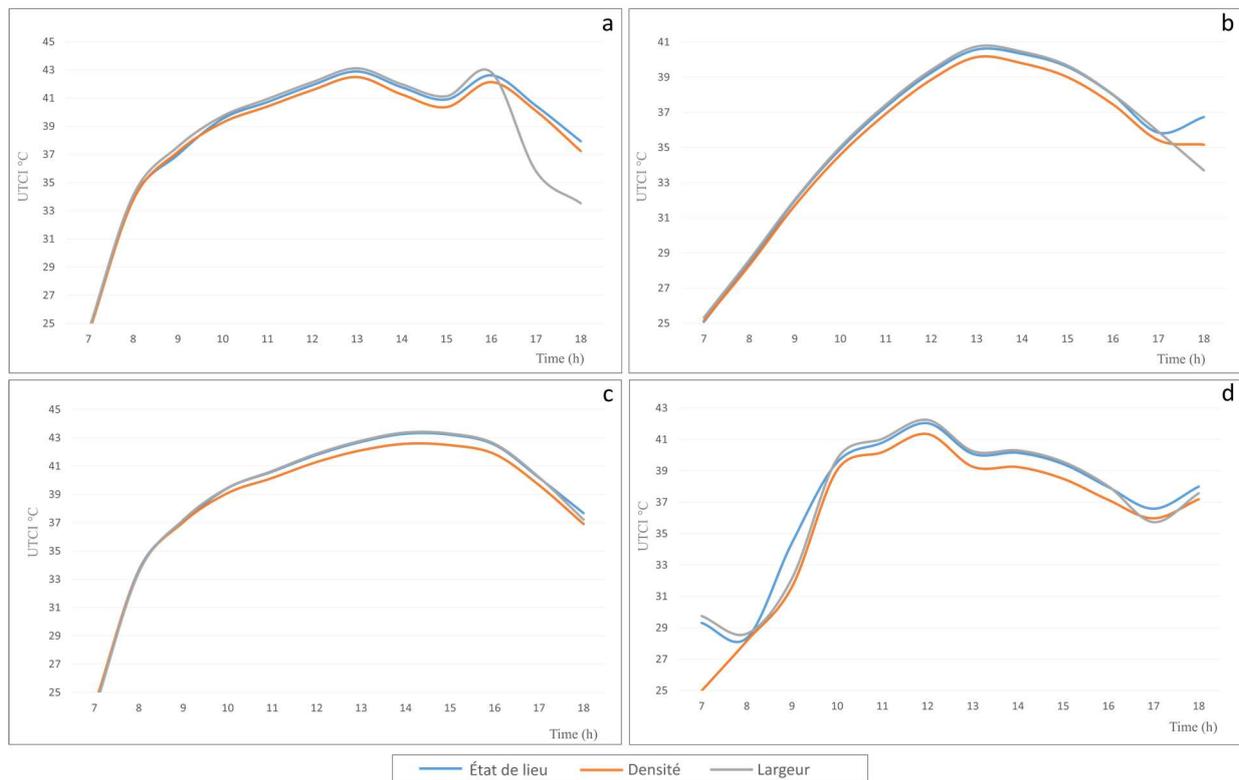


Figure 68 : Graphe représentant l'UTCI enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de la densité : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### 4. Impact de l'orientation sans végétation

##### 4.1.1. Température de l'air

##### -Cours El-Bouni

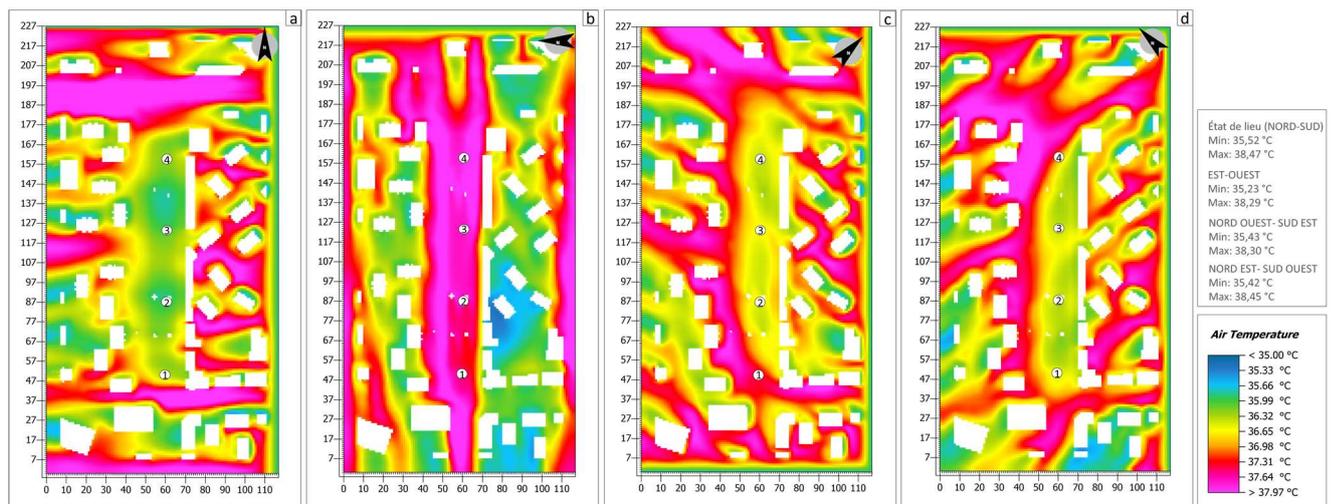


Figure 69 : Carte de la Température de l'air pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

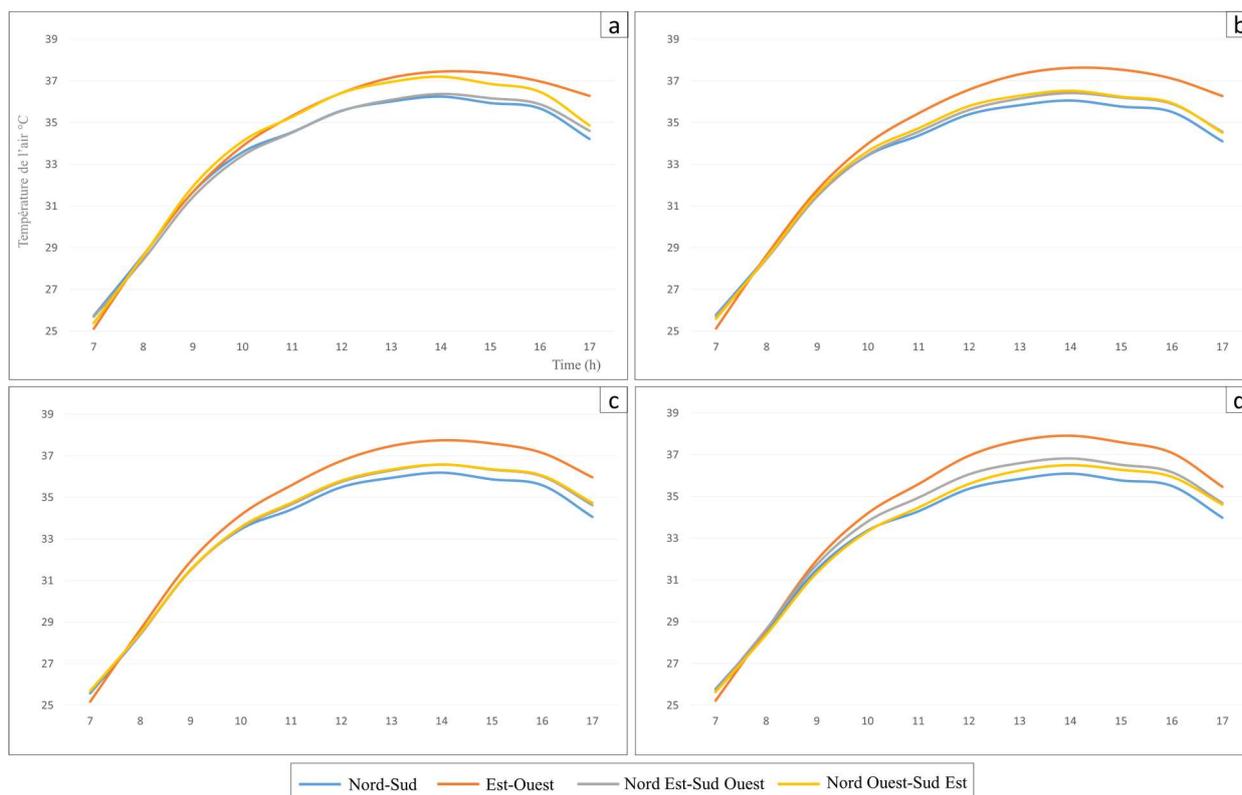


Figure 70 : Graphe représentant la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Cours de la Révolution**



Figure 71 : Carte de la Température de l'air pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

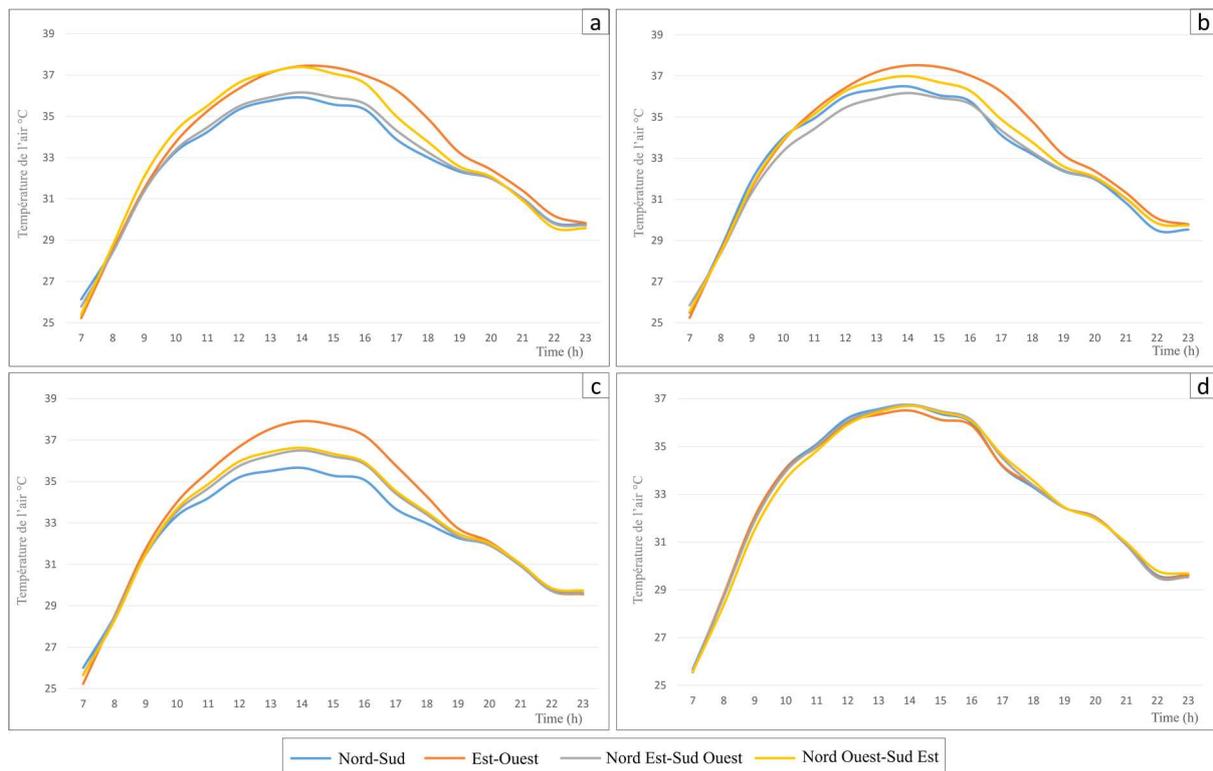


Figure 72 : Graphe représentant la Température de l'air enregistrée dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 4.1.2. Humidité relative

