



Université de Constantine 3  
Faculté d'architecture et d'urbanisme  
Département d'architecture

# **LA PERCEPTION THERMIQUE EN CLIMAT SEMI- ARIDE : CAS DES PLACES PUBLIQUES À CONSTANTINE**

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD en Architecture,  
Spécialité : Ville et Environnement Durable

Par

**Afef OUIS**

Année universitaire  
2023/2024





Université de Constantine 3  
Faculté d'architecture et d'urbanisme  
Département d'architecture

N° de Série :

N° d'Ordre :

LA PERCEPTION THERMIQUE EN CLIMAT SEMI-ARIDE : CAS DES  
PLACES PUBLIQUES À CONSTANTINE

THESE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD en Architecture,  
Spécialité : Ville et Environnement Durable

Par

Afef OUIS

Devant le jury composé de

Messaoud AICHE	Président	Professeur	Université de Constantine 3
Nassira BENHASSINE	Rapporteur	Professeur	Université de Constantine 3
Sarah BENHARKAT	Examinatrice	MCA	Université de Constantine 3
Atef AHRIZ	Examineur	MCA	Université de Tébessa
Mohamed elhadi MATALLAH	Examineur	MCA	Université de Biskra
Lazhar BOUDJELLAL	Examineur	MCA	Université de Batna

Année universitaire  
2023-2024



## REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le tout puissant pour m'avoir donné la volonté et la patience pour réaliser cette recherche.

Tout d'abord, mes sincères remerciements vont à ma directrice de thèse Professeur Nassira BENHASSINE-TOUAM non seulement pour son encadrement et ses orientations visées mais aussi pour ses encouragements et l'intérêt qu'elle m'a accordée tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers le Professeur Fatih CANAN de l'université Technique de Konya en Turquie qui a contribué à la publication scientifique à laquelle il a ; généreusement ; consacré de son temps.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir consacré leur temps précieux à l'examen et à l'évaluation de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier mon amie Dr Sara SAHNOUNE pour son aide précieuse, son soutien indéfectible et ses encouragements constants. Un remerciement particulier est adressé à Abed el Hakim MAKHLOUFI pour son assistance précieuse.

Ma gratitude va également à mes enseignantes ; Pr Fatiha BOURBIA, Pr Yasmina BOUCHAHM, Pr Saliha ABDOU, Dr Sara BENHARKET, Pr Samira LOUAFI, ainsi qu'aux membres du Laboratoire Architecture Bioclimatique et Environnement (ABE) ; en particulier Dr Islem BOUKHELKHAL ; pour leur soutien permanent et leur contribution significative à mon parcours académique.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont apportée de l'aide de près ou de loin.

## DEDICACES

*À mes très chers parents,*

*À ma sœur Kaouther,*

*À mes frères,*

*À ma tante 'Dada',*

*À mon amie Zineb*

*À toute ma famille et amies*

*Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et considération*

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES .....	vi
LISTE DES TABLEAUX .....	x
LISTE DES ABREVIATIONS .....	xi
RESUME.....	
ABSTRACT .....	
ملخص .....	

### INTRODUCTION GENERALE

Problématique.....	3
Objectifs de la recherche .....	6
Méthodologie de la recherche.....	7
Structure de la thèse.....	9

### CHAPITRE I : PLACE PUBLIQUE ET MÉCANISMES DE LA PERCEPTION DE L'ESPACE

1. Introduction.....	11
1.1 Epistémologie de l'espace public.....	12
1.1.1 Caractéristiques et complexité de l'espace public.....	13
1.1.2 Catégories de l'espace public.....	14
1.2 La place publique dans une évolution historique.....	14
1.2.1 La place en rapport à la typologie urbaine.....	17
1.2.2 La place publique fonctionnelle.....	19
1.2.3 La place publique en rapport à la forme.....	20
1.3 Le comportement dans un processus cognitif tributaire de la perception.....	26
1.3.1 Principe et fonctionnement du processus perceptif.....	27
1.3.2 Perception spatiale et pratique comportementale.....	32
1.3.3 Pratiques et usages de la place comme espace public.....	33
Conclusion.....	34

### CHAPITRE II : INTERACTIONS ET FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA PERCEPTION THERMIQUE

2. Introduction.....	37
2.1 Effets thermiques sur le corps humain.....	38
2.1.1 Échanges radiatifs.....	39
2.1.2 Échanges convectifs.....	40
2.1.3 Échanges conductifs.....	41

2.1.4	Échanges de chaleur par respiration.....	41
2.1.5	Échanges de chaleur par évaporation.....	41
2.1.6	Effet métabolique.....	42
2.1.7	Effet vestimentaire.....	42
2.2	Bilan thermique .....	43
2.3	Perception thermique et différents facteurs d'influence .....	44
2.3.1	Mécanismes physiologiques et traitement cognitif des stimuli thermiques .....	44
2.4	Variables physiques .....	46
2.4.1	Facteurs micro-météorologiques.....	46
2.4.2	Facteurs géométriques de l'espace urbain.....	48
2.5	Variables humaines.....	52
2.5.1	Variables sociodémographiques.....	52
2.5.2	Adaptation thermique.....	54
2.6	Indices d'évaluation du stress thermique en espace urbain .....	59
2.6.1	Indices directs.....	61
2.6.2	Indices empiriques.....	63
2.6.3	Indices rationnels.....	65
2.6.4	Echelle de perception du stress thermique.....	69
	Conclusion.....	70

### **CHAPITRE III : TECHNIQUES D'INVESTIGATIONS ET CADRE CONCEPTUEL DE LA PERCEPTION THERMIQUE EXTERIEURE**

3.	Introduction.....	73
3.1	Etudes préliminaires sur la perception thermique en espace urbain.....	74
3.2	Variété des procédures dans la collecte des données météorologiques.....	77
3.2.1	Saison d'investigation.....	77
3.2.2	Durée et temps de mesure.....	78
3.2.3	Site d'investigation et outils de surveillance.....	79
3.3	Diversité des stratégies d'enquête sur le terrain .....	80
3.3.1	Echelle d'évaluation de la perception thermique.....	80
3.3.2	Adaptation physiologique et psychologique.....	83
3.3.3	Population ciblé et méthodes d'échantillonnage.....	84
3.4	Comparaison des approches et techniques d'évaluation .....	85
3.4.1	Surabondance d'indice thermique.....	85
3.4.2	Absence d'uniformité dans la détermination de la « plage de confort ».....	87

3.4.3	Variabilité des méthodes dans la calibrations d'indice thermo-physiologique.....	89
3.5	Protocoles d'évaluation de la perception thermique en espace urbain .....	93
3.5.1	Première étape : objectives expérimentaux.....	95
3.5.2	Deuxième étape : procédures d'investigation et de mesures in situ.....	96
3.5.3	Troisième étape : analyse des données statistiques.....	96
3.5.4	Quatrième étape : modification de l'échelle d'indice thermique selon le climat local.....	96
	Conclusion.....	97

#### **CHAPITRE IV : APPROCHE METHODOLOGIQUE DE L'EVALUATION DE LA PERCEPTION THERMIQUE EN ESPACE PUBLIC EXTERIEUR**

4.	Introduction.....	100
4.1	Contexte géographique et climatique des cas d'étude.....	101
4.1.1	Choix et présentation des cas d'étude.....	103
4.2	Démarche expérimentale par l'analyse microclimatique.....	110
4.2.1	Instrument de mesure.....	110
4.2.2	Traitement des données microclimatiques.....	113
4.3	Méthode de l'enquête par le questionnaire.....	115
4.3.1	Mise en forme du questionnaire.....	115
4.3.2	Méthode du recueil de données.....	118
4.3.3	Traitement et analyse des données.....	120
4.4	Evaluation du confort thermique extérieur par la simulation numérique.....	121
4.4.1	Présentation des Logiciels RayMan et ENVI-met.....	121
4.4.2	Configuration et modélisation dans ENVI-met.....	123
4.4.3	Simulation et visualisation des résultats dans ENVI-met.....	125
4.4.4	Validation des résultats d'ENVI-met.....	125
4.5	Triangulation des résultats et méthodes statistiques effectuées.....	129
	Conclusion.....	131

#### **CHAPITRE V : ENQUETES ET MESURES MICROLIMATIQUES DANS LES PLACES PUBLIQUES DE CONSTANTINE**

5.	Introduction.....	133
5.1	Caractéristiques sociodémographiques de la population ciblée .....	134
5.2	Conditions microclimatiques des jours d'enquête 'évaluation objective'.....	136
5.3	Perception du microclimat urbain durant la saison estivale 'évaluation subjective'.....	140
5.3.1	Sensation thermique dans les espaces publics extérieurs.....	140

5.3.2	Satisfaction thermique dans les espaces publics extérieurs.....	141
5.3.3	Corrélation des réponses subjectives liées aux variables microclimatiques.....	142
5.3.4	Aspirations liées aux variables microclimatiques.....	144
5.4	Perception du microclimat urbain durant Saison hivernale ‘évaluation subjective’ .....	146
5.4.1	Sensation thermique dans les espaces publics extérieurs.....	146
5.4.2	Satisfaction thermique dans les espaces publics extérieurs.....	147
5.4.3	Corrélation des réponses subjectives liées aux variables microclimatiques.....	149
5.4.4	Aspiration (Préférences) liés aux variables microclimatiques.....	151
5.5	Effets des variables objectives et subjectives sur la perception thermique extérieure .....	152
5.5.1	Paramètres microclimatiques.....	152
5.5.2	Adaptation thermique et comportements adaptatifs.....	154
5.5.3	Effets des mesures liées au post-COVID 19.....	160
	Conclusion.....	163
<b>CHAPITRE VI : NEUTRALITE THERMIQUE ET CALIBRATION DE L’INDICE DU CONFORT EN CLIMAT SEMI-ARIDE</b>		
6.	Introduction.....	165
6.1.	Confort thermique en climat semi-aride de Constantine.....	166
6.1.1	Sensibilité thermique et température neutre de la saison estivale	166
6.1.2	Sensibilité thermique et température neutre de la saison hivernale	167
6.1.3	Plage de neutralité thermique (zone de confort thermique)	170
6.2	Etude comparative du confort thermique dans différents climats.....	171
6.2.1	Calibration de l’indice du confort (PET)	173
6.2.2	Synthèse des résultats de calibration dans différentes régions climatiques .....	174
6.3	Cartes du confort thermique extérieur basées sur l’indice PET calibré.....	177
6.3.1	Analyse des cartes du confort thermique durant la période estivale	177
6.3.2	Analyse des cartes de confort thermique durant la période hivernale	183
	Conclusion.....	189
	<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>190</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>199</b>
	<b>LISTES DES ANNEXES.....</b>	<b>217</b>
	Annexe A : Valeurs de taux métabolique et résistance thermique de vêtements.....	217

Annexe B : Fiche d'enquête pour l'évaluation de la perception thermique en extérieur (ASHREA 55) et (ISO : 10551) .....	220
Annexe C : Résultats de l'analyse de la régression multiple (Effets des variables microclimatique).....	223
Annexe D : Résultats de Test H <i>Kruskal wallis</i> (Effets des variables subjectives).....	225
Annexe E : Résultats de Chi-2 (Effets des mesures de post-COVID19).....	229
Annexe F : Publication scientifique .....	230

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1.</b> Agora grecque et place médiévale .....	15
<b>Figure 1.2.</b> La place publique comme espace urbain central .....	18
<b>Figure 1.3.</b> Schéma simplifié illustrant l'espace 'banal' et l'espace 'spécialisé' .....	19
<b>Figure 1.4.</b> Deux places à Trieste en Italie .....	21
<b>Figure 1.5.</b> Places de l'ancien aménagement des villes .....	21
<b>Figure 1.6.</b> La place Ré-imaginée en boîte,.....	22
<b>Figure 1.7.</b> Le rapport plein/vide dans la place .....	23
<b>Figure 1.8.</b> La place de l'amphithéâtre à Lucques en Italie .....	25
<b>Figure 1.9.</b> Orientation de la place selon l'édifice le plus important.....	26
<b>Figure 1.10.</b> Mécanisme de formulation de l'image schématisé par Doherty .....	28
<b>Figure 1.11.</b> Processus de perception selon Bailly.....	29
<b>Figure 1.12.</b> Processus simplifié du comportement .....	30
<b>Figure 1.13.</b> Modèle théorique du processus perception-comportement .....	31
<b>Figure 2.1.</b> Les échanges thermiques entre l'individu et son environnement.....	39
<b>Figure 2.2.</b> Evolution journalières des apports solaires au niveau pédestres .....	40
<b>Figure 2.3.</b> Représentation des réponses biométéorologiques humaines aux stimuli du Stress Thermique chaud (HS), et Froid (CS) .....	45
<b>Figure 2.4.</b> Différents ratios H/W configurés dans l'étude sur Béchar.....	49
<b>Figure 2.5.</b> Ratio (H/W) et facteur (SVF) d'un canyon urbain.....	51
<b>Figure 2.6.</b> Photos Fish-eye et valeurs du facteur (SVF) respectifs pour quatre emplacements à travers le monde.....	51
<b>Figure 2.7.</b> Interactions entre les différents paramètres de l'adaptation psychologique .....	57
<b>Figure 2.8.</b> Protocole expérimentale de l'étude longitudinale réalisée en espace urbain à Hong-Kong.....	65
<b>Figure 2.9.</b> Concept de l'UTCI dérivé en tant que température équivalente en (°C) .....	69
<b>Figure 3.1.</b> Carte de revue de littérature effectuée depuis 2000-2022 .....	74
<b>Figure 3.2.</b> Evolution du nombre d'études sur la perception thermique extérieure entre 2001-2018 (nombre d'études 115).....	75
<b>Figure 3.3.</b> Études sur la perception thermique extérieure menée dans diverses villes basée sur la classification climatique de Köppen-Geiger. ....	76
<b>Figure 3.4.</b> Fréquence des types d'indices thermiques utilisés dans les études de cas examinées.....	86
<b>Figure 3.5.</b> Cadre conceptuel de l'environnement thermique humain.....	94
<b>Figure 3.6.</b> Framework de base pour l'évaluation de la perception thermique en extérieur.....	95
<b>Figure 4.1.</b> (a) L'Algérie dans le monde, (b) Aire d'étude, (c) Vue générale des sites d'étude dans la vieille ville de Constantine .....	101
<b>Figure 4.2.</b> Facteurs climatiques de Constantine (2004-2018).....	102
<b>Figure 4.3.</b> Diagrammes des roses des vents : (a) données horaires pendant la période estivale de juin à septembre. ....	103
<b>Figure 4.4.</b> Interprétation graphique de la moyenne annuelle des précipitations (2004-2015).....	103
<b>Figure 4.5.</b> Situation et limites de la place <i>Si El Haoues</i> (C1) à la vieille ville de Constantine.....	104
<b>Figure 4.6.</b> (a) Vue sur la place <i>Si El Haoues</i> , (b) photo fish-eye et valeur du SVF .....	105

<b>Figure 4.7.</b> Situation et limites de l'esplanade la Brèche (C2) à la vieille ville de Constantine.....	106
<b>Figure 4.8.</b> (a) Vue sur l'esplanade de la Brèche, (b) photo fish-eye et valeur du SVF .....	107
<b>Figure 4.9.</b> Square de la république en face square Vallée .....	108
<b>Figure 4.10.</b> Situation et limites de la place Hadj Ahmed bey (C3) à la vieille ville de Constantine.....	108
<b>Figure 4.11.</b> (a) Vue sur la place <i>Hadj Ahmed Bey</i> , (b) photo fish-eye et valeur du SVF .....	109
<b>Figure 4.12.</b> (a) Mesures microclimatiques avec Delta OHM HD 32.3, (b) Sondes de l'instrument Delta OHM HD 32.3 .....	110
<b>Figure 4.13.</b> Interface de l'instrument Delta OHM 32.3 lors de mesure .....	112
<b>Figure 4.14.</b> Les différentes étapes de la démarche de l'analyse microclimatique..	114
<b>Figure 4.15.</b> Echelle de satisfactions de cinq points .....	116
<b>Figure 4.16.</b> Vote de Sensation Thermique (TSV) échelle de sept points .....	116
<b>Figure 4.17.</b> Etapes de la Pré-enquête et ajustements du questionnaire.....	117
<b>Figure 4.18.</b> Photos représentatif de la collecte des données par questionnaire .....	119
<b>Figure 4.19.</b> Interface du Logiciel SPSS V25.0 .....	121
<b>Figure 4.20.</b> Interface de logiciel RayMan lors du calcul de l'indice (PET) .....	121
<b>Figure 4.21.</b> Calcul de l'indice PET dans Rayman model et les niveaux de stress thermique du (PET).....	122
<b>Figure 4.22.</b> Différentes étapes de modélisation et simulation dans ENVI-met V5123	
<b>Figure 4.23.</b> Interface des outils d'ENVI-met ' <i>Data-base manager</i> ' et ' <i>Albero</i> ' lors de la configuration. ....	124
<b>Figure 4.24.</b> Interface des outils de simulation et visualisation dans ENVI-met....	125
<b>Figure 4.25.</b> Régression linéaire entre les variables simulés et mesurés de la température de l'air dans les sites étudiés.....	127
<b>Figure 4.26.</b> Traitement et analyse des données par les méthodes quantitatives et qualitatives .....	129
<b>Figure 4.27.</b> Méthodologie de la recherche adoptée pour l'évaluation de la perception thermique extérieure.....	132
<b>Figure 5.1.</b> Variation des paramètres microclimatiques mesurés (saison chaude)...	137
<b>Figure 5.2.</b> Variation des paramètres microclimatiques mesurés (saison froide) ...	139
<b>Figure 5.3.</b> (a) Répartition en pourcentage des (TSV) dans les 3 places, (b) Votes totaux de la sensation thermique des répondants. ....	140
<b>Figure 5.4.</b> (a) Répartition en pourcentage des votes de satisfaction thermiques dans les 3 places, .....	141
<b>Figure 5.5.</b> Attribution en pourcentage de (HSV) et (WSV). ....	142
<b>Figure 5.6.</b> Variation des votes de préférences liées aux variables microclimatique .....	145
<b>Figure 5.7.</b> (a) Classification en pourcentage de (TSV) dans les 3 places, (b) Votes totaux de la sensation thermique des enquêtés.....	146
<b>Figure 5.8.</b> (a) Répartition en pourcentage des votes de (TSV) dans les 3 places, (b) Votes totaux de la satisfaction thermique des enquêtés. ....	148
<b>Figure 5.9.</b> Distribution en pourcentage des votes de (HSV) et (WSV). ....	149
<b>Figure 5.10.</b> Variation des votes de préférences liées aux variables microclimatique .....	151
<b>Figure 5.11.</b> Variation de la raison de visite en fonction du temps d'exposition des enquêtés.....	155