#### -Cours El-Bouni

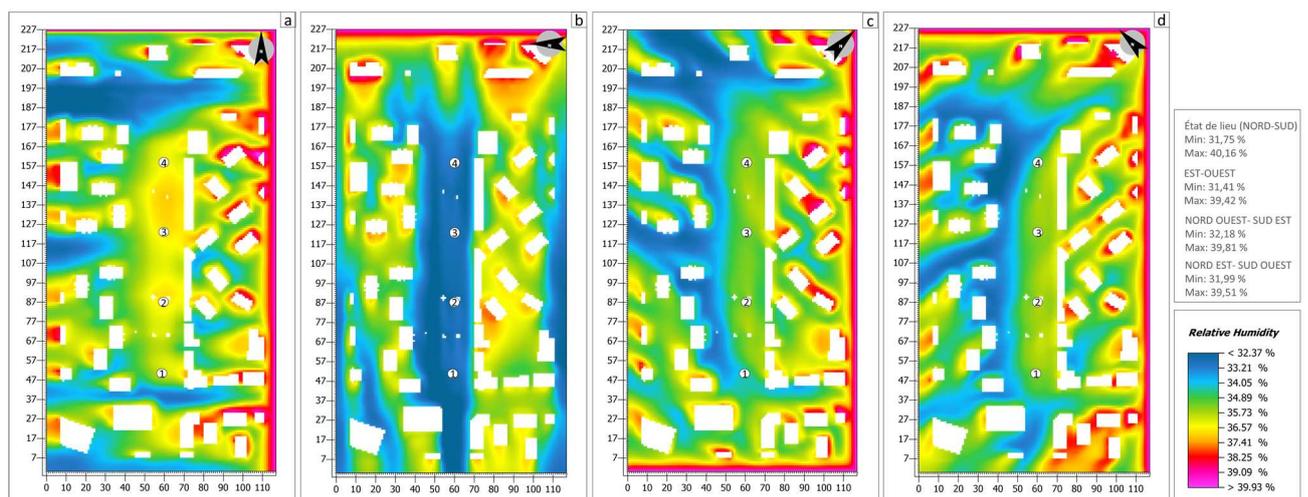


Figure 73 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

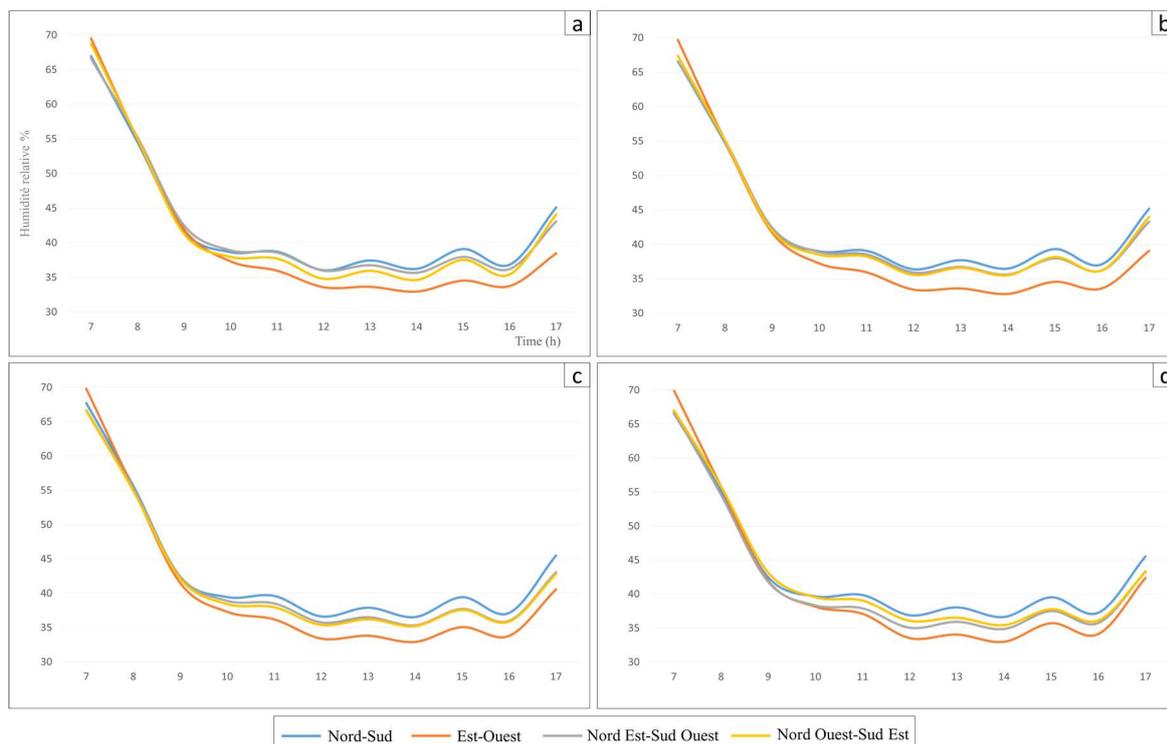


Figure 74 : Graphe représentant l'Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### -Cours de la Révolution

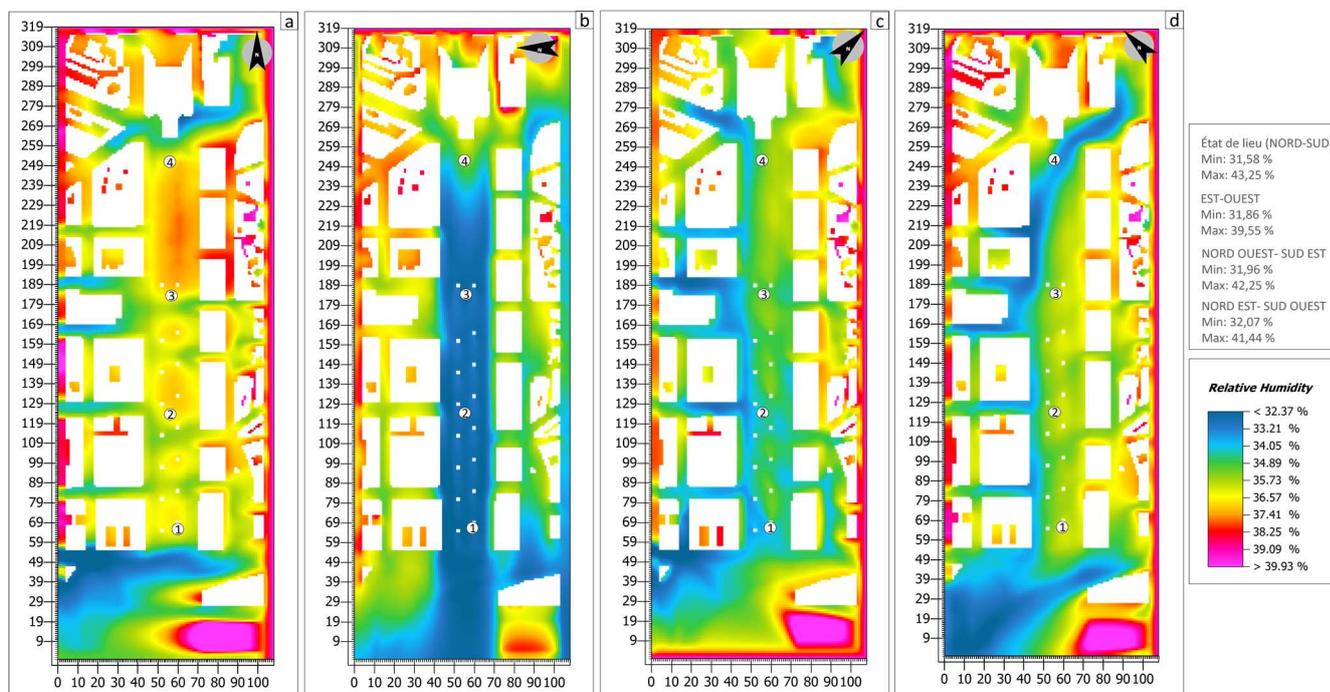


Figure 75 : Carte de l'Humidité relative pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

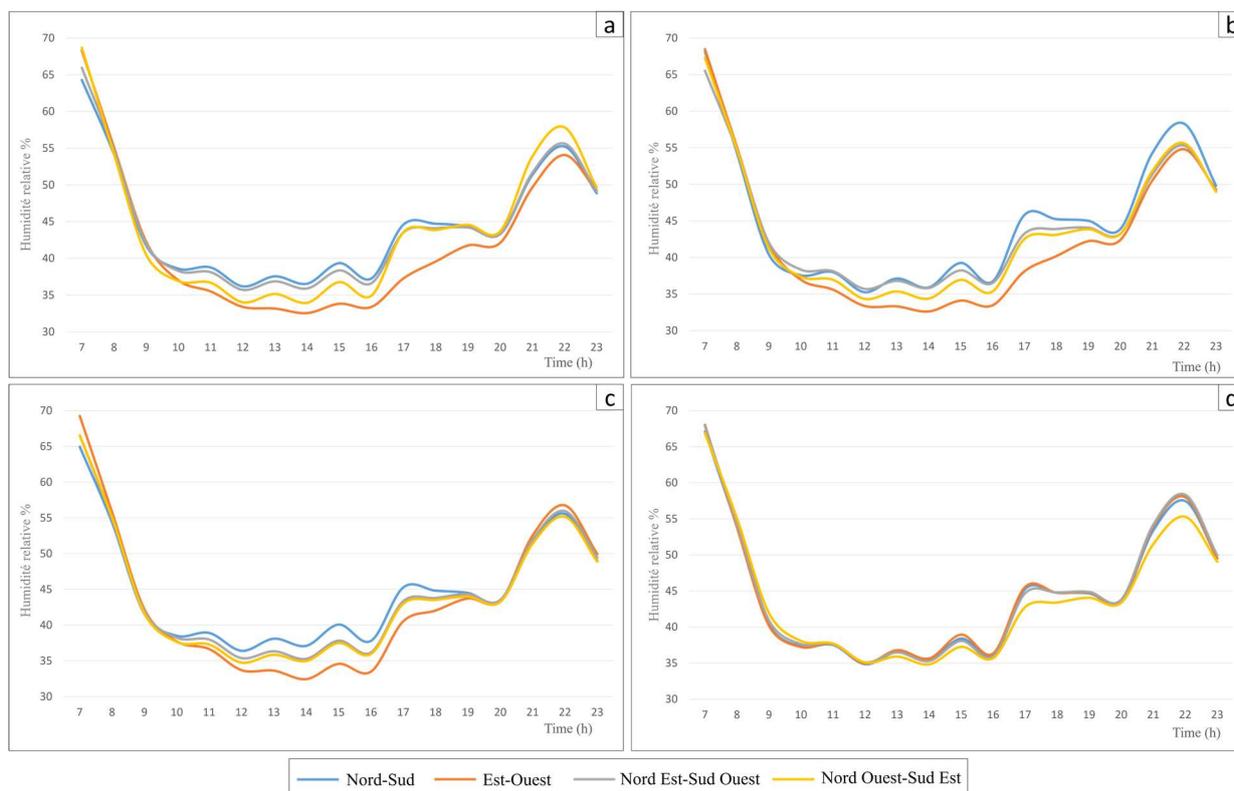


Figure 76 : Graphe représentant l’Humidité relative enregistrée dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l’orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 4.1.3. Vitesse de l’air

#### -Cours El-Bouni

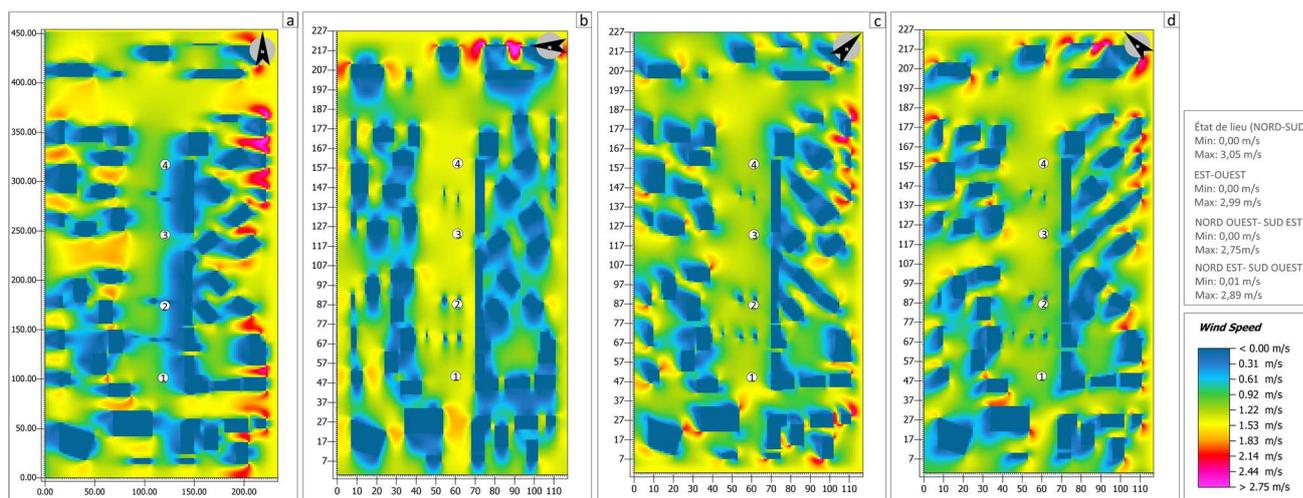


Figure 77 : Carte de la vitesse de l’air pour le scénario de l’orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

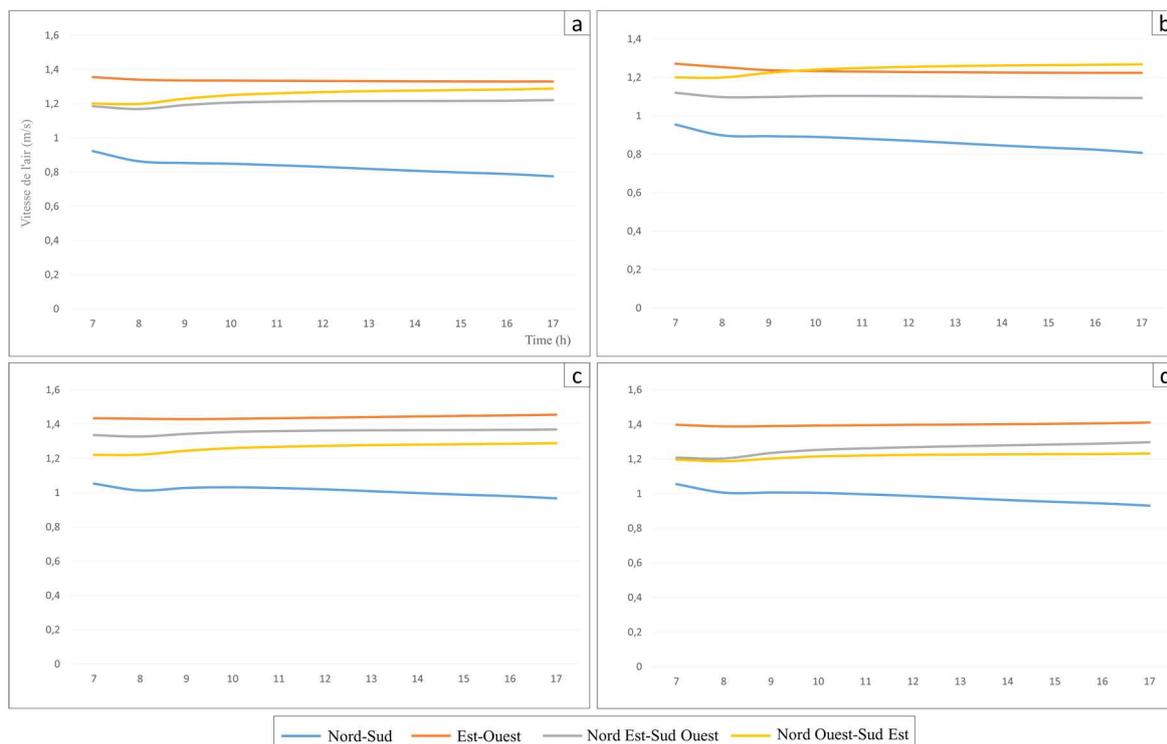


Figure 78 : Graphe représentant la vitesse de l'air enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Cours de la Révolution**

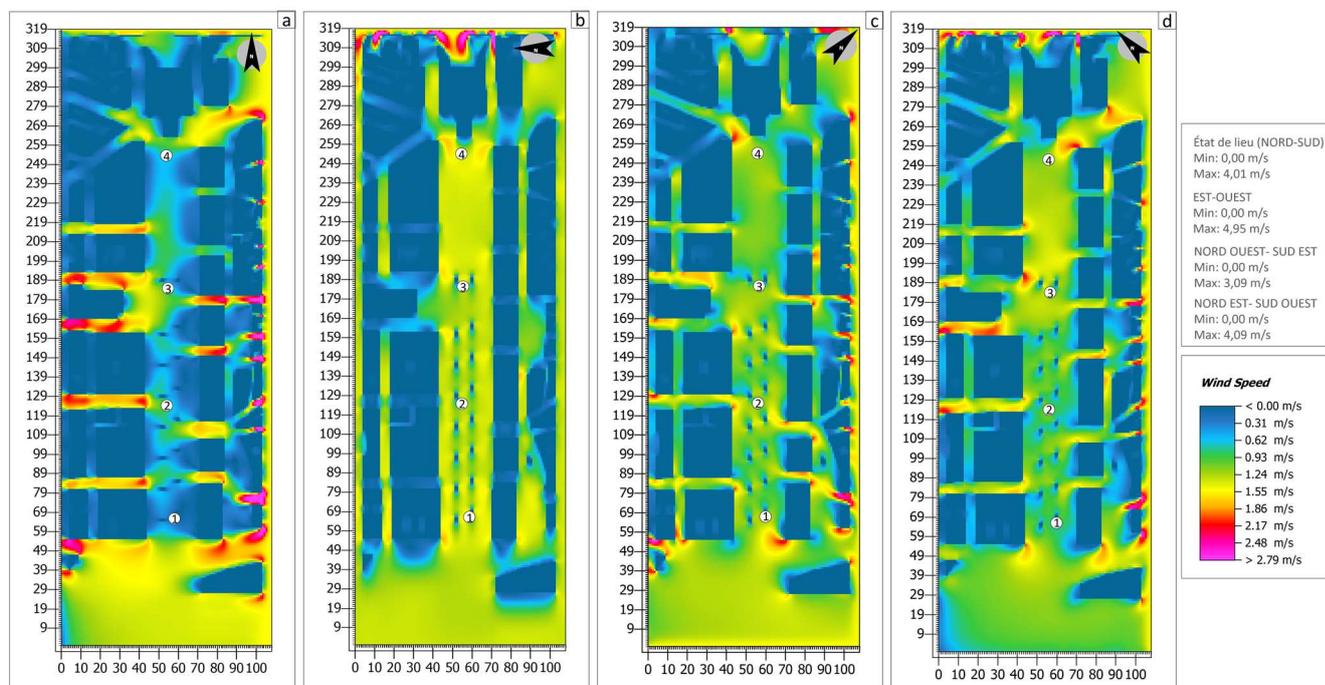


Figure 79 : Carte de la vitesse de l'air pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