<b>Figure 5.12.</b> Répartition du comportement adaptatif selon le sexe des répondants	157
<b>Figure 5.13.</b> Variation de la raison de visite en fonction du temps d'exposition des répondants	158
<b>Figure 5.14.</b> Répartition du comportement adaptatif selon le sexe des répondants	160
<b>Figure 5.15.</b> Effets des mesures liées COVID-19 (couvre-feu, distanciation sociale, masque facial)	161
<b>Figure 5.16.</b> Analyse de la tabulation croisée des ajustements des activités planifiées	162
<b>Figure 6.1.</b> Analyse de régression linéaire entre le (MTSV) et le (PET) dans la saison estivale.	166
<b>Figure 6.2.</b> Analyse de régression linéaire entre le (MTSV) et le PET dans la saison hivernale	168
<b>Figure 6.3.</b> Corrélation entre MTSV et PET durant les deux saisons (échantillons complet) et identification de la zone de neutralité thermique	170
<b>Figure 6.4.</b> Comparaison des échelles calibrées de l'indice PET dans différentes zones climatiques	175
<b>Figure 6.5.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (7 :00h)	178
<b>Figure 6.6.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (7 :00h)	178
<b>Figure 6.7.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (7 :00h)	179
<b>Figure 6.8.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (13 :00h)	180
<b>Figure 6.9.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (15 :00h)	180
<b>Figure 6.10.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (14:00h)	181
<b>Figure 6.11.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (18:00h)	182
<b>Figure 6.12.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (18:00h)	182
<b>Figure 6.13.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (18:00h)	183
<b>Figure 6.14.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (8:00h)	184
<b>Figure 6.15.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (8:00h)	184
<b>Figure 6.16.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (8:00h)	185
<b>Figure 6.17.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (14:00h)	186
<b>Figure 6.18.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (14:00h)	186
<b>Figure 6.19.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (13:00h)	187
<b>Figure 6.20.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (17:00h)	187

<b>Figure 6.21.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (17:00h).....	188
<b>Figure 6.22.</b> Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (17:00h).....	188

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 2.1.</b> Echelle de perception des indices (PET/SET*/UTCI).....	70
<b>Tableau 3.1.</b> Procédures de collecte de données météorologiques issues de diverses études.....	77
<b>Tableau 3.2.</b> Evaluation de la perception subjective de l'environnement thermique	81
<b>Tableau 3.3.</b> Identification de la 'plage de confort' des indices de confort par multiples méthodes .....	88
<b>Tableau 3.4.</b> PET modifiées pour diverses zones climatiques selon les méthodes de calibration.....	91
<b>Tableau 3.5.</b> UTCI modifiées pour diverses zones climatiques selon les méthodes de calibration.....	92
<b>Tableau 4.1.</b> Caractéristiques techniques de l'instrument Delta OHM 32.3.....	111
<b>Tableau 4.2.</b> Récapitulatif des questionnaires collectés par date, par heure et par saison.....	118
<b>Tableau 4.3.</b> Modèles géométriques des places étudiés dans ENVI-met .....	123
<b>Tableau 4.4.</b> Comparaison de diverses métriques pour valider les résultats d'ENVI-met.....	128
<b>Tableau 5.1.</b> Caractéristiques sociodémographiques de la population étudiée.....	134
<b>Tableau 5.2.</b> Valeurs moyennes de ( $I_{cl}$ ) et (MET) en fonction du sexe des répondants pendant les deux saisons .....	135
<b>Tableau 5.3.</b> Statistiques descriptives des variables microclimatiques (saison chaude).....	136
<b>Tableau 5.4.</b> Statistiques descriptives des variables microclimatiques (saison froide) .....	138
<b>Tableau 5.5.</b> Variation de la température moyenne mesurée en fonction de (TSV) des répondants .....	141
<b>Tableau 5.6.</b> Test de corrélation 'Spearman' entre les divers votes de sensations ..	144
<b>Tableau 5.7.</b> Variation de ( $T_a$ ) moyenne mesurée en fonction de (TSV).....	147
<b>Tableau 5.8.</b> Test de corrélation 'Spearman' entre les divers votes de sensations ..	150
<b>Tableau 5.9.</b> Résultats du Test Chi-2 pour les mesures appliqués durant post-COVID 19.....	163
<b>Tableau 6.1.</b> Comparaison des plages neutres de (PET) des villes situées dans différente .....	172
<b>Tableau 6.2.</b> Échelles de l'indice PET calibrées obtenue par la régression linéaire	174

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>A<sub>a</sub></b>	<i>Dubois area en (m<sup>2</sup>), (surface cutanée)</i>
<b>ASHRAE</b>	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (Association Américaine des Professionnels du Chauffage, Refroidissement et Conditionnement d'Air)</i>
<b>ASV</b>	<i>Actual Sensation Vote (Vote de Sensation Actuel)</i>
<b>AT</b>	<i>Apparent Temperature (Température Apparente)</i>
<b>BMI</b>	<i>Body Mass Index (Indice de Masse Corporelle)</i>
<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<b>CIAM</b>	<i>Conférences Internationales d'Architecture Moderne</i>
<b>Clo</b>	<i>Clothing Thermal insulation</i>
<b>COST</b>	<i>Cooperation in Science and Technical Development</i>
<b>CS</b>	<i>Cold Stress, (Stress dû au froid)</i>
<b>d</b>	<i>Index agreement (indice d'agrément)</i>
<b>ddl</b>	<i>Degré de liberté</i>
<b>ET</b>	<i>Effective Temperature (Température effective)</i>
<b>F</b>	<i>Statistique F de Fisher</i>
<b>H/W</b>	<i>Ratio Height/Width</i>
<b>HI</b>	<i>Heat Index (Indice de chaleur)</i>
<b>HS</b>	<i>Heat Stress, (Stress dû à la chaleur)</i>
<b>HSV</b>	<i>Humidity Sensation Vote (Vote de Sensation de l'humidité)</i>
<b>HTM</b>	<i>Human Thermal Model (Modèle Thermique Humain)</i>
<b>IF</b>	<i>Fluctuation index (Indice de Fluctuation)</i>
<b>IPCC</b>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standarization</i>
<b>MEMI</b>	<i>Modèle de bilan Énergétique de Munich pour les Individus</i>
<b>MET</b>	<i>Metabolic Equivalent of Task, (Taux métabolique)</i>
<b>MTSV</b>	<i>Mean thermal Sensation Vote (Vote moyen de sensation thermique)</i>
<b>OUT_SET</b>	<i>Outdoor Effective Temperature</i>
<b>PET</b>	<i>Physiological Equivalent Temperature (Température physiologique équivalente)</i>
<b>PMV</b>	<i>Predicted Mean Vote (Vote Moyen Prévisible)</i>
<b>PPD</b>	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied (pourcentage prévisible d'insatisfait)</i>
<b>PPSMVSS</b>	<i>Plan Permanent de Sauvegarde et Mise en Valeur du Secteur Sauvegardé</i>
<b>Q<sub>sk</sub></b>	<i>Flux de chaleur échangé à la surface de la peau en (W/m<sup>2</sup>)</i>
<b>R</b>	<i>Coefficient de corrélation</i>
<b>R<sup>2</sup></b>	<i>Coefficient de détermination</i>
<b>Rh</b>	<i>Humidité Relative (%)</i>
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error (Racine l'erreur quadratique moyenne)</i>
<b>RUROS</b>	<i>Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces</i>
<b>SET*</b>	<i>Standard Effective Temperature (température effective standard)</i>
<b>Sig</b>	<i>Signification</i>
<b>SPSS</b>	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
<b>SVF</b>	<i>Sky View Factor (Facteur de vue de ciel)</i>
<b>T<sub>a</sub></b>	<i>Température de l'air en (°C)</i>
<b>T<sub>g</sub></b>	<i>Température du thermomètre à globe (°C)</i>
<b>T<sub>mrt</sub></b>	<i>Température radiante moyenne (°C)</i>

<b>TPV</b>	<i>Thermal Preferences Vote</i> (Vote de préférence thermique)
<b>TS</b>	<i>Thermal Satisfaction</i> (Satisfaction thermique)
<b>T<sub>sk</sub></b>	<i>Skin temperature</i> (Température de la peau)
<b>TSV</b>	<i>Thermal sensation Vote</i> (Vote de Sensation Thermique)
<b>V<sub>a</sub></b>	Vitesse de l'air (m/s)
<b>V<sub>p</sub></b>	la pression en vapeur d'eau saturante en (hPa)
<b>WBGT</b>	<i>Wet-bulb-globe-temperature</i> (Température du Thermomètre à Globe Humide)
<b>WSV</b>	<i>Wind Sensation Vote</i> (Vote de Sensation de Vent)

## RESUME

La perception thermique qui est étroitement liée au confort des individus dans les environnements extérieurs est aussi influencée par les caractéristiques du microclimat. Cependant, l'évaluation de ce dernier n'est pas systématiquement fondée sur des paramètres objectifs (température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et radiations solaires). En plus des facteurs objectifs, la perception thermique et l'usage des espaces extérieurs sont considérablement tributaires des caractéristiques comportementales et psychologiques, de l'adaptation thermique et des facteurs sociaux (désignés comme facteurs subjectifs).

Ainsi, nous étudions la perception thermique en climat semi-aride de Constantine par la vérification des caractéristiques du confort thermique et de l'adaptation psychologique exprimés par les usagers dans la pratique des espaces extérieurs ; notamment les places. A cette fin, trois places publiques situées dans le secteur sauvegardé de la ville de Constantine, ont été choisies pour mener cette recherche ; il s'agit de la place *Si El Haoues* 'place du palais', place de la révolution 'la Brèche' et la place *Hadj Ahmed bey*.

La méthodologie regroupe un ensemble d'approches, méthodes et outils : l'approche comparative et analytique par un état de l'art et la méthode de l'enquête par le questionnaire, ainsi que la démarche expérimentale par les mesures microclimatiques. Les simulations numériques ont été effectuées par ENVI-met Science V5.0 et RayMan. Par conséquent, la phase initiale implique la collecte simultanée de données (personnelles, Vote de Sensation Thermique (TSV), et de l'adaptation thermique). Les mesures météorologiques (estivale et hivernale) dans les trois places définies ont été effectuées lors des journées représentatives d'été et d'hiver en période post-pandémique COVID19 (aout 2021 et janvier 2022). Ensuite, les résultats de simulations du logiciel ENVI-met ont été visualisés pour générer une cartographie du confort extérieur en nous appuyant sur l'indice de Température Physiologique Equivalente (PET). Enfin, basée sur la triangulation des différentes approches, l'ensemble des données collectées lors des investigations estivales et hivernales a été traité et analysé à l'aide du logiciel de statistiques SPSS V25.0.

Les conditions estivales à Constantine, où la température de l'air peut atteindre 42 °C dans les places publiques, sont moins agréables pour les piétons. Alors que, des proportions notables de satisfaction thermique dans la période hivernale ont été observées. L'évaluation de l'effet des paramètres microclimatiques sur la perception thermique a montré que, une corrélation significative ( $R^2=0.76$ ) durant la saison estivale. En accord avec des études précédentes conduites dans des climats chauds, la température de l'air a été déterminée comme le facteur le plus influent sur la perception thermique subjective durant l'investigation estivale et hivernale. En somme, deux équations empiriques (été, hiver) ont été obtenues permettant ainsi de quantifier la variation de la perception thermique extérieure en fonction des paramètres microclimatiques pour le climat semi-aride de Constantine.

Quant à l'effet des variables subjectives (adaptation thermique et comportements adaptatifs), les résultats du test non paramétrique ont indiqué que le temps d'exposition a probablement un effet sur la perception thermique en hiver, mais en été le temps d'exposition n'entraîne aucune disparité significative. Cependant, l'histoire thermique à court terme a une influence significative sur la perception thermique subjective durant les deux saisons.

La méthode binée entre le vote moyen de sensation thermique (MTSV) et l'indice de confort (PET) a permis de définir une température neutre de (22,7 °C) pour la saison chaude, et celle de (21.4 °C) pour la saison froide. Cette faible différence de (1.3 °C) des températures neutres entre l'été et l'hiver a été expliquée par le niveau d'adaptation thermique de la population locale, qui est beaucoup plus centré sur les conditions thermiques

générales en climat semi-aride, plutôt qu'une adaptation thermique saisonnière (physiologique et psychologique) spécifique. Ensuite, La neutralité thermique pour les espaces urbains extérieurs a été estimée entre  $17,5\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 26,2\text{ °C}$  sous climat semi-aride de Constantine.

**Mots clés :** Perception thermique, Température Physiologique Equivalente (PET), Vote de Sensation Thermique (TSV), Climat semi-aride, Place publique, Neutralité thermique, Enquête

## ABSTRACT

Outdoor thermal perception is closely linked to the comfort of individuals in outdoor environments and is also influenced by the characteristics of the microclimate. However, the latter's evaluation must be systematically based on objective parameters (air temperature, wind speed, relative humidity, and solar radiation). In addition to objective factors, thermal perception and the usage of outdoor urban spaces considerably depend on behavioral and psychological characteristics, thermal adaptation, and social factors (subjective factors).

Thus, our study focuses on assessing outdoor thermal perception in the semi-arid climate of Constantine by verifying the characteristics of thermal comfort and psychological adaptation expressed by interviewees in outdoor spaces, specifically public places. To this end, three public squares located in the protected sector of the old town of Constantine were chosen to carry out this research. These are *Si El Haoues* Place 'Palace Square,' Revolution Place, commonly known as 'La Brèche,' and *Hadj Ahmed bey* Place.

The methodology combines a set of approaches, methods, and tools: the comparative and analytical approach using a state-of-the-art, questionnaire survey method, and the experimental approach using microclimatic measurements. ENVI-met Science V5.0 and Rayman carried out the numerical simulations. Therefore, the initial phase involves the simultaneous collection of data (personal, Thermal Sensation Vote (TSV), and thermal adaptation). The meteorological measurements (summer and winter) in the three defined places were carried out during the representative summer and winter days in the post-COVID-19 pandemic period (August 2021) and (January 2022). Then, the simulation results of the ENVI-met software were visualized to generate a map of outdoor comfort based on the calibrated Physiological Equivalent Temperature (PET) index. Finally, based on the triangulation of the different approaches, all data collected during the summer and winter investigations were processed and analyzed using the SPSS V25.0 statistics software.

Summer conditions in Constantine, where air temperatures can reach 42°C in public places, are less pleasant for pedestrians. On the other hand, notable proportions of thermal satisfaction were observed during the winter period. The evaluation of the effect of microclimatic parameters on thermal perception showed a significant correlation ( $R^2=0.76$ ) during the summer season. Consistent with previous studies conducted in warm climates, air temperature was the most influential factor in subjective thermal perception during summer and winter investigations. In short, two empirical equations (summer and winter) were obtained, thus making it possible to quantify the variation in outdoor thermal perception as a function of microclimatic parameters for the semi-arid climate of Constantine.

As for the effect of subjective variables (thermal adaptation and adaptive behaviors), the results of the non-parametric test indicated that exposure time probably has an effect on thermal perception in winter, but in summer, the exposure time resulted in no significant disparity. However, short-term thermal history significantly influences subjective thermal perception during both seasons.

The binned method between the average thermal sensation vote (MTSV) and the comfort index (PET) made it possible to define a neutral temperature of (22.7 °C) for the hot season and (21.4 °C) for the cold season. This slight difference of (1.3 °C) in neutral temperatures between summer and winter was explained by the local population's thermal adaptation level, which is much more focused on general thermal conditions in a semi-arid climate, rather than a specific seasonal thermal adaptation (physiological and psychological). Then, thermal neutrality for outdoor urban spaces was estimated between  $17.5\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 26.2\text{ °C}$  in the semi-arid climate of Constantine.

**Keys words:** Thermal perception, Physiological Equivalent Temperature (PET), Thermal Sensation Vote (TSV), semi-arid climate, public places, thermal neutrality, Survey.

## ملخص

يرتبط الإدراك الحراري ارتباطاً وثيقاً براحة الأفراد في البيئات الخارجية ويتأثر أيضاً بخصائص المناخ المحلي، ومع ذلك يجب أن يستند تقييم هذا الأخير على طريقة منهجية تجمع بين المعايير المناخية: كدرجة حرارة الهواء، سرعة الرياح، الرطوبة النسبية، والإشعاع الشمسي، فبالإضافة لهذه العوامل المحسوسة، يعتمد الإدراك الحراري واستخدام المساحات الحضرية الخارجية بشكل كبير على الخصائص السلوكية والنفسية، كالتكيف الحراري، والعوامل الاجتماعية (العوامل الذاتية).

ولهذا، تركز دراستنا على تقييم الإدراك الحراري في مناخ قسنطينة الشبه جاف من خلال التحقق من خصائص الراحة الحرارية والتكيف النفسي التي عبر عنها الأشخاص الذين تمت مقابلتهم في الفضاءات الخارجية، وتحديد المساحات الحضرية العامة. ولهذا الغرض، تم اختيار ثلاث مساحات عمومية تقع بالقطاع المحمي للمدينة القديمة بقسنطينة من أجل إجراء هذا البحث. وهي كالتالي: ساحة سي الحواس "ساحة قصر الباي" وساحة الثورة المعروفة باسم ساحة "لا بريش" وأخيراً ساحة الحاج أحمد باي، متداول اسمها كساحة "دنيا الطرائف".

تجمع منهجية البحث بين مجموعة من الوسائل والأساليب والأدوات: كالمنهج المقارن والتحليلي من خلال مراجعة الدراسات العلمية السابقة وطريقة جمع المعلومات من خلال الاستبيان، وكذلك المنهج التجريبي من خلال القياسات المناخية الدقيقة. كما تم الاعتماد على برامج المحاكاة العددية التي تضمنت: برنامج RayMan و ENVI-met . science V5.0 المرحلة لأولية تتمثل في جمع البيانات المناخية المحلية والإحساس الحراري الشخصي عن طريق (TSV) في أن واحد، في ثلاث أيام صيفية في فترة ما بعد جائحة كوفيد (أغسطس 2021) وثلاث أيام شتوية (يناير 2022) تمثيلية على مستوى المساحات العامة المحددة للدراسة. بعد ذلك، تم إنشاء خريطة للراحة الحرارية للمساحات الخارجية عن طريق تصور نتائج المحاكاة من برنامج ENVI-met وبناءً على مؤشر درجة الحرارة الفسيولوجية المكافئة (PET). أخيراً استناداً على الربط بين مختلف المناهج، تم معالجة وتحليل جميع البيانات التي تم جمعها خلال العمل الميداني اثناء الفترة الدراسية الصيفية والشتوية باستخدام برنامج الإحصاءات SPSS V25.0.

تشير نتائج البحث الى ان: الظروف الصيف في قسنطينة، حيث يمكن أن تصل درجات حرارة الهواء إلى 42 درجة مئوية في الأماكن العامة، تكون أقل متعة وغير ملائمة بالنسبة للمشاة. ومن ناحية أخرى، لوحظت نسبة مرتفعة من الرضا الحراري خلال فترة الدراسة الشتوية. فيما أظهر تقييم تأثير العوامل المناخية على الإدراك الحراري وجود علاقة قوية ( $R^2=0.76$ ) خلال فصل الصيف. تماشياً مع الدراسات السابقة التي أجريت في المناخات الدافئة، كانت درجة حرارة الهواء العامل الأكثر تأثيراً في الإدراك الحراري الذاتي خلال الدراسات الميدانية في الصيف والشتاء. باختصار، تم الحصول على معادلتين تجريبيتين خاصة (بالصيف والشتاء)، مما يجعل من الممكن قياس التباين في الإدراك الحراري الخارجي كدالة للمعلمات المناخية للمناخ الشبه جاف في قسنطينة. أما بالنسبة لتأثير المتغيرات الذاتية (التكيف الحراري والسلوكيات التكيفية)، فقد أشارت نتائج الاختبار غير البارامترية إلى أن زمن التعرض للحرارة الخارجية ربما يكون له تأثير على الإدراك الحراري في الشتاء، أما في الصيف، فلم يسفر زمن التعرض عن تباين كبير. ومع ذلك، يؤثر التاريخ الحراري على المدى القصير بشكل كبير على الإدراك الحراري الشخصي خلال كلا الموسمين.

كما مكنت الطريقة المجمعّة بين متوسط تصويت الإحساس الحراري (MTSV) ومؤشر الراحة (PET) من تحديد درجة حرارة محايدة تبلغ (22.7 درجة مئوية) في الموسم الحار و (21.4 درجة مئوية) في الموسم البارد. تم تفسير هذا الاختلاف الطفيف البالغ (1.3 درجة مئوية) في درجات الحرارة المحايدة بين الصيف والشتاء بمستوى التكيف الحراري للسكان المحليين، والذي يركز بشكل أكبر على الظروف الحرارية العامة للمناخ شبه جاف، بدلاً من التكيف الحراري (الفسيولوجي والنفسي) الموسمي المحدد. ثم تم تحديد نطاق الحياد الحراري للفضاءات الحضرية الخارجية في مناخ قسنطينة الشبه جاف بين  $17.5^{\circ}\text{C} \leq \text{PET} \leq 26.2^{\circ}\text{C}$ .

**الكلمات المفتاحية:** الإدراك الحراري؛ درجة الحرارة المكافئة الفسيولوجية؛ تصويت الإحساس الحراري؛ المناخ شبه الجاف؛ نطاق الحياد الحراري؛ المساحات الحضرية العمومية؛ الاستبيان

## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Les villes jouent un rôle fondamental dans la vie moderne : environ 55% de la population mondiale réside actuellement dans les zones urbaines, en 1950 seulement 30% de la population mondiale était urbaine, on estime qu'au milieu du siècle (vers 2050) environ 68% de la population vivra dans les villes (United Nations et al, 2019). Cette évolution démographique met l'accent sur l'importance croissante des villes en tant que centres de vie, elle présente également des défis et des opportunités importants en matière de gestion urbaine, de durabilité et de conditions de vie.

À cela s'ajoute le problème écologique de par la consommation démesurée des ressources naturelles mettant en péril l'environnement à l'échelle planétaire. Les statistiques révèlent que les activités humaines sont fortement liées à la dégradation de l'environnement causée par la pollution. C'est pourquoi le groupe d'experts intergouvernemental sur le changement climatique (IPCC) (Stocker et al., 2013), a désigné les villes comme étant responsables de 70% des émissions de CO<sub>2</sub>, et que celles-ci exigent un approvisionnement continu en énergie consommant 75% de l'énergie primaire mondiale (Energy | UN-Habitat, 2020).

Cette combinaison entre l'expansion mondiale de l'urbanisation, la forte consommation énergétique, et les impacts du changement climatique propulse à affecter sérieusement les habitants des centres urbains, notamment par l'élévation du niveau de la mer et les inondations intérieures, ainsi que des épisodes extrêmes de canicule et de vague de froid (Climate change | UN-Habitat, 2020). À titre illustratif, des journées et des nuits plus chaudes avec une pollution d'air accrue peuvent provoquer un inconfort, des problèmes respiratoires et une mortalité liée à la chaleur, en particulier chez les personnes âgées et les enfants, en raison d'une ventilation inadéquate et du piégeage de rayonnement solaire au sein des canyons urbains (Naboni et al., 2019).

Un autre effet aussi négatif qu'important des vagues de chaleur, est qu'elles ont tendance à se produire plus fréquemment dans les régions urbaines que dans les régions rurales. Ce qui ne se limite pas uniquement à l'augmentation de la densité démographique, mais aussi à la morphologie urbaine et au manque de végétation qui sont à l'origine de l'effet d'îlot de chaleur urbain (Ata Chokhachian et al., 2017).

Cette croissance accélérée de la population dans les milieux urbains, associée à l'augmentation des surfaces de béton imperméables, à la pollution industrielle et à la

destruction des sites naturels, altère le microclimat urbain (Wang and Akbari, 2014). Les impacts de ces changements aussi bien sur le microclimat que sur le confort thermique humain ont des effets néfastes sur la santé humaine qui fait l'objet d'une attention grandissante (Campbell-Lendrum and Corvalán, 2007; Frank et al., 2013).

Ce scénario indique la nécessité de passer à une approche centrée sur l'homme pour faire face aux impacts inévitables du changement climatique dans l'environnement bâti. Comprendre le microclimat local au niveau pédestre est crucial pour atteindre cet objectif, car la planification urbaine est confrontée à l'énorme défi de développer et d'appliquer des mesures qui peuvent atténuer le stress thermique humain sous une chaleur prédéterminée au niveau régional. Comme ces mesures doivent être axées sur les citoyens, elles nécessitent une base de biométéorologie humaine.

Depuis le début des années 2000, diverses recherches (Nikolopoulou et al., 2001; Givoni et al., 2003; Zacharias et al., 2004; Thorsson et al., 2004; Knez and Thorsson, 2006; Katzschner, 2006; Lin and Matzarakis, 2008) ont été menées afin d'évaluer les l'environnement thermiques pour les individus, et de catégoriser le stress thermique. Ces recherches ont été effectuées à l'échelle mondiale, couvrant de nombreux climats et différentes cultures. Ainsi, elles visent à identifier les conditions thermiques pour lesquelles les habitants dans une région climatique ou géographique particulière se sentiraient neutres ou confortables (Lai et al., 2020).

Au-delà, une base de données significative existe considérant une question intéressante qui est celle de savoir s'il serait possible de comparer les résultats et de calibrer les indices thermo-physiologiques dans des climats et des cultures différentes pour distinguer les variations dans les conditions du confort thermique et de la perception thermique entre eux.

À priori, en nous appuyant sur des données antérieures (Lin, 2009; Mahmoud, 2011; Chen and Ng, 2012; Coccolo et al., 2016; Lai et al., 2017, 2020; Potchter et al., 2022), une telle recherche nécessite une enquête par questionnaire pour comprendre la perception subjective de l'environnement thermique, même si celle-ci est évaluée en rapport aux données météorologiques objectives simultanément collectées.

À ce sujet, Tuomaala et al, (2013) ont discuté de la logique sous-jacente d'une approche plus holistique de la sensation thermique, où des variables externes relatives à l'environnement et des aspects internes liés au sujet participent à la sensation thermique perçue.

En effet, des études multidisciplinaires couvrant plus d'un siècle, ont abouti à une compréhension approfondie des caractéristiques de la perception thermique humaine. Cependant, (Schweiker et al., 2018) ont souligné que, ces dernières années l'intérêt pour ce domaine d'étude a resurgi, et ceci peut être attribué à l'exploration croissante des variations individuelles, aux nouvelles méthodologies pour prédire la perception thermique et aux problématiques mondiales et locales associées à la compréhension de la perception thermique.

## **Problématique**

Le confort thermique extérieur est si problématique car en plus des conditions atmosphériques, il est tributaire des facteurs physiques, physiologiques, psychologiques et comportementaux (d'adaptation). Ces conditions et facteurs induisent une réponse subjective, la perception thermique est si problématique qu'elle fait l'objet de nombreuses études de biométéorologie humaine (Middel et al., 2016).

Des recherches antérieures (Becker et al., 2003; Chen and Ng, 2012; de Dear et al., 1998; Humphreys and Hancock, 2007; Perera et al., 2015; Spagnolo and de Dear, 2003) ont été menées pour comprendre la perception thermique dans les environnements intérieurs et extérieurs. Beaucoup d'entre elles utilisent des méthodes d'évaluation adéquates aux espaces intérieurs pour les environnements extérieurs en s'appuyant sur des hypothèses telles que les conditions d'air stagnant ou en négligeant l'effet du rayonnement solaire (Cheng et al., 2012; Nikolopoulou et al., 2001).

D'après (Johansson et al., 2014) les études sur le confort thermique intérieur sont généralement menées dans des conditions climatiques contrôlées et peuvent s'appuyer sur plusieurs directives et normes existantes, l'évaluation du confort thermique extérieur est plus complexe car les conditions thermiques sont moins stables de ce fait, ***quelle est l'approche la plus adéquate à adopter dans le contexte de la perception thermique extérieure ?***

Le fait est que les percepteurs se sentent à l'aise à l'extérieur ; ce qui est dû aux influences par leurs expériences et leurs attentes dans les environnements thermiques. Par exemple, à 26°C (PET), les personnes vivant dans des zones tempérées peuvent percevoir (ou sentir) la chaleur plus que celles vivant dans des zones tropicales (Lin et al., 2013). ***Sous climat semi-aride à 26°C de (PET), est-ce que les personnes vivant dans un espace urbain se sentent en confort ?***

Bien que la relation entre le confort thermique et l'environnement bâti ait tendance à être forte, les facteurs environnementaux, y compris les conditions météorologiques, ne représentent généralement que la moitié de la variance de la sensation thermique (Nikolopoulou and Steemers, 2003).

Les 50 % restants peuvent être attribués à un paramètre humain dynamique, qui est composé non seulement de caractéristiques personnelles tels que l'âge et le sexe, de facteurs physiologiques comme le poids et la forme physique, de facteurs psychologiques incluant l'expérience passée, les attentes, l'histoire thermique, le contrôle perçu et l'appréciation esthétique, mais aussi d'aspects comportementaux tels que l'isolation des vêtements, le taux métabolique, le temps d'exposition et le choix du lieu (Chen and Ng, 2012; Nikolopoulou and Lykoudis, 2007). Tous ces facteurs doivent être pris en compte pour bien saisir la réponse holistique de la perception thermique.

Sur la base de l'examen ci-dessus et la revue de littérature (**cf. chapitre 3, pp : 75**), on peut constater que la plupart des études sur la perception thermique extérieur ont été effectuées dans des climats tempérés (Pantavou et al., 2013; Tsitoura et al., 2014; Salata et al., 2016) et froids (Krüger et al, 2013 ; Lindner-Cendrowska&Błażejczyk, 2018 ; Hirashima et al., 2018 ; Chen et al, 2020). Ou dans des climats chauds et humides tels que à Hong Kong, Taiwan (Hwang and Lin, 2007; Lin, 2009; Lin et al., 2011), Singapour (Yang et al., 2013), et Guayaquil en Equateur (Johansson et al, 2018), mais relativement peu de recherches ont été réalisées sous un climat semi-aride (Yahia & Johansson, 2013 ; Canan et al, 2019). Ceci nous interpelle à évaluer les conditions de l'environnement thermique extérieur lié à la perception thermique à Constantine. Nous examinons si ces caractéristiques de confort thermique et d'adaptation psychologique sont reflétées par la pratique des espaces extérieurs (urbains) en question.

- **Cadrage spatial et temporel**

La délimitation de notre champ d'investigation émane du projet de recherche PRFU qui s'inscrit dans le contexte d'une convention établie entre le laboratoire Architecture Bioclimatique et Environnement (ABE) et le musée Public National des Arts et Expressions Culturelles Traditionnelles de Constantine. Nous avons été initiés à effectuer des investigations sur la place du palais appelée (*Si el Haoues*) en tant qu'objet d'étude lié à la thèse. Ainsi, cette place du palais a été sélectionnée comme champ d'investigation pour notre thématique offrant un intérêt majeur d'un point de vue urbain et architectural.

En effet, l'approche théorique, la pré-investigation basée sur l'observation et la validation du questionnaire-test, nous a interpellées à élargir davantage notre champ de recherche par d'autres places publiques situées dans le secteur sauvegardé de la ville de Constantine. De ce fait, notre champ d'étude expérimental concerne trois places publiques ; il s'agit de la place *Si el Haoues* connue par la place du 'palais', l'esplanade de la Révolution connue par 'la Brèche', et la place *Hadj Ahmed Bey* connue par la place '*Dounia Ettraif*'.

D'autre part, l'évaluation de la perception thermique en climat semi-aride de Constantine a été effectuée sur une période de six jours couvrant la saison chaude (Août 2021) et froide (Janvier 2022). De plus, la collecte des diverses données s'est déroulée du matin au soir sans interruptions pour capturer les variations diurnes et la diversité d'expériences thermiques au sein de cette population. Une enquête prolongée permet aussi d'obtenir une image exhaustive des aspects comportementaux et différents phénomènes étudiés en minimisant les biais temporels.