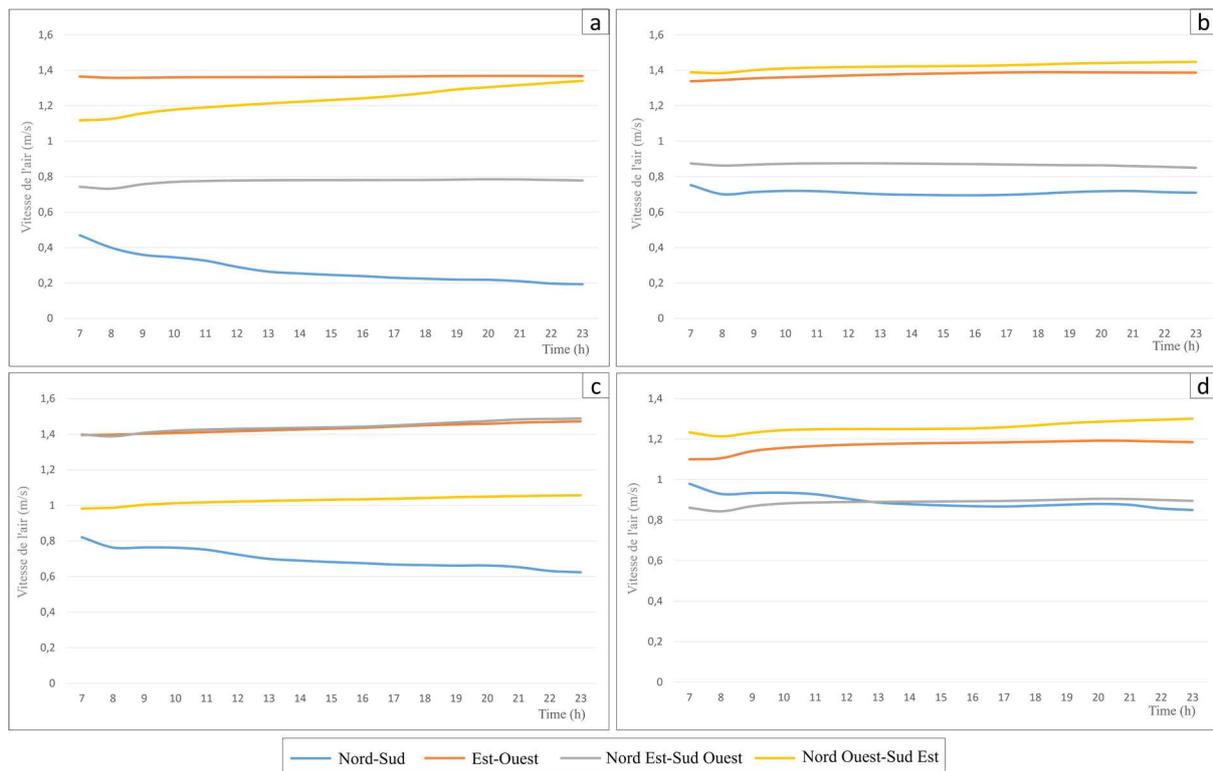


Figure 80 : Graphe représentant la vitesse de l'air enregistrée dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

#### 4.1.4. Température moyenne radiante

##### -Cours El-Bouni

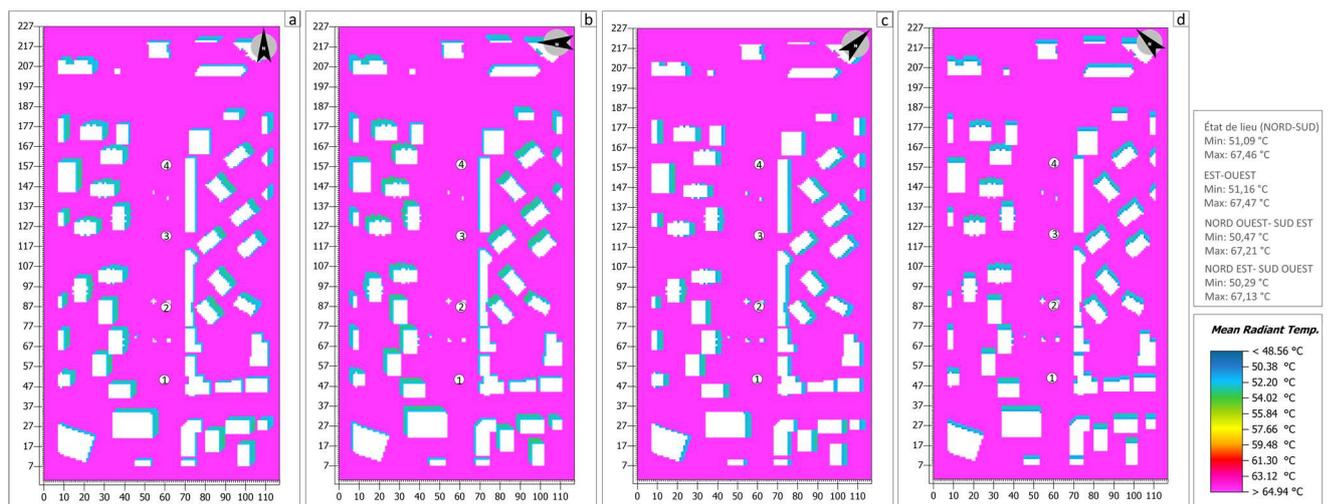


Figure 81 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

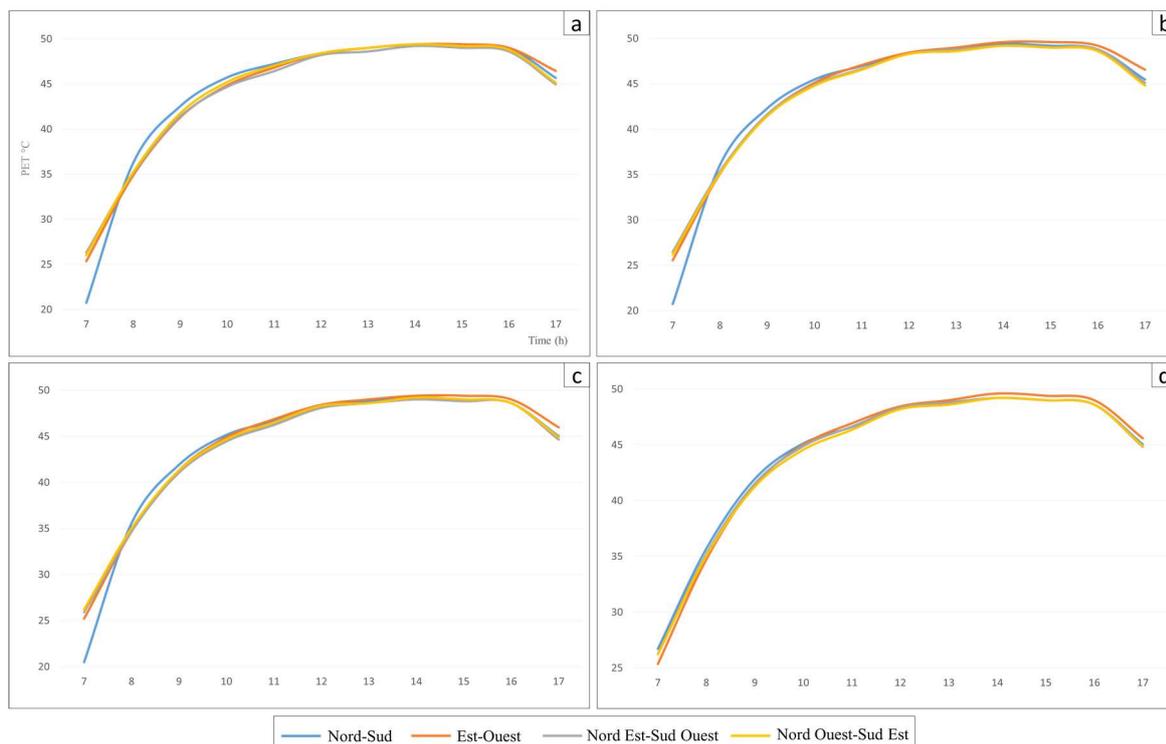


Figure 82 : Graphe représentant la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Cours de la Révolution**

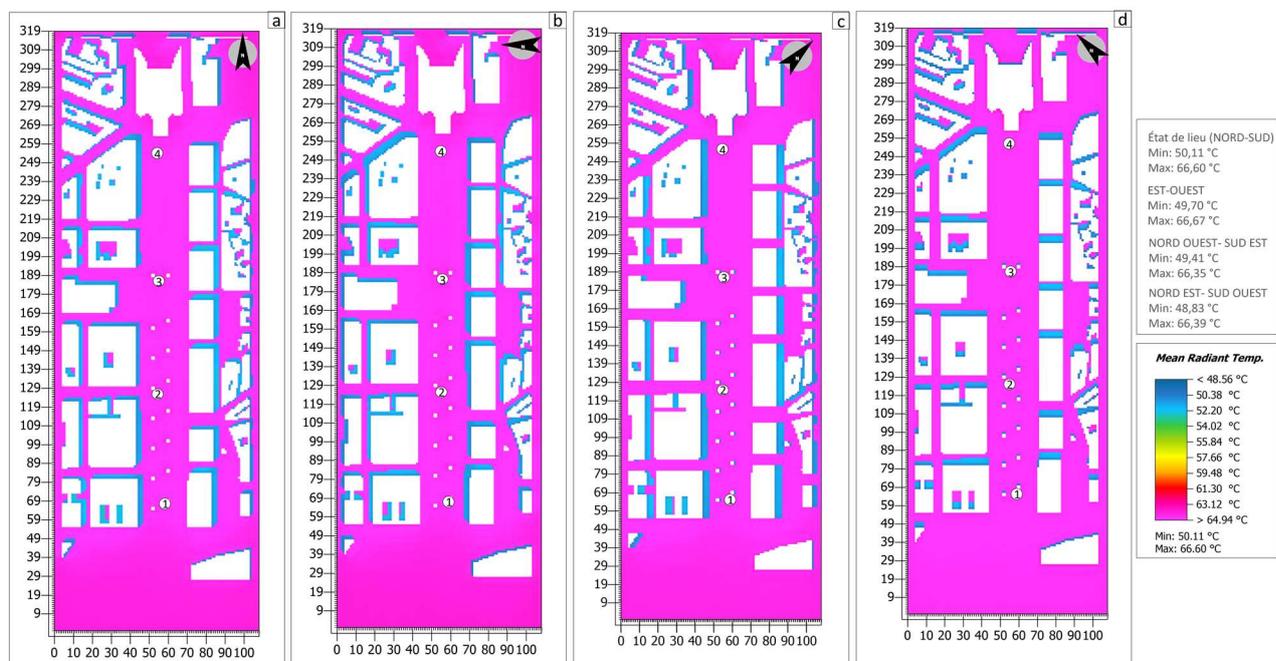


Figure 83 : Carte de la Température moyenne radiante pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