- **Cadrage sémantique**

**La perception thermique** englobe deux dimensions sémantiques principales ; la sensation thermique et le confort thermique (Vellei et al., 2021).

- La sensation thermique (c'est-à-dire se sentir chaud, neutre, froid, etc.) est considérée de par sa dimension objective ou descriptive. Il est important de noter que, la neutralité thermique est lorsque le corps humain parvient à maintenir sa température constante sans activer ces mécanismes thermorégulateurs pour lutter contre les variations de la chaleur ou du froid (Boussoualim, 2002).
- Le confort thermique est la composante affective ou hédonique de la perception thermique (**cf. chapitre 2, pp : 44**).

**La place publique** se définit comme un espace public dynamique à la fois par ses caractéristiques et ses fonctions, tels que le déplacement, l'interaction, ainsi que la promenade. Cet espace se caractérise par ses dimensions spatiales en termes de hauteur, longueur, et largeur, ainsi que par son tracé géométrique. La place, créée par nécessité de rassemblement, a évolué pour devenir la base des activités vitales de la ville (**cf. chapitre 1, pp : 17**).

- **Question principale**

Au-delà, nous posons la question principale suivante : « *En application sur les places publiques de Constantine, quelle serait la plage de confort thermique extérieur en climat semi-aride ? Quelles seraient les valeurs neutres de (PET) pendant les périodes (estivale et hivernale) ?* »

Les sous-questions suivantes nous conduiraient à cerner d'avantage notre problématique :

- Quelle est la variable microclimatique (température de l'air, vitesse de vent, humidité relative...) la plus influente sur la perception thermique durant la saison chaude et froide de l'année ?
- Comment peut-on évaluer l'effet des facteurs subjectifs tels que (les comportements adaptatifs et l'adaptation thermique) sur la perception thermique des individus ?

### **Hypothèses de la recherche**

Pour répondre à la question principale, nous testons l'hypothèse suivante : « *Sous un climat semi-aride, en matière de perception thermique extérieure la plage de neutralité thermique dépasse la fourchette initiale de (PET) qui varie entre 18 °C et 23 °C.* »

Elle est soutenue par les sous hypothèses suivantes :

- Durant la saison estivale et hivernale de l'année, la température de l'air est la variable microclimatique déterminante de la perception thermique dans les espaces urbains.
- L'effet des facteurs subjectifs (l'adaptation thermique) sur la perception thermique des individus peut être évalué par un test statistique non paramétrique.

### **Objectifs de la recherche**

Ainsi, notre premier objectif de ce sujet est l'évaluation de la perception thermique il s'agit donc de *définir la plage de neutralité thermique, par la suite de calibrer l'indice thermo-physiologique (PET) pour le climat semi-aride de Constantine*. Pour se faire, nous avons à définir les températures neutres de (PET) pendant la période estivale et hivernale.

Cette recherche cible deux autres objectifs qui seraient les suivants :

- Identifier les facteurs microclimatiques (objectifs) et les facteurs subjectifs (adaptation thermique) qui influent la perception thermique dans les espaces urbains notamment (les places) sous un climat semi-aride.
- Transmettre une méthode d'évaluation de la perception thermique dans les espaces urbains fondée sur la triangulation des mesures micro-météorologiques ; enquête par questionnaire et simulation numérique.

### **Méthodologie de la recherche**

Afin de déterminer la neutralité thermique en climat semi-aride et sachant que la perception thermique relève du cognitif et qu'elle est aussi subjective, *comment peut-on l'évaluer dans les places publiques de Constantine sous climat semi-aride ?* Ce qui nécessite une méthodologie regroupant un ensemble d'approches, de méthodes et d'outils (cf. chapitre 4, pp : 99) dont l'approche analytique et comparative par un état de l'art et la méthode de l'enquête par le questionnaire, ainsi que la démarche expérimentale par les mesures microclimatiques in situ.

De plus, pour compléter l'étude expérimentale, des simulations numériques ont été effectuées davantage en offrant des perspectives supplémentaires et en permettant de calculer l'indice thermique (PET).

- **Approche analytique et comparative par un état de l'art**

Une synthèse d'une exploration bibliographique visant à délimiter et à appréhender les diverses perspectives formulées sur le thème, ainsi que les éléments théoriques fondamentaux qui orientent la présente recherche.

Premièrement, la sélection de documents (articles, thèses) a été faite en nous basant sur le titre, le résumé et les mots clés. L'objectif est l'élimination de quelques articles dont le contenu ne s'inscrit pas dans le domaine ciblé, puis la sélection définitive de ceux à étudier profondément.

Deuxièmement, nous avons procédé à une lecture critique et minutieuse des documents sélectionnés en identifiant leur apport, la contribution principale et l'approche proposée. Suivant cette schématisation, plusieurs recherches sont analysées, dans un panorama des différentes approches d'évaluation de la perception thermique en extérieur, qui se veut représentatif.

Notant aussi que les articles scientifiques examinés ont été effectués dans différentes régions climatiques à travers le monde en utilisant différentes méthodes pour la collecte des données.

Une comparaison des approches d'évaluation a été menée afin d'identifier les diverses techniques de collecte de données météorologiques (saison d'investigation, durée de mesure, et les outils utilisés pour la surveillance microclimatique), de délimiter les reports de la sensation thermique et les méthodes de modification des échelles des indices du confort thermique. Par la suite, selon l'approche de calibration appliquée, les seuils

- **Démarche expérimentale par les mesures microclimatiques**

L'acquisition des variables microclimatiques est généralement réalisée par des capteurs et des instruments qui surveillent plusieurs paramètres climatiques notamment, la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, et les radiations solaires.

Pour effectuer nos mesures, nous avons utilisé l'instrument Delta OHM HD 32.3 qui est conçu pour l'étude des régions à climat chaud en présence ou absence de radiation solaire. Ainsi, des mesures estivales et hivernales in situ dans les trois places définies ont été effectuées lors des journées représentatives d'été au mois d'Août 2021 (dans la période post-pandémique) et d'hiver au mois de janvier 2022.

- **Méthode d'enquête par questionnaire**

Le choix du questionnaire comme outil nous permet de collecter des données palpables, et des informations subjectives sur la perception de l'environnement thermique par les individus.

L'enquête de terrain a été effectuée simultanément avec les mesures microclimatiques, en nous basant sur des mesures subjectives pour aborder les facteurs non-environnementaux (physique, physiologique et psychologique ainsi que les aspects comportementaux d'adaptation thermique).

- **Simulations numériques**

Nous avons utilisé deux logiciels dont le premier est RayMan pour calculer l'indice thermo-physiologique (PET) pour chaque enquêté, le deuxième est ENVI-met Science (V5), Six jours de simulation ont été lancés, répartis en trois jours pour la période estivale et hivernale. Ces journées correspondaient aux jours de l'enquête sur terrain dans les trois

places publiques définies. Enfin, les résultats ont été visualisés par des cartes du confort thermique extérieur utilisant l'indice (PET).

- **Traitement et triangulation des données dans SPSS**

Basée sur la triangulation des différentes approches, l'ensemble des données collectées lors des investigations estivales et hivernales a été traité et analysé à l'aide du logiciel de statistiques SPSS V25.

### **Structure de la thèse**

La thèse est structurée en six chapitres qui se présentent comme suit :

- **Le premier chapitre** aborde la dimension physique et spatiale de l'espace public, ensuite nous examinons les places publiques (objet d'étude) en considérant leur évolution formelle et fonctionnelle à travers l'histoire. Notre perspective s'élargit pour traiter les concepts fondamentaux liés à la perception, à l'évaluation et au comportement.
- **Le deuxième chapitre** considère la perception de l'environnement thermique et les différentes interactions associées aux échanges thermiques dans les espaces urbains ainsi que les facteurs affectant la perception thermique, comprenant les variables physiques (variables microclimatiques et facteurs géométriques), et les variables humaines (paramètres sociodémographiques et adaptation thermique). Nous mettons aussi, l'accent sur les mécanismes physiques et le traitement cognitif des stimuli thermiques. Ce chapitre expose enfin les divers indices et modèles d'évaluation du stress thermique dans l'environnement urbain.
- **Le troisième chapitre** expose les études préliminaires portant sur la perception thermique en environnement extérieur dans l'objectif d'identifier les techniques d'évaluation, et les procédures de modification des seuils d'échelle des indices du confort thermique. Un cadre fondamental pour l'évaluation de la perception thermique y est présenté dans la dernière section.
- **Le quatrième chapitre** présente notre méthodologie d'approche et explicitement notre terrain d'investigation, ainsi que l'ensemble des méthodes adoptées et les outils employés pour collecter, analyser, et interpréter les données.

- Au vif du sujet, **le cinquième et sixième chapitre** étalent nos résultats d'investigation sur les places publiques de Constantine ainsi que les analyses et les discussions de ces résultats ainsi :

Au chapitre cinq, l'évaluation objective (quantitative) est basée sur des mesures microclimatiques et des sondages subjectifs où différentes échelles de jugements ont été examinées au moyen d'analyses statistiques.

Dans chapitre six, les résultats de neutralité thermique et calibration de l'indice du confort thermique pour le climat semi-aride de Constantine ainsi que les cartes du confort thermique extérieur générées à l'aide du logiciel ENVI-met ont été présentés.

Une conclusion générale, une bibliographie et des documents annexes nécessaires à la lecture de la thèse dans son intégralité marquent la fin sans s'encombrer.

## **CHAPITRE I**

# **PLACE PUBLIQUE ET MÉCANISMES DE LA PERCEPTION DE L'ESPACE**

# CHAPITRE I : PLACE PUBLIQUE ET MÉCANISMES DE LA PERCEPTION DE L'ESPACE

## 1. Introduction

La ville se dévoile comme un agencement d'éléments physiques, à savoir les édifices, et de vides qui se matérialisent comme les espaces publics, désignés également, selon les acteurs urbains, comme des espaces ouverts (Giedion, 2009). Ces derniers représentent le cadre de la vie collective des citoyens offrant un lieu propice aux rencontres, encourageant les rassemblements, le contact, les échanges et la convivialité. Historiquement, ils ont toujours occupé une place significative dans la structuration des villes et dans la réflexion architecturale et urbaine.

La matérialité de l'espace public ne réside pas exclusivement dans les actions des usagers ; elle crée cependant le contexte physique dans lequel se manifestent diverses formes de leurs activités dans cet espace. Ainsi, on ne peut séparer les aspects physiques et les dimensions sociales d'un lieu (Boutebba, 2019). Tout espace est toujours le résultat d'une construction sociale dans laquelle les pratiques sociales qui y sont associées ne sont pas simplement observables mais aussi explicables.

Tout d'abord, dans ce chapitre, nous examinons la dimension physique et spatiale de l'espace public avec un regard épistémologique sur cette notion aux caractéristiques complexes. Cela inclut une discussion sur les formes et les fonctions de l'espace public ainsi que les acteurs urbains qui le pratiquent.

Ensuite, nous nous penchons de manière plus spécifique sur l'étude des places publiques. En considérant leur évolution formelle et fonctionnelle, ainsi que leur appropriation et leur rôle polyvalent à travers l'histoire, nous cherchons à saisir la complexité de ces espaces qui jouent un rôle central dans le tissu urbain.

La dernière section élargit notre perspective pour englober la problématique liée à l'interaction de l'homme avec son environnement de manière holistique. A travers l'exploration de concepts fondamentaux liés à la perception, à l'évaluation, et au comportement. Dans un processus cognitif, nous cherchons à éclaircir les mécanismes sous-jacents qui façonnent les perceptions expliquant les comportements des usagers au sein de l'espace urbain notamment la place publique comme espace à ciel ouvert, ouvert à tous et à de diverses pratiques.

## 1.1 Epistémologie de l'espace public

L'usage de 'espace public' au singulier est lié à la philosophie politique, alors que l'utilisation de 'espaces publics' au pluriel est davantage associée à une perspective urbanistique. En nous référant aux travaux de J. Habermas en sciences politiques publiés en Allemagne en 1962 et traduits en langues française en 1978, la notion de 'espace public' en la reliant à l'opinion publique a émergé dans les sociétés occidentales à l'époque moderne. De nombreux experts de différents profils tels que les urbanistes, philosophes, sociologues et historiens considèrent également que l'origine du concept 'espace public' est nécessairement jointe à l'idée de publique (Marry, 2011).

En terme précis, un espace public est défini comme l'un des espaces où les individus peuvent participer à des activités sociales. Dans le contexte urbain, ce type d'espace se distingue par son statut public, ce qui signifie qu'il est accessible et ouvert à l'usage par le grand public plutôt que d'être privatisé (Lévy et al., 2013).

Cependant, il est important de reconnaître que les termes 'privé' et 'public' ne sont pas universellement applicables, car leur interprétation est fondamentalement influencée par la langue, la culture, la société, l'époque ou le domaine d'étude dans lequel ils sont employés. Il est à noter que les termes 'privé', 'public', sont contemporains dans leur apparition dans les principales langues européennes (Lévy et al., 2013).

Étymologiquement, le terme 'public' trouve son origine dans le mot latin '*publicus*', dérivé de '*pubes*' désignant la population masculine adulte capable de participer aux délibérations, et de '*populus*' signifiant l'ensemble de la population. Le terme "public" évoque la nature partagée de la communauté, la place publique en est une illustration notable. Par ailleurs, le terme 'privé' provient du mot latin '*privatus*', signifiant 'particulier' ou 'individuel' (Duby, 1999).

En effet, il a été constaté que temporairement les notions 'espace collectif' ou 'centre civique' étaient en usage pendant les années 1940 et 1960, pour céder à la prédominance du concept 'espace public' lors de son émergence au milieu des années 1970 (Tomas, 2003).

D'un point de vue pragmatique, on considère les espaces publics comme étant des territoires communaux qui présentent diverses dimensions, conceptions et accessibilités, intrinsèquement ouverts à tous les individus de la société. Ces lieux se distinguent par une multitude d'activités et un nombre significatif de participants (Serfaty, 1988).

En sociologie urbaine, les espaces publics sont définis comme des lieux de rassemblement socialement organisés à travers des modes d'interaction ou d'évitement. Ils symbolisent tous les espaces de passage et de rassemblement accessibles à tous. Ils constituent le principal support des interactions au sein des réseaux sociaux et des pratiques culturelles, ainsi que l'espace fondamental pour l'intégration urbaine (Fleury, 2010).

En matière d'urbanisme, Merlin & Choay (2010), fournissent une définition de l'espace public en tant que :

- Un espace partagé, contrairement à un lieu privé et clos conçu pour l'intimité familiale, c'est un espace ouvert partagé par l'ensemble de la communauté. Il est accessible à tous, sans discrimination. Il constitue un espace partagé idéal et un lieu de rencontre où les individus peuvent circuler.
- Un espace acquis par des individus à travers leurs usages, il est communément considéré comme une partie du domaine public non aménagé désignée à des fins d'utilisation publique. Il s'agit d'un espace dédié à une séquence diversifiée d'activités qui ne sont pas impérativement définies, et chacun est libre de faire ce qu'il espère dans les limites de la loi.
- Enfin, un espace ouvert permettant aux individus de circuler librement. Cet espace englobe à la fois des structures architecturales dans une trame verte tels que des parcs et des jardins.

### **1.1.1 Caractéristiques et complexité de l'espace public**

L'espace public se distingue par sa variété, tant en termes de diversité des lieux, de configurations variées qu'il adopte, et des fonctions multiples qu'il remplit. Il compte à la fois des dimensions symboliques et physiques.

Dans un sens métaphorique, l'espace public est interchangeable avec la sphère publique ou le domaine du discours public. Il est décrit comme un lieu de mixité sociale acceptée, où différentes classes sociales coexistent. De plus, sa mixité fonctionnelle est soulignée, s'opposant à la mono-fonctionnalité qui ne caractérise pas les espaces publics.

En tant qu'environnement physique, l'espace public facilite l'engagement social et l'interaction. Il peut également faire référence à un emplacement géographique spécifique accessible au grand public. De plus, il peut être considéré comme un cadre conceptuel pour divers types d'activités. Y. Chalas met en avant le caractère inhabitable de l'espace public, opposé à l'intimité de l'habitable. L'habiter est associé à l'identification et à l'appropriation,

soulignant que l'habitude, étymologiquement liée à 'habiter', est un élément clé dans la compréhension de cet espace (Chalas, 1997).

### 1.1.2 Catégories de l'espace public

L'espace public se caractérise par sa diversité de formes. À cet égard, on distingue trois catégories où la première qui est liée aux flux piétons et mécaniques regroupe (rue, ruelle, boulevard et avenue). La deuxième qui est à caractère végétal englobant la trame verte (jardin public, square pouvant être aménagé au centre d'une place et parc urbain) (Benhassine Touam, 2009), et enfin la troisième catégorie qui s'intéresse aux diverses places publiques, comporte ; en plus de l'esplanade ; la place du marché et la place qui sont détaillées ci-dessous (Boutebba, 2019):

- **L'esplanade** : terrain aménagé devant une structure ou une maison pour dégager l'espace environnant. C'est une parcelle de terrain en hauteur qui offre une vue sur les environs.
- **La place du marché** : c'est l'emplacement habituel du marché, dont la taille varie en fonction de sa disposition spécifique. Il constitue le lieu privilégié pour les transactions commerciales.