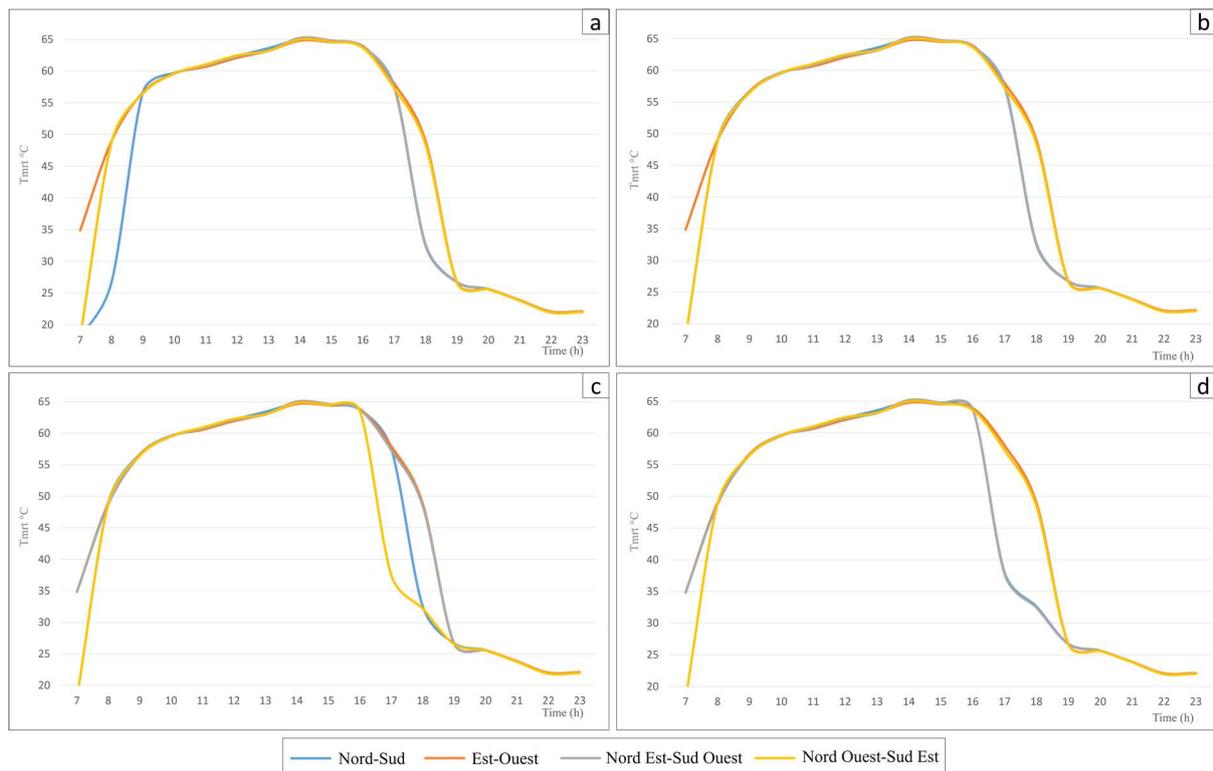


Figure 84 : Graphe représentant la Température moyenne radiante enregistrée dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

## 4.2. Impact de l'orientation sur les indices de confort thermique

### 4.2.1. PET

#### -Cours El-Bouni

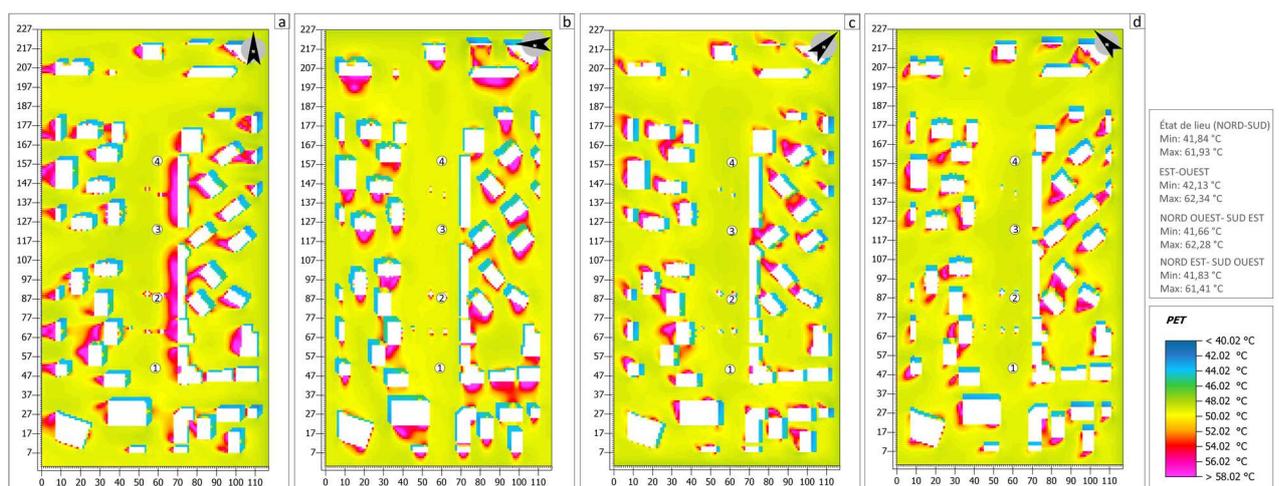


Figure 85 : Carte du PET pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

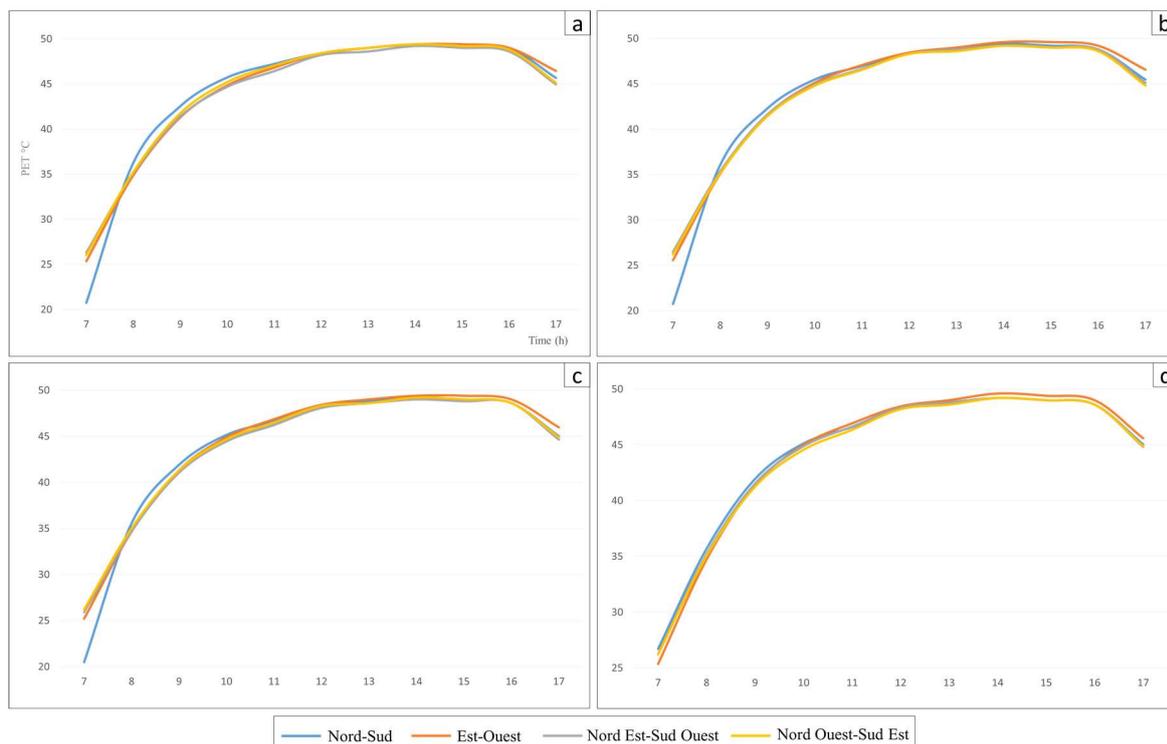


Figure 86 : Graphe représentant le PET enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Cours de la Révolution**

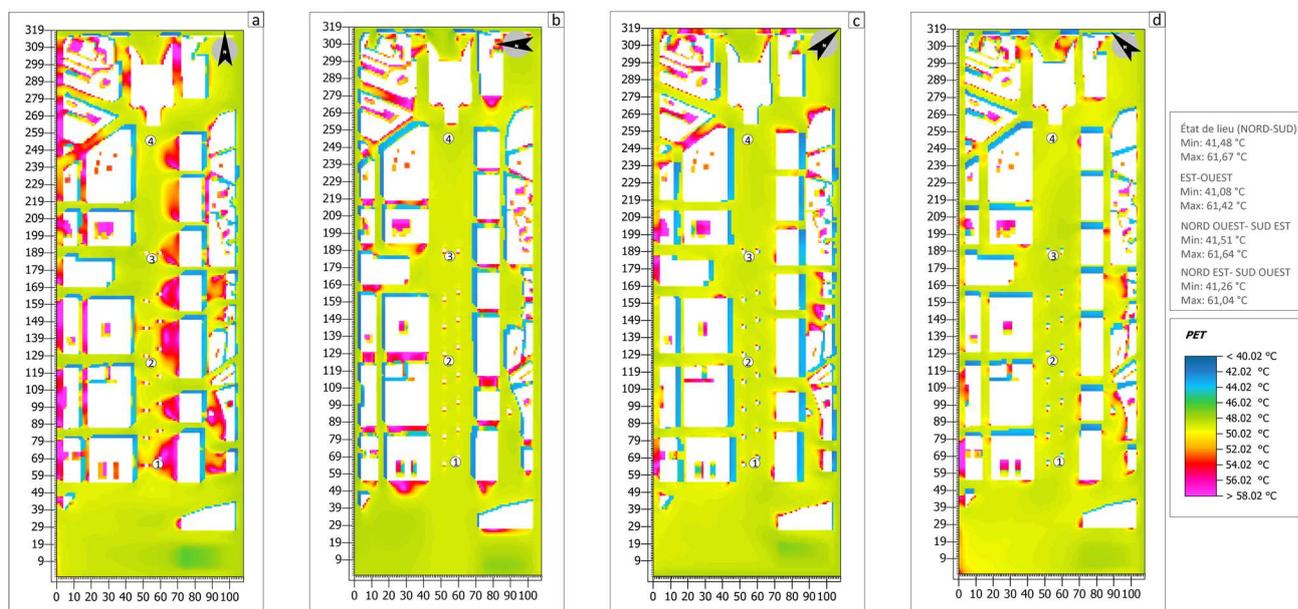


Figure 87 : Carte du PET pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

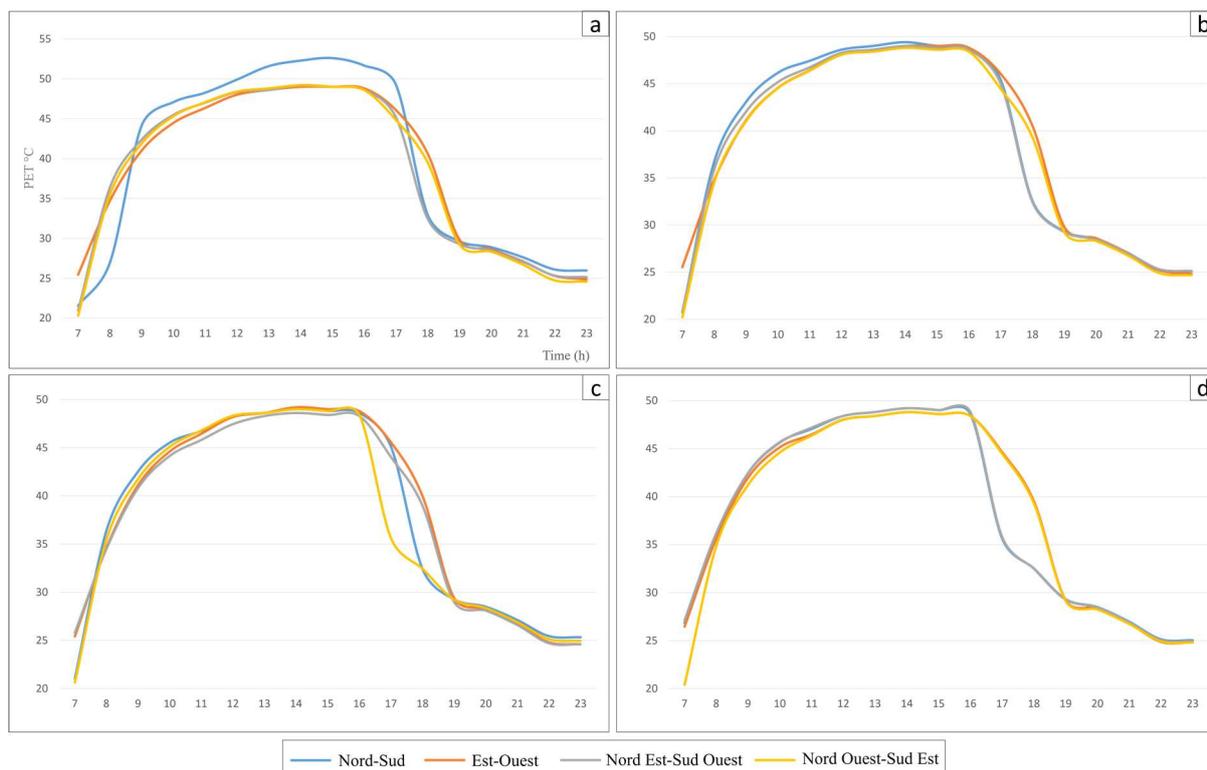


Figure 88 : Graphe représentant le PET enregistré dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 4.2.2. SET

#### -Cours El-Bouni

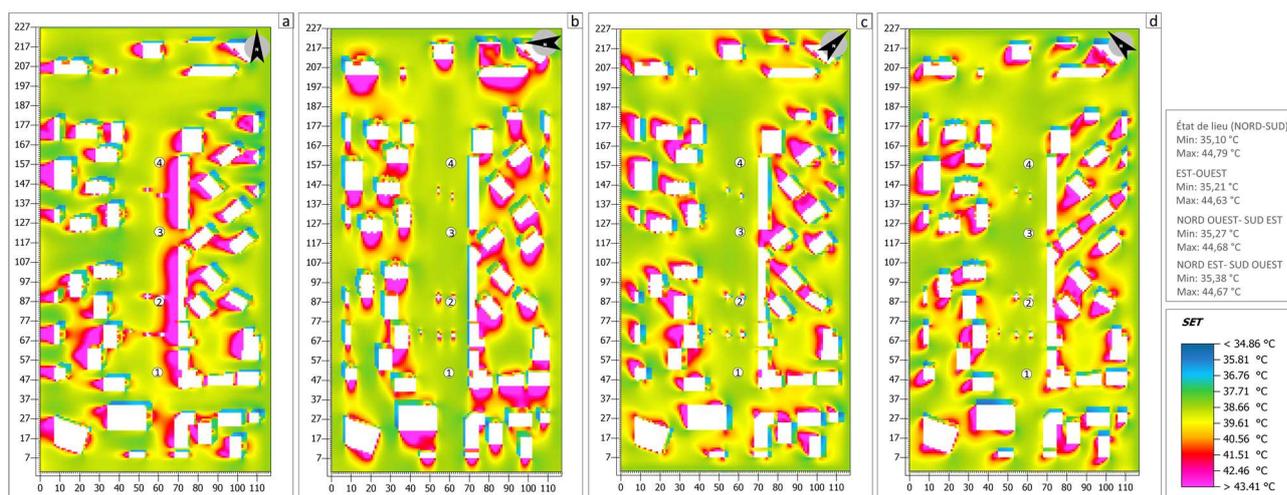


Figure 89 : Carte du SET pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

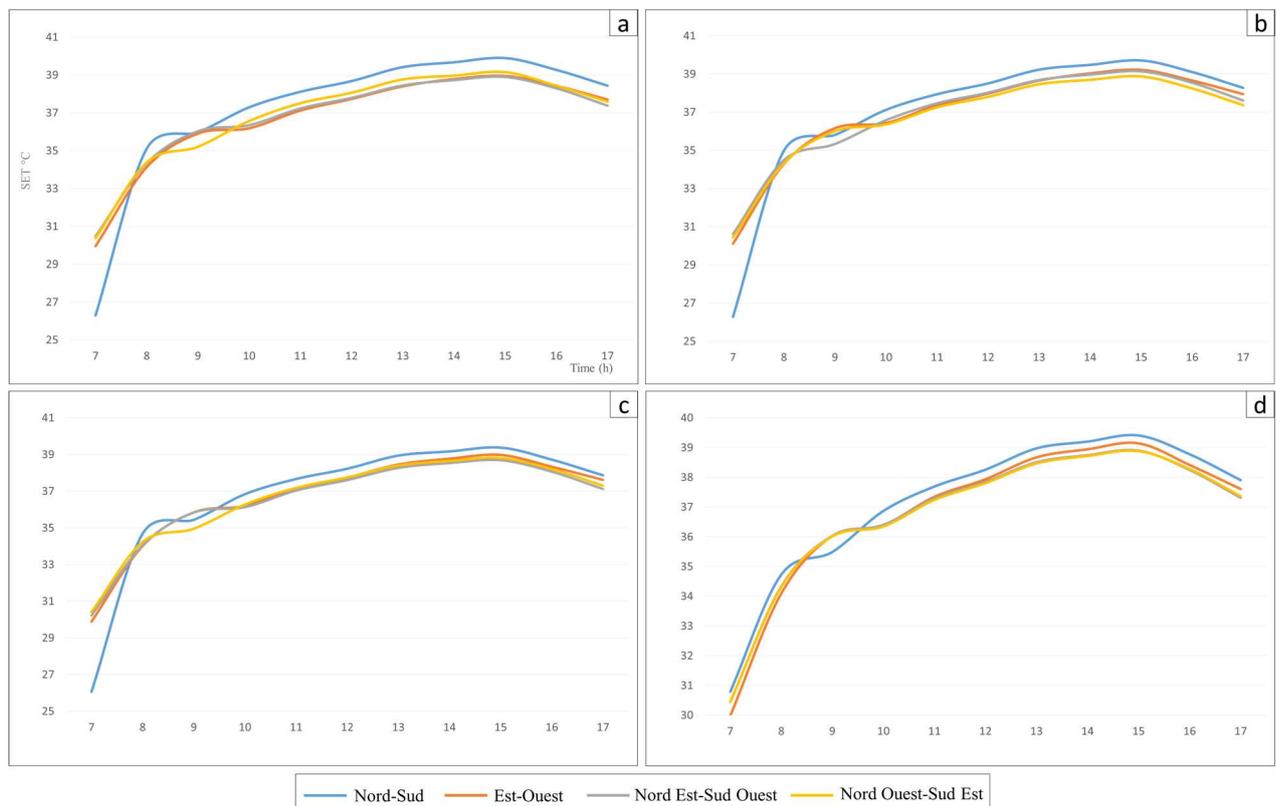


Figure 90 : Graphe représentant le SET enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### -Cours de la Révolution

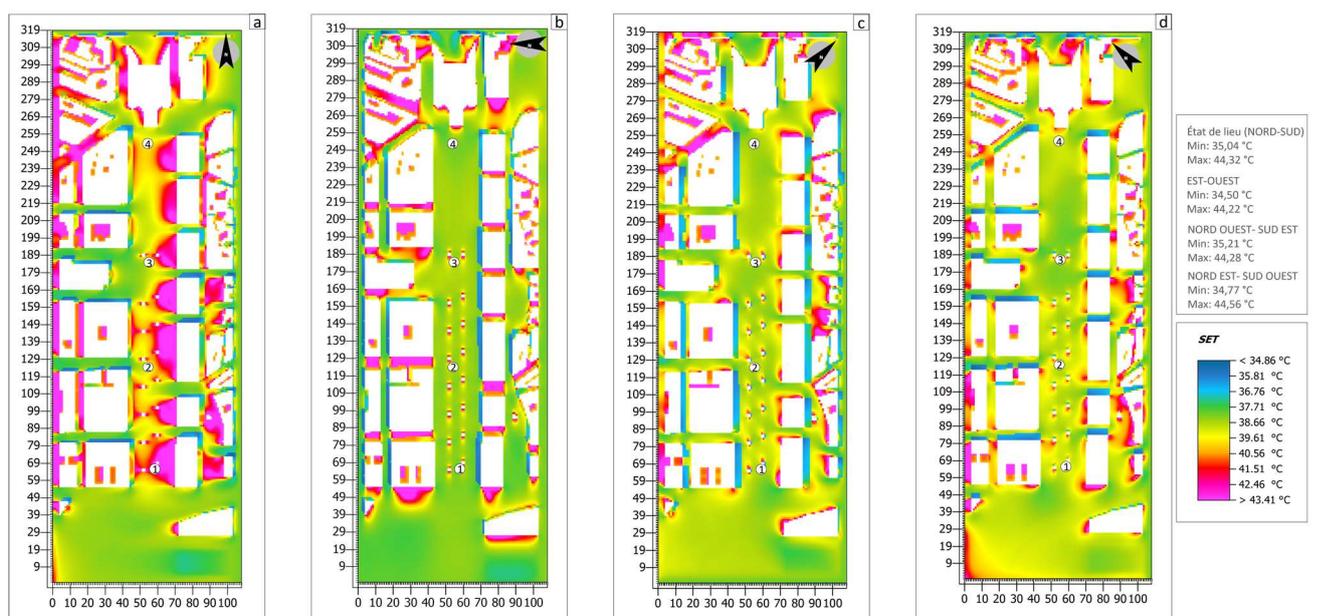


Figure 91 : Carte du SET pour le scénario de l'orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