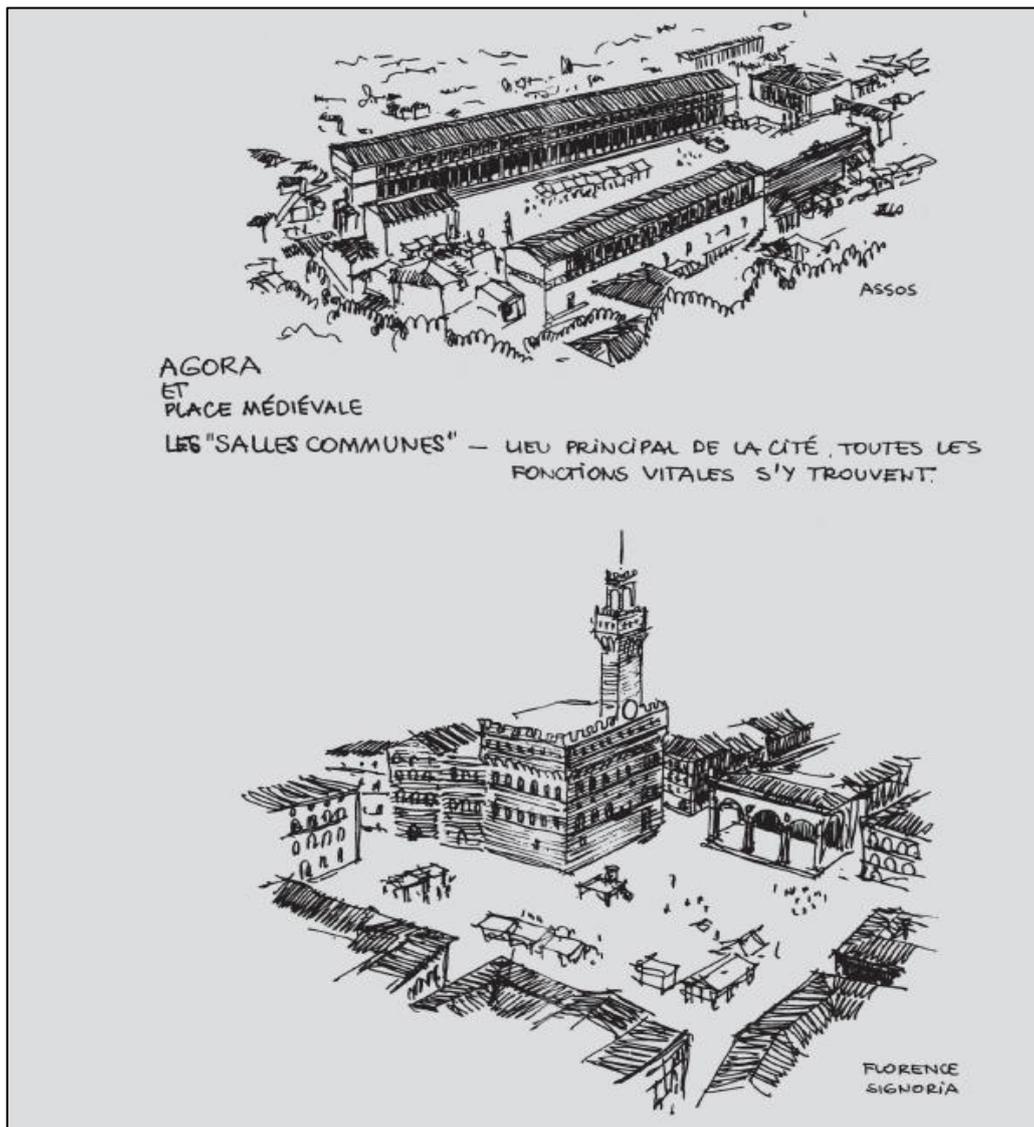
## 1.2 La place publique dans une évolution historique

La place est le premier type d'espace public créé par l'homme, elle émane de l'assemblage de maisons autour d'un espace dégagé. Grâce à cette disposition un maximum de contrôle public dans l'espace intérieur est assuré, et instaurait également un procédé de défense à l'extérieur, puisqu'elle minimise la surface de front à préserver. Cette forme d'agencement aux alentours d'une cour, fréquemment chargée d'une signification symbolique, a été préférée comme espace pour de divers lieux de culte (agora, forum, cloître, cour de mosquée) (Krier, 1975).

L'idée de la place publique trouve ses racines dans l'agora grecque, qui était une esplanade au XIIIe siècle avant J-C, entourée de bâtiments publics et dédiée au débat public. Sous l'influence d'Hippodamos de Milet, l'agora évolue au Ve siècle avant J-C en un espace carré cadastré au sein d'une cité construite de manière orthogonale (Marry, 2011). Le forum, un terme dérivé de la Rome antique, désigne est une grande pavée étendue, encadrée par des portiques, qui représente le point central des cités romaines, situé à la convergence du 'cardo' et du 'decumanus'. En tant que lieu privilégié de rassemblement, il accueille

progressivement diverses fonctions, incluant celles liées au domaine juridique, religieux, politique, culturel et commercial (Merlin et al., 2010).

La place médiévale en tant qu'espace fonctionnel (**Figure 1.1**), entouré des monuments de la cité et jouant un rôle actif dans la vie urbaine. L'appropriation constante de ces espaces en fait des lieux très fréquentés. Cette configuration facilite les déplacements, les rencontres, ainsi que la tenue de marchés ou de foires (Merlin et al. 2010).



**Figure 1. 1.** Agora grecque et place médiévale

Source : (Bertrand & Listowski, 1984) de (Marry, 2011)

Jusqu'au XIII<sup>e</sup> siècle, la seule place publique dans la ville médiévale était le parvis de la cathédrale, se référant à un espace ouvert devant la façade principale d'une église. Depuis

au moins le XVII<sup>e</sup> siècle, le sens du terme "parvis" a été élargi pour englober toute place située devant un édifice important (Gauthiez, 2003).

L'agora grecque et la place médiévale ont historiquement été des centres privilégiés pour les fonctions urbaines, symbolisant la place publique et sa polyvalence (**Figure 1.1**).

Contrairement aux forums antérieurs, les places médiévales ne suivent aucune composition d'ensemble, leur forme étant anarchique, dépourvue de plan initial, et elle évolue suivant les adaptations de la morphologie urbaine. L'absence de perspectives et de plans d'ensemble les singularise catégoriquement de l'aspect géométrique des forums antérieurs (Marry, 2011).

La place évolue pour devenir un lieu dont la principale fonction est de magnifier un palais, une église, une statue équestre, ou même d'incarner en elle-même des valeurs esthétiques (Bertrand & Listowski, 1984). « *L'idée de dégager un espace central dans la ville serrée dans ses murailles, de constituer un vide donc, et de lui faire jouer un rôle structurant, est largement une réinvention de la renaissance* » (Jakovljevic & Culot, 1984).

L'ère de la Renaissance, distinguée par l'importance de la géométrie et des proportions, a engendré une modification dans la fonction des espaces publics. Durant cette époque, les notions de 'qualité' et de 'composition' de l'espace sont devenues fondamentales, les places de la renaissance exhibant des caractéristiques diverses en fonction des attributs politiques et sociaux distincts de chaque nation (Korosec-Serfaty, 1988).

La Renaissance a révolutionné la conception urbaine en privilégiant les principes de la perspective, de la structuration de l'espace et de l'embellissement des places publiques avec des sculptures imposantes. Pendant la période classique des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles, les places royales se distinguaient par l'ajout de multiples places, parcs et promenades, ce qui a contribué à embellir les villes (Marry, 2011). Cette tendance d'embellissement de l'espace public gagne en importance dans la ville baroque. « *Le décor devient une fonction* » (Bertrand & Listowski, 1984).

À mesure que la ville industrielle se développait, la pratique de l'appropriation collective diminuait progressivement. Dans cette société, les activités communales étaient principalement confinées à des structures fermées telles que les marchés et les auditoriums, tandis que l'environnement urbain subissait une forte influence des systèmes de transport. L'urbanisme introduit de nouvelles places, devenant des composants essentiels des systèmes de circulation. Ces places ne privilégient plus les piétons, mais elles peuvent inclure un monument au centre (Merlin et al, 2010).

Progressivement, l'espace a évolué pour devenir un vrai « *vide entouré de constructions* ». Ce vide s'est graduellement rempli d'un trafic automobile de plus en plus dense et encombrant : la place, transformée en un point central de la circulation, est devenue difficile à traverser, peu accueillante pour les piétons, et finalement impraticable.

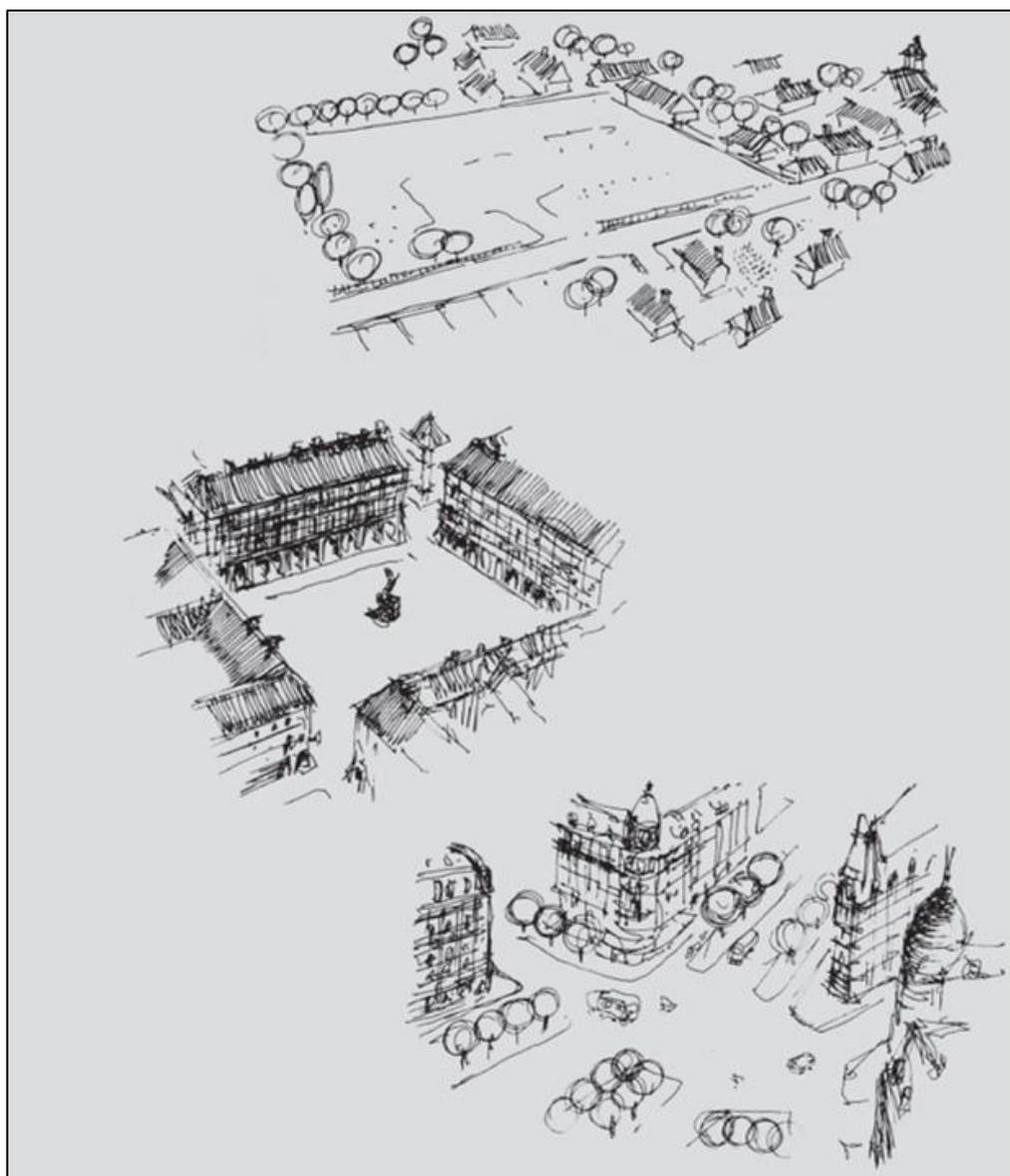
Les objectifs du mouvement moderne ont été examinés et mis en avant lors des conférences internationales d'architecture moderne du CIAM. Ces congrès ont défini les fonctions principales de la ville, à savoir habiter, travailler, circuler et se récréer. La place occupait une position cruciale dans les aspects économiques, représentatifs et symboliques tant de la ville que du pays. Cependant, vers 1970, une transformation distinctive a été constatée : l'aménagement de zone de stationnement (parking) et l'édification de nouvelles routes communicatives ont conduit à la décomposition de la place en plusieurs sections. La priorisation du trafic automobile, motivée par l'idéologie fonctionnaliste, a entraîné la démolition de nombreux bâtiments marquant la périphérie de la place (Mebarki, 2012).

Cette composante de l'espace urbain présente de multiples caractéristiques et répond à diverses fonctions de la vie urbaine. La forme, les activités et la représentation symbolique de la place publique sont autant d'éléments contribuant à sa fonctionnalité et à son caractère formel. De plus, ils lui confèrent une dimension émotionnelle et informative. Agora, forum, parvis, esplanade, terrasse, place, place d'armes, place royale et place médiévale sont tous des termes qui désignent des espaces publics pouvant présenter des similitudes. Comment pouvons-nous caractériser ces espaces, souvent divers tant au niveau de leur forme que de leur fonction ?

### **1.2.1 La place en rapport à la typologie urbaine**

Le terme 'place publique' trouve son origine dans le latin '*platea*, signifiant rue large et désignant un lieu à caractère public en plein air souvent ouvert sur le ciel et entouré de constructions. Mis à part l'anglais favorisant le terme '*square*', dans les langues européennes, il évolue pour devenir; *place, piazza, plaça, plaza, platz, plein, plads*, (Ananiadou-Tzimopoulou et al., 2007).

En terme social, dans l'environnement urbain la **(Figure 1.2)** illustre comment Bertrand et Listowski définissent l'emplacement des places comme des espaces publics centraux, au sens non topographique.



**Figure 1. 2.** La place publique comme espace urbain central

Source : (Bertrand & Listowski, 1984) de (Marry, 2011)

L'histoire des places révèle qu'elles sont principalement déterminées par leurs aspects fonctionnels et formels. La place, créée par nécessité de rassemblement, a progressé pour devenir la base des fonctions vitales de la ville. De même, la place exemplaire est représentée dans l'imaginaire collectif comme un centre privilégié pour la convivialité et l'interaction sociale (Korosec-Serfaty, 1988). Ces dimensions aussi bien historiques que fonctionnelle et même formelle, suscitent une certaine ambiguïté dans la caractérisation de la place : s'agit-il d'un espace destiné à des activités ou bien d'un vide encadré par des structures bâties ?

## 1.2.2 La place publique fonctionnelle

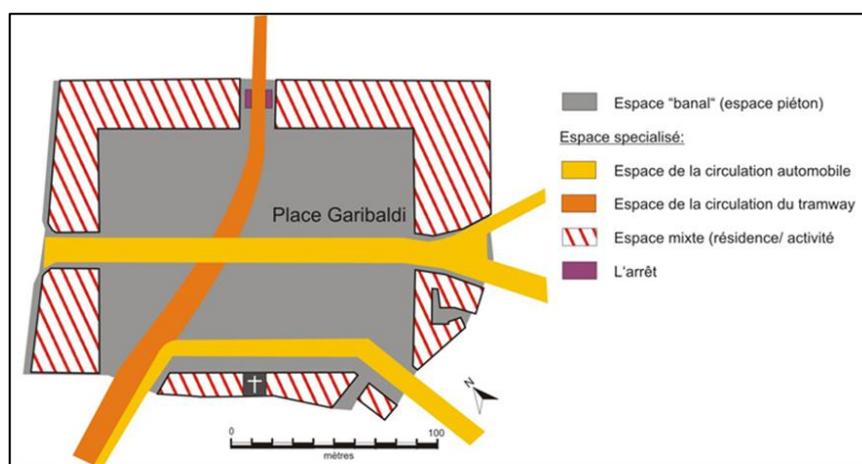
L'historique des places publiques suggère qu'elles ont été édifiées dans plusieurs buts en l'occurrence ; l'aération de la ville dans pour promouvoir l'hygiène, l'incorporation du rythme dans l'aménagement urbain, l'expression du pouvoir (place royale, place de la république), la célébration d'événements historiques d'une nation (place de la révolution), et les activités usuelles ainsi que celles qui expriment l'identité communautaire (Place du palais, Place de la mairie) (Korosec-Serfaty, 1999).