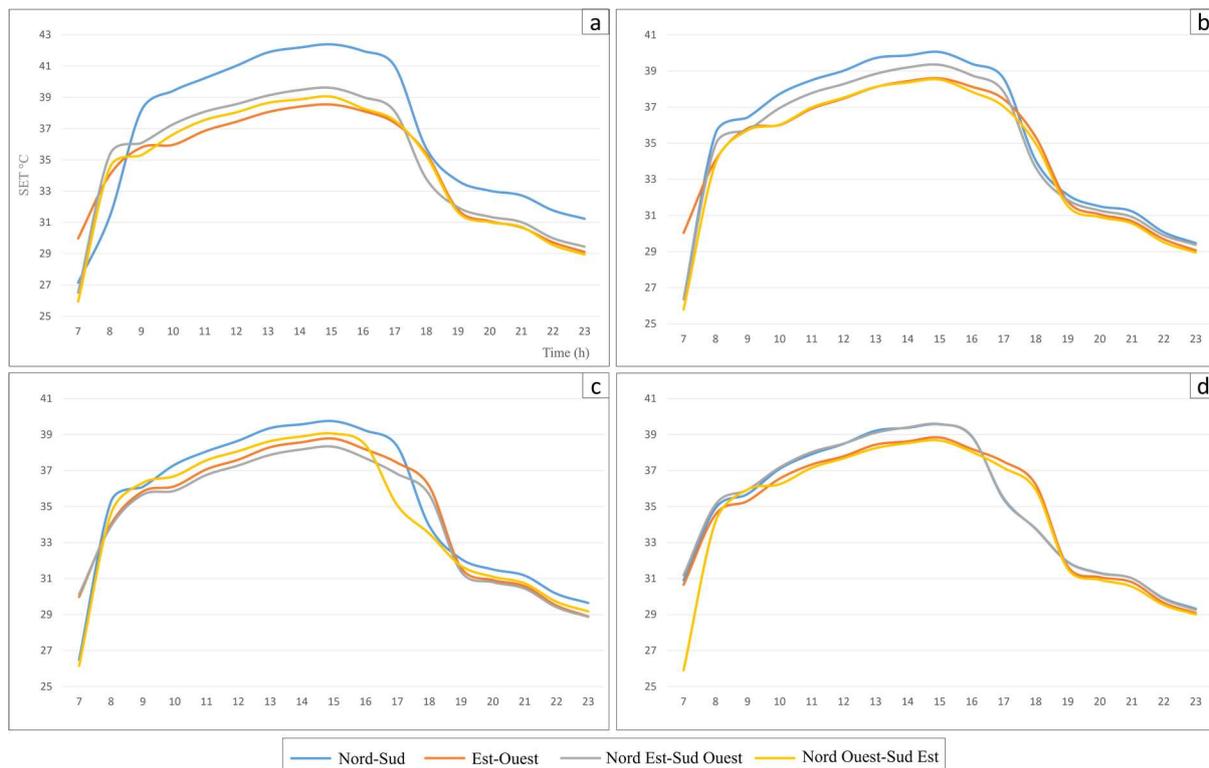


Figure 92 : Graphe représentant le SET enregistrée dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### 4.2.3. UTCI

#### -Cours El-Bouni

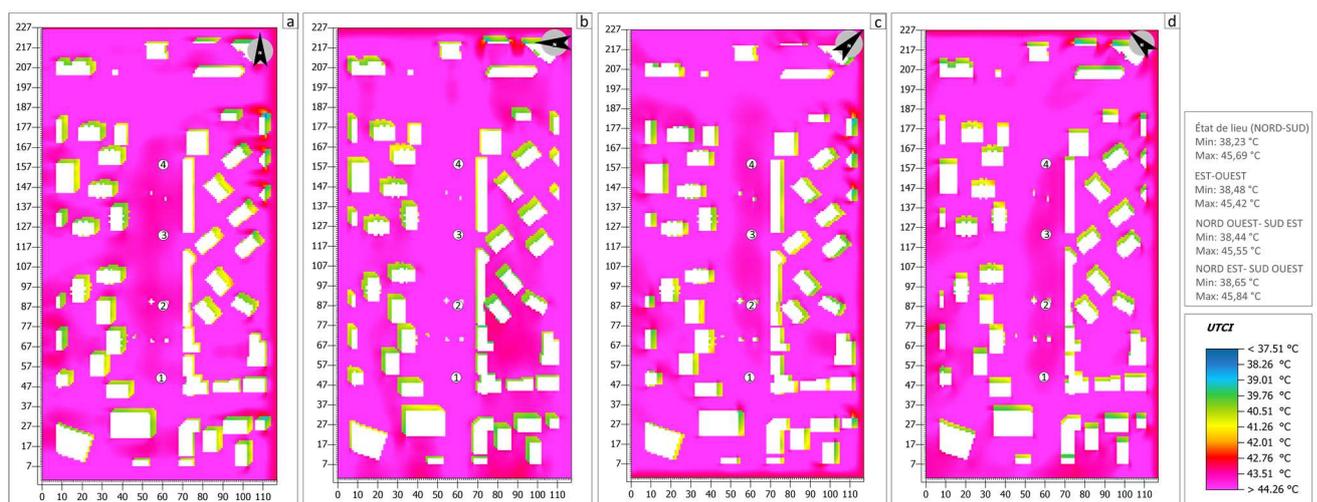


Figure 93 : Carte de l'UTCI pour le scénario de l'orientation du cours El-Bouni : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, a) Nord Ouest-Sud Est

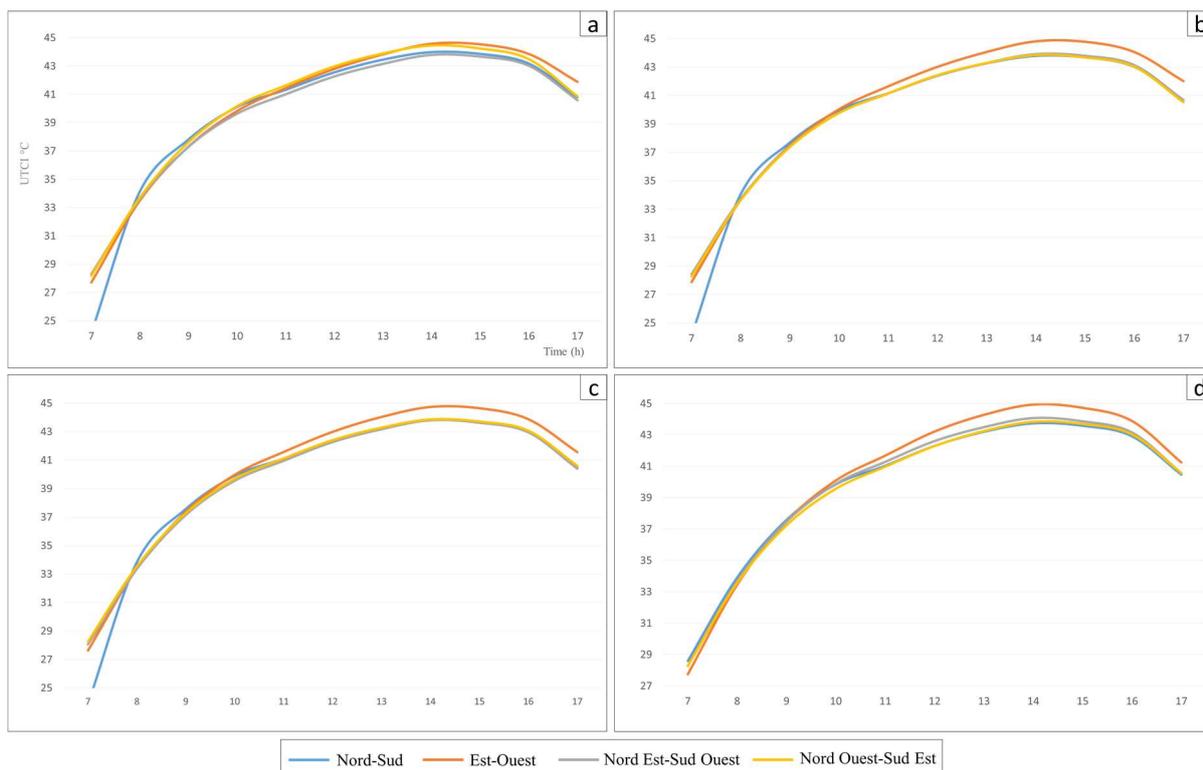


Figure 94 : Graphe représentant l’UTCI enregistré dans deux récepteurs du cours El-Bouni pour le scénario de l’orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