A ce titre, Korosec-Serfaty note que, même les petites places situées dans des quartiers résidentiels ou historiques jouent un rôle central en offrant une identité territoriale et architecturale distincte. Elles sont utilisées pour les loisirs, les rassemblements religieux ou politiques, mais aussi pour des activités ordinaires telles que la marche et les courses.

Pour examiner les fonctions d'une place, il faut distinguer l'interaction entre deux types d'espaces: l'espace 'banal' et l'espace 'spécialisé' comme défini par (Jacobs et al., 2012).

L'espace 'banal' est destiné aux piétons, agissant comme une connexion entre les bâtiments et les activités tout en remplissant des fonctions sociales et de sécurité. Il peut se manifester sous forme de trottoirs ou de zones pavées au sein d'une place.

Tandis que, l'espace 'spécialisé' fait référence à des espaces spécifiquement conçus à des fins particulières, tels que des bâtiments ou des zones dédiées à la circulation automobile et au stationnement (**Figure 1.3**).



**Figure 1. 3.** Schéma simplifié illustrant l'espace 'banal' et l'espace 'spécialisé'

Source : (<https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/espaces-publics-places>)

Dans la ville, les fonctions présentes sur une place, résultent des choix d'aménagement urbain et peuvent engendrer des synergies ou des conflits d'usage. Diverses fonctions sont

évoquées, telles que la fonction commerciale, incluant grandes surfaces, petits commerces, et restaurants. Cette fonction peut se manifester sous forme de marché en plein air ou kiosque.

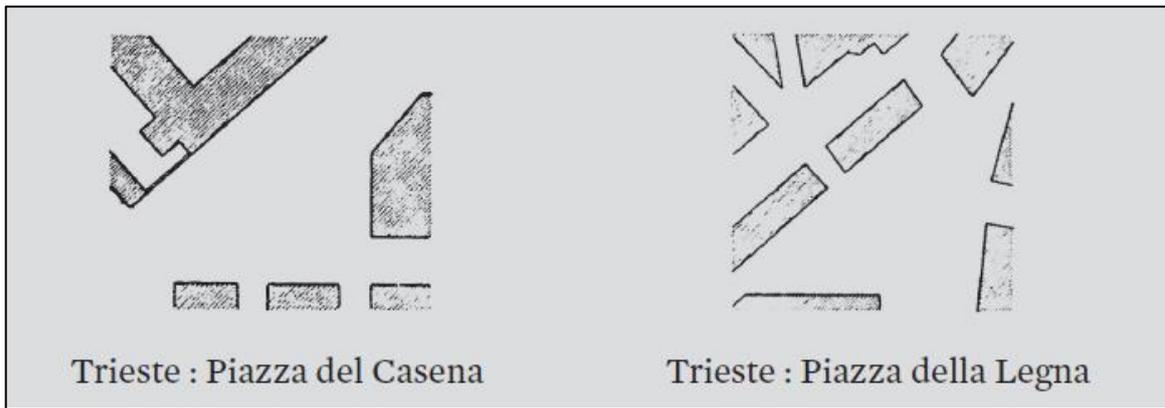
L'aspect récréatif d'une place publique est illustré par le mobilier urbain (comme des bancs et des chaises), de verdure et d'activités récréatives (pour les enfants et les adultes), créant ainsi un espace propice à la rencontre et à la détente. La place joue également un rôle de lieu de rencontre pour différents flux de mobilité, comprenant piétons, transports en commun, et véhicules privés. Ces flux contribuent à l'animation de la place, mais la présence de nœuds logistiques comme les arrêts de bus peut influencer la convivialité en tant qu'espace public piéton.

La signification culturelle d'une place se manifeste à travers les édifices distincts tels que des musées et des bibliothèques. De plus, elle sert de lieu pour diverses activités culturelles organisées en plein air, telles que des concerts et des festivals. Les bâtiments entourant la place peuvent accueillir diverses activités, en particulier dans le secteur des services (tels que les services administratifs, les services touristiques, les sièges d'entreprises, et l'éducation).

### **1.2.3 La place publique en rapport à la forme**

La définition formelle de la place publique, telle qu'elle est exposée dans les études compilées par (Baudoux-Rousseau et al., 2007), font allusion au vide (la nature vacante) de cet espace, qui peut être attribuée soit à l'absence de structures dans l'espace central, soit à la région environnante construite qui crée ce vide. Cependant, comme l'a indiqué Sitte (1996) « *Le seul fait qu'un espace ne soit pas bâti n'en fait pas pour autant une place urbaine (...) bien d'autres conditions sont requises qui concernent l'ornementation, la signification et le caractère.* » L'absence du développement d'un espace ne le classe pas automatiquement comme une place urbaine.

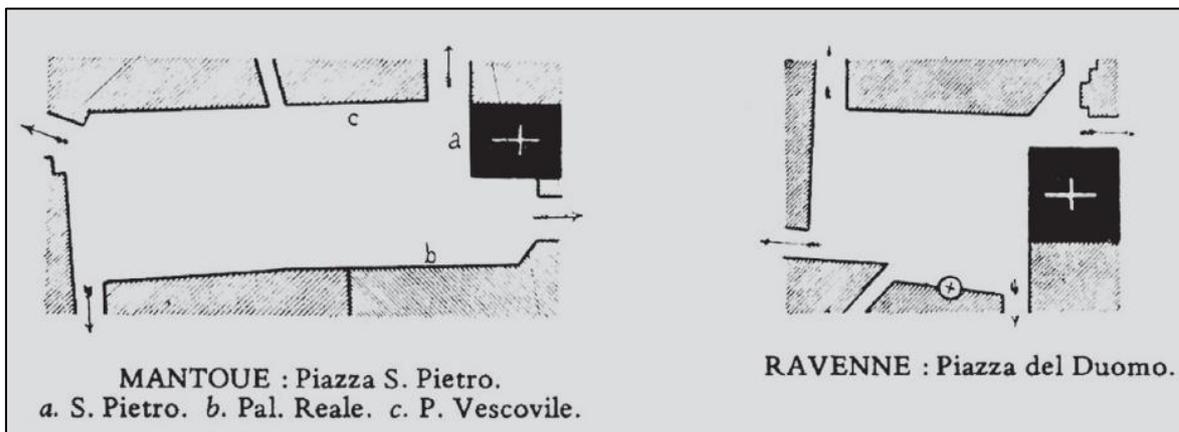
Camillo Sitte critique l'utilisation abusive du terme "place" pour désigner des espaces vides laissées en friche '*résidus d'espace vide*', résultant du découpage orthogonal des blocs construits. Il cite l'exemple des places à Trieste en Italie (**Figure 1.4**), qu'il estime n'avoir aucun caractère de place (Sitte, 1996).



**Figure 1. 4.** Deux places à Trieste en Italie considérées comme ‘résidu d'espace vide’

Source : (Sitte, 1996)

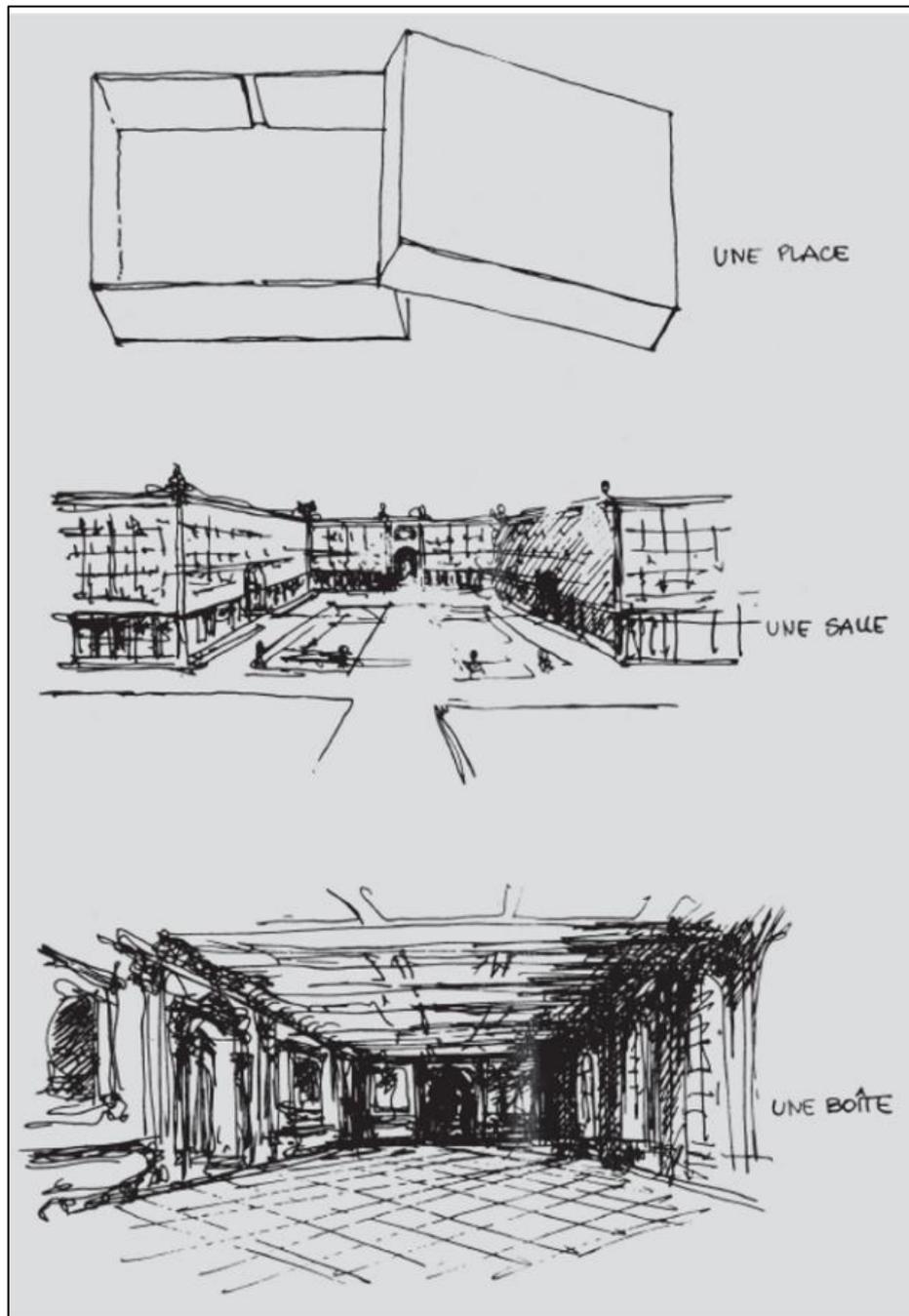
D'ailleurs, Sitte considère que ces espaces vides modernes, laissés inutilisés, ont un impact visuel discordant, inversement à ceux des anciennes villes (**Figure 1.5**) qui étaient intégrées de manière harmonieuse dans le paysage urbain. Il recommande d'examiner la configuration des places historiques au cours de la planification des espaces vacants, pour incorporer toutes les caractéristiques du tissu urbain considérées comme ‘irrégularités gênantes’ dans les parcelles bâties (Sitte, 1996).



**Figure 1. 5.** Places de l'ancien aménagement des villes

Source : (Sitte, 1996)

Du point de vue de la forme selon Bertrand & Laskowski (1984), la place peut être assimilée à une boîte (**Figure 1.6**).



**Figure 1. 6.** La place Réimaginée en boîte,

Source : (Bertrand & Listowski, 1984) de (Marry, 2011)

Peu importe la configuration de cette boîte (ronde, ovale, rectangulaire, ou carrée), elle possède toujours un fond, plusieurs côtés, et un couvercle. De plus, les limites verticales de la place jouent un rôle significatif dans la formation de son image. Cependant, plusieurs places ‘ouvertes’ présentent des côtés exposés et manquent de limites appropriées. La lisibilité d'une place est déterminée par la clarté de sa conception spatiale (Figure 1.7).

L'espace n'est pas déterminé par la somme de limites construites, mais plutôt par son organisation.

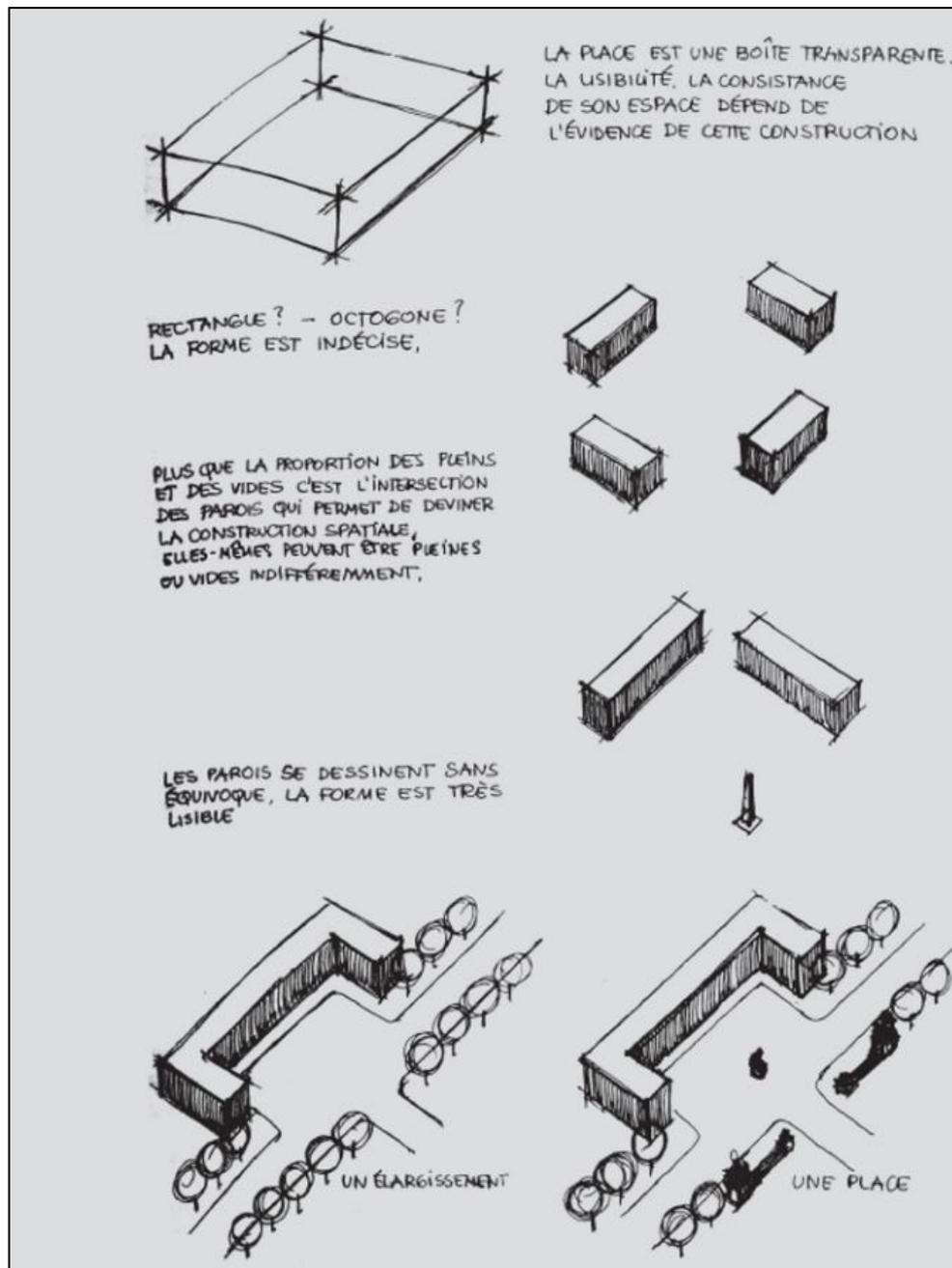


Figure 1. 7. Le rapport plein/vide dans la place

Source : (Bertrand & Listowski, 1984) de (Marry, 2011)

### a) Morphologie de la place

La place est un espace public ouvert particulier, caractérisée principalement, bien que non exclusivement, par des surfaces minérales. Traditionnellement, elle ne comporte que peu de végétation (Nicolas, 2014). La place est connectée au reste de la ville par des rues qui

y conduisent, mais leur accès visuel peut être partiellement fermé ou délimité en raison de la disposition spécifique des bâtiments qui les entourent.

La définition géométrique de cet espace extérieur est déterminée par l'aménagement des structures environnantes. Pour qu'il soit considéré comme un espace urbain, il doit présenter des caractéristiques géométriques et esthétiques claires et facilement compréhensibles (Krier, 1975).

### **b) Configuration et dimensions de la place**

En nous basant toujours sur l'ouvrage '*L'art de bâtir les villes*' pour caractériser une place, on évoque souvent sa configuration, qu'elle soit carrée, rectangulaire, circulaire, régulière ou irrégulière. Pour Sitte (1996) « *même les places médiévales irrégulières et contrairement à ce que l'on pense s'identifient toutes dans la réalité à des figures géométriques connues (carré, rectangle et cercle)* ». Les places peuvent générer une infinité de tracés géométriques en manipulant leurs formes à travers des techniques telles que la brisure, la répétition, la combinaison, et la superposition (Krier, 1975).