**-Cours de la Révolution**

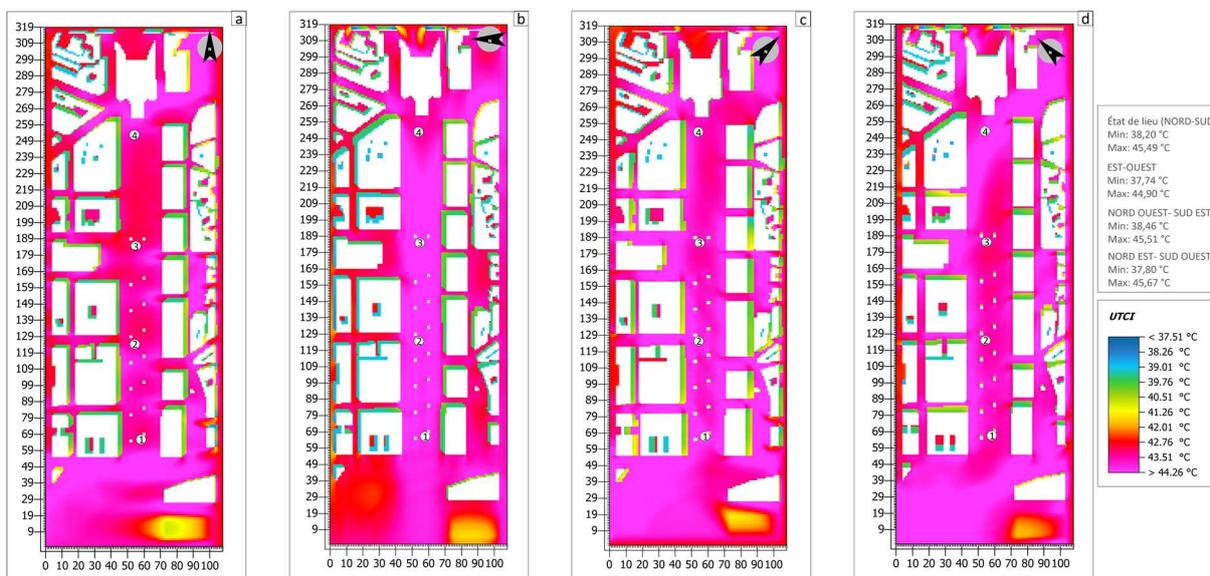


Figure 95 : Carte de l’UTCI pour le scénario de l’orientation du cours de la révolution : a) Nord-Sud, b) Est-Ouest, c) Nord Est-Sud Ouest, d) Nord Ouest-Sud Est

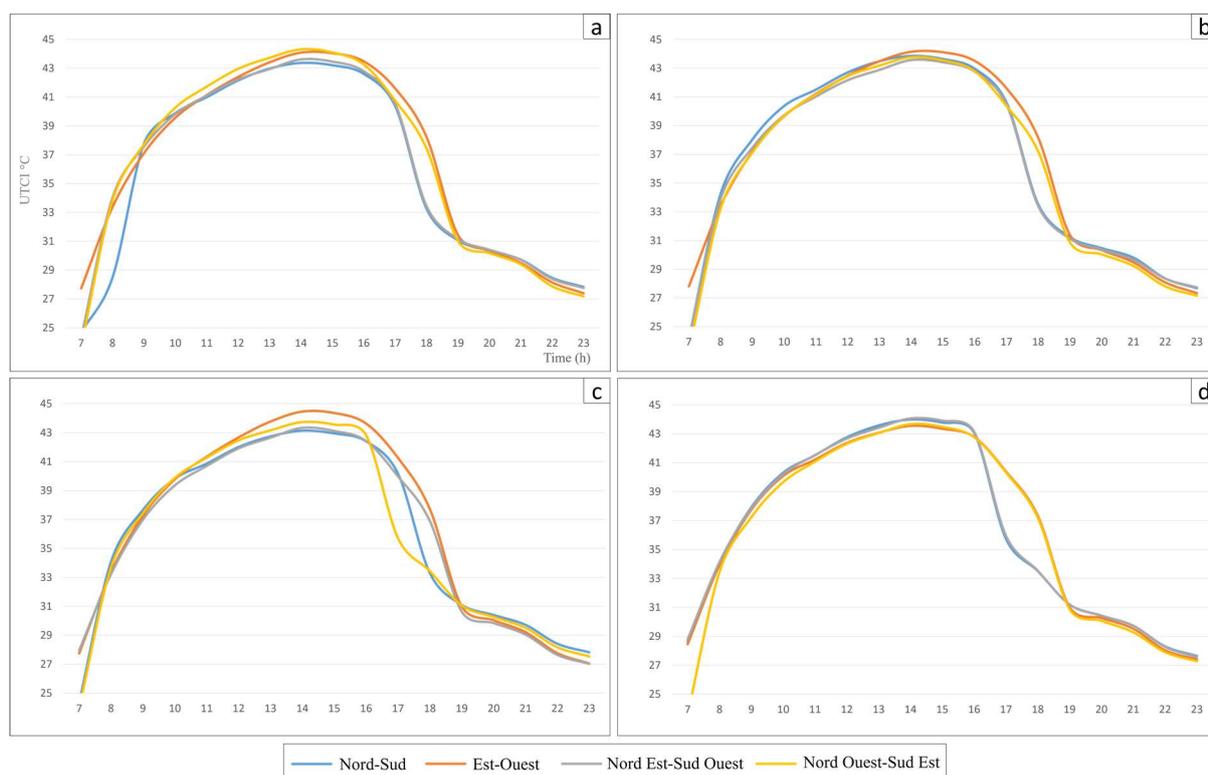


Figure 96 : Graphe représentant l'UTCI enregistré dans deux récepteurs du cours de la révolution pour le scénario de l'orientation : a) récepteur 01, b) récepteur 02, c) récepteur 03, d) récepteur 04

### Résumé

L'îlot de chaleur urbain accroît le risque de stress thermique dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales. La morphologie urbaine est l'un des facteurs qui modifient l'environnement thermique de la ville et qui influent sur le confort thermique des habitants. L'amélioration du confort thermique extérieur dans les espaces publics urbains améliore la qualité de vie et favorise une vie sociale active. Cette thèse étudie l'impact de la morphologie de l'espace public sur le microclimat et le confort thermique extérieur. L'étude se concentre sur cinq places publiques situées dans la ville d'Annaba, en Algérie, afin de comprendre comment la morphologie urbaine influence le confort thermique extérieur.

La méthodologie adoptée dans cette recherche est principalement basée sur une approche objective (quantitative) composée de deux méthodes : les mesures sur le terrain et la simulation numérique. Des campagnes de mesures ont été effectuées pour enregistrer les paramètres climatiques pendant la période de surchauffe. De plus, une simulation numérique en utilisant le logiciel Envi-met V5.0.2 a été réalisée. L'objectif est de comparer les espaces étudiés et de modéliser des scénarios d'amélioration du confort afin d'évaluer l'impact des paramètres morphologiques sur le microclimat et le confort thermique extérieur.

Les mesures sur le terrain révèlent des différences significatives dans les paramètres climatiques entre les espaces publics étudiés, qui varient en fonction des conditions climatiques. La simulation numérique à l'aide du modèle Envi-met est utilisée pour évaluer les paramètres microclimatiques et les indices de confort thermique, et les résultats sont comparés aux mesures sur le terrain. La simulation permet également d'étudier les possibilités d'amélioration du microclimat et du confort thermique en modifiant certains paramètres morphologiques tels que l'orientation, la végétation, la hauteur et la densité des bâtiments.

**Mots clés :** Morphologie urbaine, espace public, microclimat urbain, confort thermique, simulation numérique.

### Abstract

Urban heat island exacerbates the risk of thermal stress in urban areas compared to rural areas. Urban morphology is one of the factors that alters the thermal environment of the city and influences the thermal comfort of its residents. Improving outdoor thermal comfort in urban public spaces enhances quality of life and promotes active social life. This thesis investigates the impact of public space morphology on microclimate and outdoor thermal comfort. The study focuses on five public squares located in the city of Annaba, Algeria, to understand how urban morphology influences outdoor thermal comfort.

The methodology adopted in this research is based on a quantitative approach consisting of two methods: field measurements and numerical simulation. Field measurement campaigns were conducted to record climatic parameters during the overheating period. Additionally, numerical simulation using Envi-met V5.0.2 software was performed. The objective is to compare the studied spaces and model comfort improvement scenarios to assess the impact of morphological parameters on microclimate and outdoor thermal comfort.

Field measurements reveal significant differences in climatic parameters among the studied public spaces, which vary according to weather conditions. Numerical simulation using the Envi-met model is employed to evaluate microclimate parameters and thermal comfort indices, and the results are compared to field measurements. The simulation also allows for the investigation of possibilities to improve microclimate and thermal comfort by modifying certain morphological parameters such as orientation, vegetation, building height, and density.

**Keywords:** Urban morphology, public space, urban microclimate, thermal comfort, numerical simulation.

**ملخص:**

تزيد جزيرة الحرارة الحضرية من خطر الإجهاد الحراري في المناطق الحضرية مقارنة بالمناطق الريفية. الشكل الحضري هو أحد العوامل التي تغير البيئة الحرارية للمدينة وتؤثر على الراحة الحرارية للسكان. تحسين الراحة الحرارية في الهواء الطلق في الأماكن العامة الحضرية يحسن نوعية الحياة ويعزز الحياة الاجتماعية النشطة. تدرس هذه الأطروحة تأثير مورفولوجيا الفضاء العام على المناخ المحلي والراحة الحرارية في الهواء الطلق. تركز الدراسة على خمس ساحات عامة تقع في مدينة عنابة بالجزائر لفهم كيفية تأثير التشكل الحضري على الراحة الحرارية في الهواء الطلق.

تستند المنهجية المعتمدة في هذا البحث بشكل أساسي إلى نهج موضوعي (كمي) يتكون من طريقتين: القياسات الميدانية والمحاكاة الرقمية. ونفذت قياسات لتسجيل البارامترات المناخية خلال فترة ارتفاع درجة الحرارة. وبالإضافة إلى ذلك، أجريت محاكاة رقمية باستخدام برنامج IVNE-TEM الهدف هو مقارنة المساحات سيناريوهات تحسين الراحة التي تمت دراستها ونمذجتها لتقييم تأثير البارامترات المورفولوجية على المناخ المحلي والراحة الحرارية في الهواء الطلق.

تكشف القياسات الميدانية عن اختلافات كبيرة في معايير المناخ بين الأماكن العامة التي تمت دراستها، والتي تختلف وفقاً للظروف المناخية. تُستخدم المحاكاة الرقمية لتقييم المعلمات المناخية الدقيقة ومؤشرات الراحة الحرارية، وتُقارن النتائج بالقياسات الميدانية. تجعل المحاكاة أيضاً من الممكن دراسة إمكانيات تحسين المناخ المحلي والراحة الحرارية عن طريق تعديل معايير معينة مورفولوجية مثل التوجه والنباتات وارتفاع وكثافة المباني.

**الكلمات المفتاحية:** الشكل الحضري، الفضاء العام، المناخ المحلي الحضري، الراحة الحرارية محاكاة رقمية