La diversité des dimensions des places, similaires à la variété des formes. Les plus petites mesurant environ 500 m<sup>2</sup>, tandis que celles de grande dimension dépassent l'hectare. Les dimensions de la place se calculent en prenant en compte la distance du bord du bâtiment à son opposée, ce qui aide à identifier le lien entre la hauteur du bâtiment et la superficie de la place (Kedissa, 2020).

(Gehl, 2011), affirme que la majorité des places publiques remarquables en Europe font moins de 10 000 m<sup>2</sup>, avec la plupart d'entre elles étant même inférieures à 8 000 m<sup>2</sup>.

La dimension verticale de la place doit être également évaluée, une petite place qu'elle soit régulière ou irrégulière, semblera comme un canyon lorsqu'elle est entourée d'immeubles de six ou sept étages. Toutefois, dans une grande place, des bâtiments de même hauteur auront du mal à créer une impression de verticalité autour de l'espace urbain. Il existe un consensus relatif à la portée optimale des places, déterminée par la longueur maximale à laquelle un visage peut être perçu soit environ 24 à 100 mètres (Alexander et al., 1977).

### **c) Fermeture versus ouverture de la place**

Sitte (1996), aborde la notion de fermeture visuelle des places urbaines, soulignant que pour qu'un espace public soit considéré comme une place, il doit être effectivement fermé.

La fermeture visuelle est réalisée par l'agencement des bâtiments environnants, en particulier par leurs façades (**Figure 1.8**).



**Figure 1. 8.** La place de l'amphithéâtre à Lucques en Italie  
Source : Piazza dell'anfiteatro par (Kasa Fue, 2021)

Cependant, la fermeture totale n'est pas possible car la place est généralement reliée au reste de la ville par des rues qui percent le front bâti. Les façades des édifices qui bordent la place opèrent comme des parois, assignant le degré de porosité du périmètre de la place en fonction des ouvertures présentes dans ces façades.

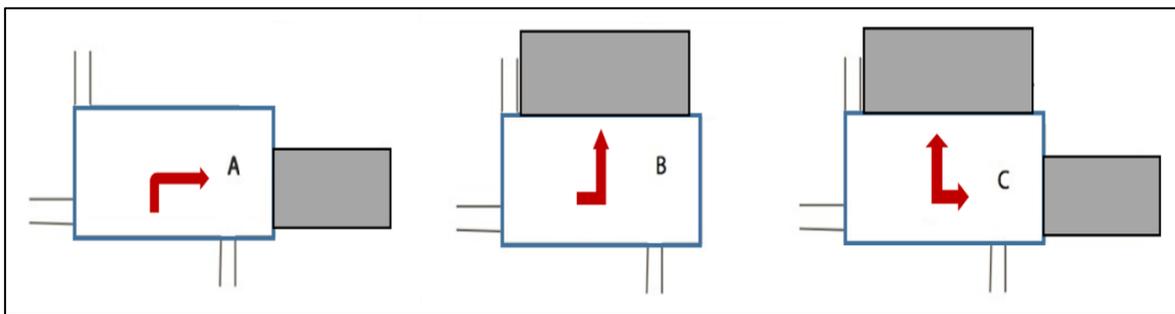
L'auteur souligne également l'importance de la disposition des rues, en mettant en évidence les différences entre les règles anciennes et modernes. Conformément aux pratiques anciennes, une rue devrait se diriger vers les angles de la place, possiblement dissimulée par le retrait d'un bâtiment, tandis que les règles modernes préconisent deux rues perpendiculaires à chaque angle.

#### **d) Orientation de la place**

Selon Sitte (1996), la place est conventionnellement structurée autour d'un bâtiment central d'une importance symbolique significative, établissant ainsi son orientation, c'est-à-dire une direction privilégiée pour l'observation. La place rectangulaire peut avoir différentes

dimensions, soit en profondeur soit en largeur, en fonction de l'emplacement du bâtiment principal sur le côté court ou long du rectangle (**Figure 1.9**).

L'orientation favorable de la place peut avoir un impact significatif sur l'aménagement urbain global d'un secteur. Le rapport entre l'édifice principal et la place est influencé par les dimensions de la place en particulier, sa profondeur, et les mesures de la construction, surtout la hauteur de sa façade. Les églises ont généralement des façades élevées, c'est pourquoi elles ont souvent des places profondes. En revanche, les structures civiles telles que les hôtels de ville ou les palais peuvent plus facilement avoir des places larges. La juxtaposition d'un édifice civil et d'un édifice sacré, comme illustré par la (**Figure 1.9**), peut aboutir à une place qui s'oriente à la fois en grande profondeur et en grande largeur.



**Figure 1. 9.** Orientation de la place selon l'édifice le plus important

Source : (<https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/espaces-publics-places>)

En définitif, une place est perpétuellement en mouvement, n'atteignant jamais un état achevé. La capacité à s'adapter garantit sa pérennité. Les places urbaines symbolisent l'évolution des villes, non seulement par leur forme physique et leur fonction, mais également par leur emplacement. À mesure que la ville subit des transformations et s'étend, de nouvelles places publiques émergent, évoluent, ou disparaissent, marquant une phase significative dans l'environnement urbain. La place n'offre-t-elle pas la possibilité d'organiser les perceptions spatiales, de diriger et d'ordonner les pratiques comportementales de ces usagers ?

### 1.3 Le comportement dans un processus cognitif tributaire de la perception

D'innombrables études dans les sciences humaines et sociales ont démontré que les liens établis entre les individus et leurs espaces de vie ne peuvent se réduire à des relations purement matérielles ou fonctionnelles. De la même manière, l'espace public urbain comme support de ce vécu n'est pas uniquement perçu à travers la disposition de ses formes dans

l'espace, mais aussi à travers les pratiques et les usages qui le dynamisent et fournissent son identité. Cette compréhension va au-delà de l'aspect physique pour engendrer un ensemble de valeurs symboliques dans les représentations mentales des usagers (Boutebba, 2019).

Les représentations varient en fonction de l'individu, étant donné que l'environnement, le niveau intellectuel, l'humeur, le sexe, l'âge, etc., sont autant de variables qui conditionnent la perception de l'espace par un individu. Tel que souligné par Moles et Rohmer « *l'espace n'existe qu'à travers les perceptions que l'individu peut en avoir, qui conditionnent nécessairement toutes ses réactions ultérieures...* » (Moles & Rohmer, 1998).

### **1.3.1 Principe et fonctionnement du processus perceptif**

L'étude de (Lynch, 1998) est parmi les recherches menées en milieu urbain, qui ont mis en évidence que l'incapacité de tout observer découle de limitations sensorielles et attentionnelles. Notre capacité à retenir des stimuli de l'environnement est influencée par leur importance ou leur familiarité.

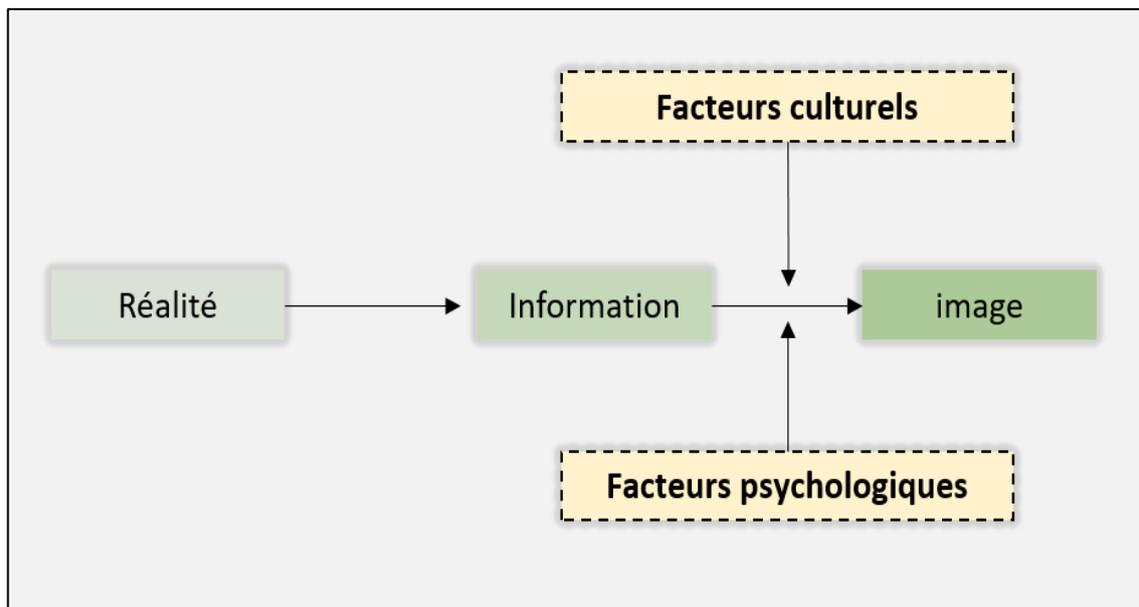
La perception de l'espace se rapporte à l'ensemble des analyses et des composantes qui permettent aux individus de confectionner des images mentales complexes de l'espace physique. On s'appuyant sur les concepts présentés dans l'ouvrage 'La perception de l'espace urbain' de (Bailly, 1977), trois éléments clés sont mis en avant dans ce contexte :

- L'appréhension de l'espace ne se limite à son entité géographique tangible ; elle est plutôt un processus cognitif qui nous permet d'acquérir une connaissance, à la compréhension et l'interaction avec l'environnement qui nous entoure.
- Afin de construire une interprétation et de créer une image qui est perçue, la perception repose sur ce qui nous semble être réel, tant en ce qui concerne notre monde extérieur que notre environnement.
- Le processus perceptif de l'espace urbain est le résultat d'une série de filtres mentaux qui transforment notre compréhension de la réalité objective en une perception plus subjective et diversifiée.

L'image est influencée par divers facteurs, notamment la psychologie personnelle, niveau culturel, les facteurs socio-économiques et professionnels, les normes de communication (telles que les codes sociaux et la langue), les expériences personnelles, les traits biologiques, de même l'information provenant de sources telles que les contacts sociaux et les médias (Bailly, 1974).

En science psychologique plusieurs méthodes ont été élaborées pour comprendre les facteurs qui influent sur les capacités perceptives, telles que les tests ; les dessins techniques ; l'observation des individus, les enquêtes direct et indirect ; ainsi que la description photographique.

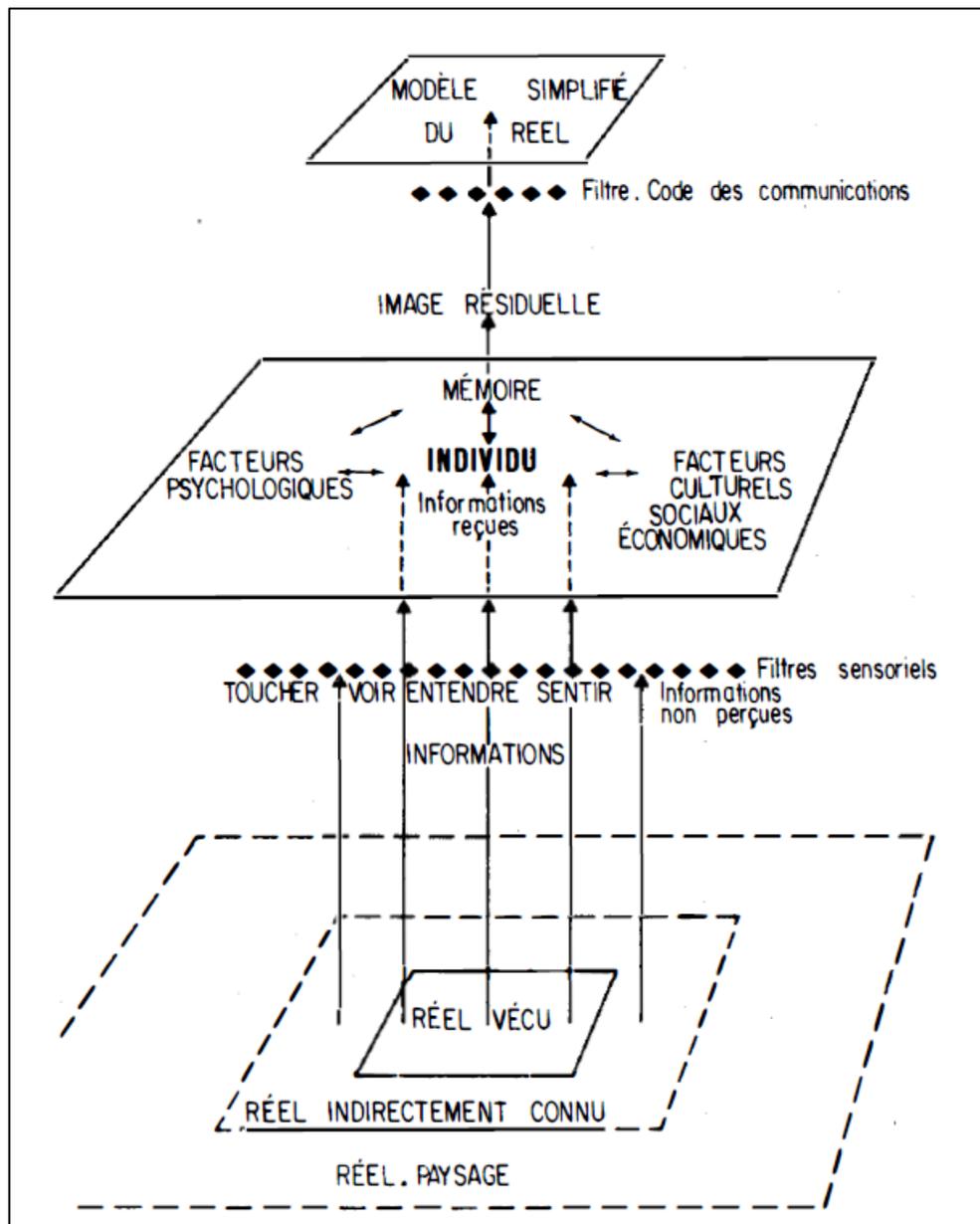
Cette variété de méthodes offre une compréhension approfondie des réactions individuelles, cependant, pour mieux appréhender le processus perceptif il est nécessaire de remonter de la réalité tangible à la représentation visuelle (image). Le schéma simplifié de Doherty (1969), présente le mécanisme de formulation de l'image (**Figure 1.10**), ensuite ce schéma a été développé par Bailly (1974).



**Figure 1. 10.** Mécanisme de formulation de l'image schématisé par Doherty

Source : (**Bailly, 1974**)

Un schéma illustrant le processus de la perception a été dressé par A. Bailly (**Figure1.11**), il met en évidence l'interconnexion entre l'espace physique tangible, et les impressions figuratives qui en découlent.



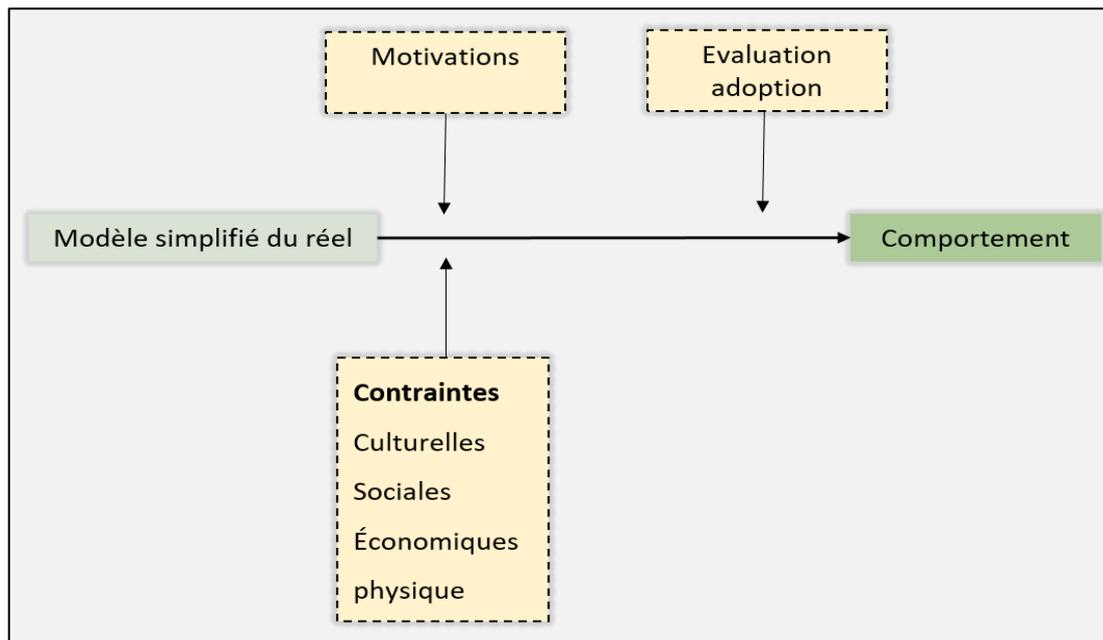
**Figure 1. 11.** Processus de perception selon Bailly

Source : **Bailly (1974)**

D'après (Merrenne-Schoumaker, 1977) ce processus s'avère bien plus complexe car :

- La perception individuelle ou collective est limitée à une zone particulière de l'environnement physique, l'espace vécu, qui englobe l'espace immédiat tel que le quartier, le centre commercial, l'environnement de travail, les aires de récréations et détente et indirectement les secteurs communément abordés dans les multimédias ;
- Les informations issues de la réalité résultent d'un filtrage à travers les sens humaines limitée ou par les voies de communication ;

- La valeur attribuée à l'information dépend du traitement cognitif et la mémoire individuelle en relation avec les traits intrinsèques de la personnalité, ainsi qu'au contexte (culturel, social, économique) plus large de la vie quotidienne de chaque individu ;
- Après ce processus, il reste une image résiduelle dans l'esprit de la personne, qu'elle convertit ensuite en un modèle simplifié de la réalité en fonction de ses propres codes de communication (**Figure 1.12**).



**Figure 1. 12.** Processus simplifié du comportement

Source : (**Bailly, 1974**)

Cette procédure délicate et prolongée de la perception constitue le fondement du comportement. Lorsqu'on étend le modèle simplifié de la (**Figure 1.11**) on obtient (**Figure 1.12**) du processus simplifié du comportement. (**Brunet, 1974**) a proposé un modèle théorique de l'analyse du processus perception-comportement plus détaillé voir (**Figure 1.13**).

Après les recherches fondatrices menées par Lynch (1960), les géographes et urbanistes se sont penchés sur les aspects physiques de la ville susceptibles de façonner les perceptions mentales de ses usagers. Lynch a introduit la notion novatrice de l'imagibilité d'un milieu urbain, faisant référence à sa capacité à influencer la perspective de ses usagers. Cette influence s'opère par l'agencement stratégique de cinq éléments : (les points de repères, les voies, les limites, les quartiers et les nœuds).

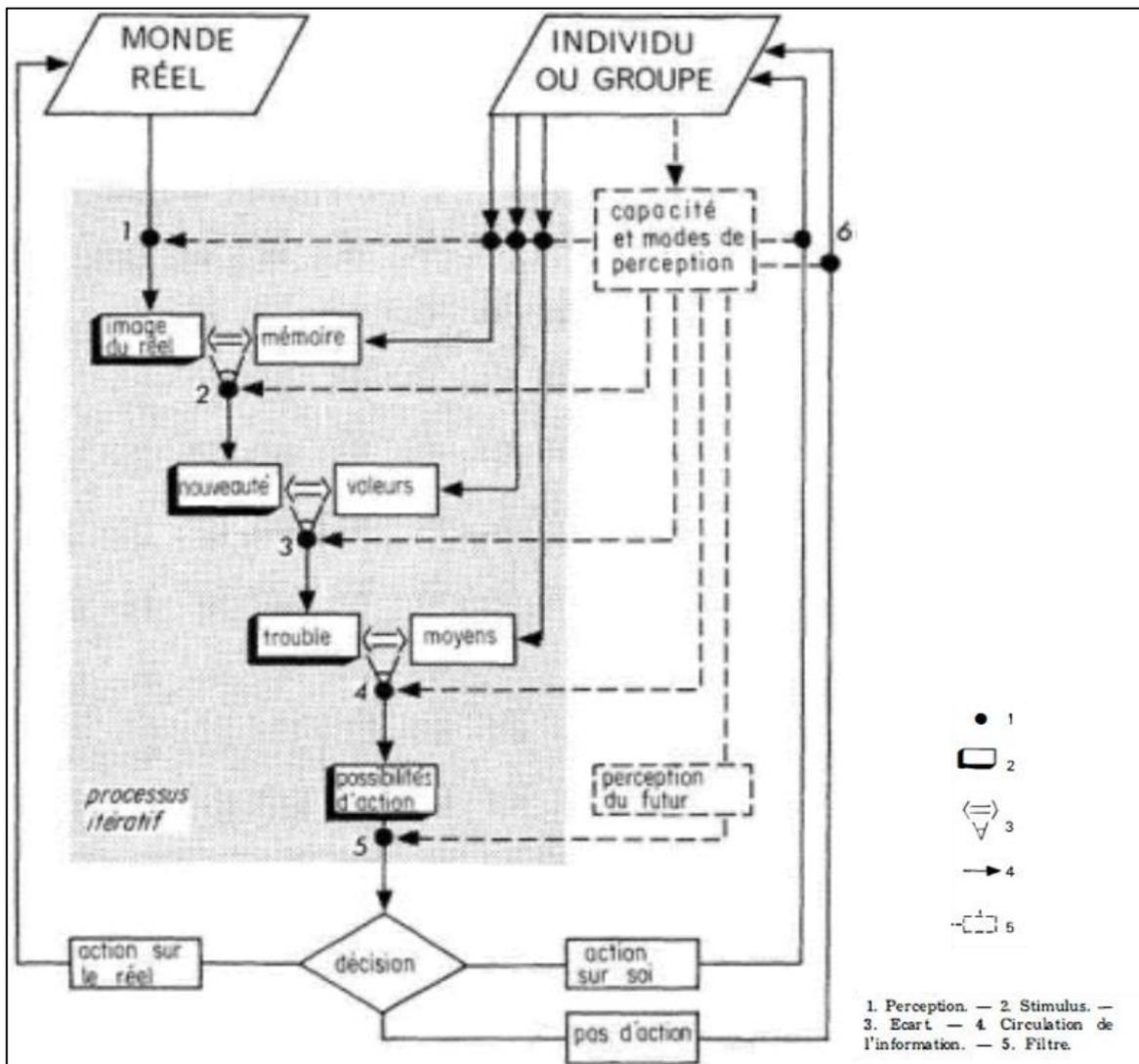


Figure 1. 13. Modèle théorique du processus perception-comportement

Source : (Brunet, 1974)

Les analyses de Lynch demeurent principalement qualitatives. Des recherches plus récentes sur la syntaxe spatiale (Hillier & Hanson, 1984; Mavridou, 2012) procurent une analyse quantitative de l'impact des structures physiques des tissus urbains. Cette recherche examine la lisibilité des espaces urbains, leur fréquentation et leur fonctionnement, en mettant particulièrement l'accent sur les axes visuels délimités par les bâtiments sur le réseau routier.

Différentes méthodes informatiques sont utilisées pour analyser les axes visuels en réseau, révélant le rôle de chaque axe visuel à différentes échelles. (Cutini, 2003) s'est penché sur le rôle des places publiques dans la configuration des axes visuels au sein du tissu urbain.

### 1.3.2 Perception spatiale et pratique comportementale

Durant les années soixante-dix, dans les nations de culture anglo-saxonnes, la psychologie environnementale a été instaurée en tant que champ de recherche distinct. Ce domaine se distingue par des recherches centrées sur l'interaction de l'individu avec son environnement. L'objectif primordial des enquêtes est d'appréhender comment les composants du cadre bâti interfèrent avec les aspects psychologiques des individus pour influencer leurs perceptions et leurs comportements (Boussoulim, 2002).

Dans le domaine des sciences psychosociales (Fischer, 1997) a identifié l'interaction entre l'être humain et son cadre bâti par un impact bidirectionnel, où l'individu est affecté par son environnement construit, qui à son tour exerce une influence sur les facteurs spatiaux qui le composent. L'idée de relation homme-environnement bâti a été examinée dans plusieurs études en se basant sur un modèle causal ou un modèle d'interdépendance.

Le but du modèle causal est d'identifier les critères de mise en relation (correspondance) simples et univoques entre certains paramètres physiques de l'espace et telle particularité du comportement. Dans cette approche, on distingue deux tendances, où l'accent est mis sur l'individu ou sur l'environnement comme élément dominant.

Dans le modèle d'interdépendance qui conteste l'idée que l'environnement agirait sur le comportement humain à la manière d'un stimulus mécanique. Néanmoins, cette approche observe la relation à l'espace comme un réseau complexe d'interdépendances. L'objectif n'est pas de déterminer une relation rigide et directe entre une composante spécifique de l'espace et son impact sur les attitudes. Mais plutôt, d'explicitier le processus par lesquels les aspects économiques, culturels et sociaux liés à l'espace construit, influencent les comportements.

Les processus cognitifs et affectifs sont sollicités pour examiner le lien entre les individus et leur environnement (Moser, 1994).

- Les composants cognitifs englobent les processus perceptuels responsables de la création d'une carte cognitive (image) de l'espace, visant à évaluer la qualité de l'environnement.
- Les composants affectifs sont examinés à partir des réponses émotionnelles de la personne face à un espace exprimant ainsi leur niveau de plaisir, de contrôle ou d'insatisfaction. Cette démarche se concentre sur l'individu et essaye de comprendre son expression subjective, ses valeurs et ses préférences par rapport un environnement déterminé.

Boussoualim (2002), explique que la compréhension de l'environnement se fait au moyen de représentations mentales (images) que nous en formons. Ces images ne se limitent pas à des données abstraites ou intellectuelles, mais guident constamment nos comportements, évaluent nos lieux, et nous adaptent à eux. L'espace n'est pas uniquement perçu comme une entité externe, mais aussi comme une composante intégrale de notre interaction avec lui.

*« La relation entre la personne et son environnement est donc matérialisée par la perception qu'il a, l'évaluation qu'il fait de cet environnement et les manifestations de ses comportements et ses attitudes. »*

### **1.3.3 Pratiques et usages de la place comme espace public**

Incluse dans l'espace public, la place constitue simultanément un espace où se développent les multiples pratiques de la vie urbaine, grâce à la multiplicité des usagers et à leurs comportements variés envers cet espace. En effet, l'espace public englobe une multitude de pratiques. Il représente, dans cette perspective, la condition objective nécessaire à la rencontre et à l'échange constituant ainsi le socle des liens sociaux (Boutebba, 2019). C'est le prolongement de la vie d'intérieur et sert de réceptacle de secteurs multiples aspirant les citoyens qui cherchent à être en osmose avec leur ville.

Dans cette optique, les places peuvent être envisagées comme des endroits propices au repos et à la rencontre ainsi que des supports d'information visuelle comme les panneaux signalétiques.

Comme espace public les places s'étendent au-delà du niveau du sol, incluant des espaces verticaux, notamment les façades des édifices publics historiquement et architecturalement significatifs. Ces bâtiments agissent en tant que symboles d'identité et de patrimoine, d'où il exerce une fonction identitaire et symbolique.

- **L'utilisateur comme acteur principal de l'espace public**

Le débat sur les acteurs est récent et pose des défis, notamment en ce qui concerne leur lien avec l'environnement physique. L'objectif ici est de distinguer la relation entre les acteurs en tant que contenu et l'espace public en tant que contenant. Selon Belhedi (2002), l'acteur, qu'il s'agisse d'un individu, d'un groupe, d'une collectivité territoriale ou d'un État, est considéré comme une entité sociale.

Cette entité sociale possède une capacité d'action propre, agissant de manière autonome et détenant une compétence intentionnelle stratégique. L'accent est mis sur deux aspects essentiels à combiner chez l'acteur. D'abord, la capacité à prendre des décisions et d'agir, ensuite l'impact spatial de ces décisions structurent et dynamisent l'environnement spatial, influençant ainsi les autres acteurs en termes de décision et de comportement.

Dans ce contexte, nous pouvons différencier deux groupes majeurs d'acteurs en fonction de l'importance de leur relation avec l'espace (Belhedi, 2002) ;

- Les acteurs spatiaux : ce sont des entités qui opèrent dans un contexte spatial pour produire ou modifier l'espace physique. C'est le cas des promoteurs immobiliers, des urbanistes et des aménageurs.
- Les acteurs non-spatiaux : ceux-là profitent de l'espace comme un cadre pour effectuer leurs actions. Ces derniers marquent l'espace de manière indirecte à travers les modes de vie, les comportements reflétés par des flux, des ségrégations spatiales, des rythmes et des modes de fréquentation des espaces.

Ainsi, deux catégories d'usagers émergent en fonction de la manière dont ils s'approprient et interagissent avec l'espace :

- L'utilisateur endogène : c'est un individu qui considère principalement l'espace comme un environnement de vie, une extension de sa propre identité. Ils adoptent généralement une attitude protectrice envers leur environnement, mettant l'accent sur l'intimité et l'interaction sociale, tout en donnant la priorité à la consommation.
- L'utilisateur exogène : désigne comme acteur ayant une liaison externe avec l'espace, distinct de sa propre identité. Cet espace est perçu comme une zone stratégique pour l'exploitation et la production, alors, l'utilisation de l'espace à des fins de récréations, de tourisme, ou d'autres formes d'exploitation.

## **Conclusion**

L'espace public est appréhendé en considérant non seulement ses aspects physiques et spatiaux, mais aussi les fonctions et pratiques qui le caractérisent, contribuant ainsi à la formation de son identité. Il englobe une valorisation qui va au-delà de sa dimension physique, générant un ensemble d'interprétations symboliques ancrées dans les représentations mentales des usagers.

De plus, il constitue le lieu idéal pour l'expression et la pratique sociales, où interfèrent divers acteurs urbains. Il représente également un territoire physique revendiqué collectivement, favorisant ainsi le rassemblement et la mobilité de tous les acteurs impliqués.

La place se définit comme étant un espace public à la fois par ses caractéristiques et ses fonctions, telles que le déplacement, l'interaction, ainsi que la promenade. Cet espace se caractérise par ses dimensions en termes de hauteur, longueur, et largeur, ainsi que par son tracé géométrique. Ces dimensions devraient offrir aux usagers la perception d'un enclos, élément essentiel pour instaurer une ambiance paisible et créer un sentiment d'intimité et de sécurité.

Ce que nous retenons des espaces publics est constamment façonné par nos attitudes et les significations que nous lui accordons. Ces comportements et habitudes influencés par nos représentations mentales, contribuent à attribuer du sens à l'espace, lequel évolue en fonction de ces pratiques.

En effet, les images mentales catalysent des sensations qui constituent un rapport important entre l'individu et son environnement, favorisant ainsi la fréquentation, l'appropriation voire même l'identification de l'espace.

En d'autres termes, notre représentation (mentale) des espaces de vie découle des images que nous en façonnons. Ces images sont le produit de la perception intégrée au processus cognitif, où une signification et une valeur sont accordées en lien avec la personnalité profonde et le contexte culturel, social, et économique de chaque individu.

## **CHAPITRE II**

# **INTERACTIONS ET FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA PERCEPTION THERMIQUE**

## CHAPITRE II : INTERACTIONS ET FACTEURS D'INFLUENCE SUR LA PERCEPTION THERMIQUE

### 2. Introduction

Des études approfondies couvrant plus d'un siècle et provenant de plusieurs domaines ont abouti à une compréhension approfondie des caractéristiques de la perception thermique humaine. Cependant, ces dernières années, l'intérêt pour ce domaine d'étude a resurgi. Cela peut être attribué à la reconnaissance croissante des variations individuelles, aux nouvelles méthodologies pour prédire la perception thermique et aux problématiques mondiales et locales associées à la compréhension de la perception thermique (Schweiker et al., 2018).

Ce chapitre explore diverses problématiques liées à la perception thermique dans l'environnement urbain. Dans un premier temps, nous présentons les différents phénomènes physiques relatifs aux échanges de chaleur dans les espaces extérieurs. Le bien-être thermique de l'individu dépend du bilan global des échanges cutanés, en interaction avec d'autres mécanismes de transfert de chaleur.

Ensuite, nous nous penchons sur la complexité et la subjectivité inhérentes à l'évaluation des réponses humaines aux conditions thermiques. Nous mettons l'accent sur les mécanismes physiques et le traitement cognitif des stimuli thermiques. De plus, nous abordons les divers facteurs influant sur la perception thermique, incluant les variables physiques généralement utilisées comme données d'entrée dans la plupart des modèles thermiques, ainsi que les variables humaines telles que les paramètres sociodémographiques et l'adaptation thermique.

Enfin, nous examinons différents indices et modèles d'évaluation du stress thermique dans divers contextes. Cette section se divise entre les indices directs basés sur certains paramètres climatiques, les indices empiriques fondés sur l'équation de régression linéaire, et finalement les indices rationnels basés sur l'équation du bilan thermique. Chaque modèle offre une approche distinctive pour évaluer la complexité du stress thermique.

## 2.1 Effets thermiques sur le corps humain

Le corps humain agit comme un système thermorégulateur complexe, générant et transférant de la chaleur avec son milieu environnant. L'organisme produit de la chaleur interne, laquelle est répartie de manière uniforme dans l'ensemble de sa masse corporelle. Tandis que ces échanges de chaleur avec l'environnement se produisent de manière externe plus précisément à la surface cutanée (Dubois area), variée pour un adulte de 1.5 à 2 m<sup>2</sup>, cette aire cutanée en (m<sup>2</sup>) se calcule à partir du poids en (kg) et de la taille en (m) selon l'équation (2.1) (Du Bois and Du Bois, 1989):

$$A_d = 0,2025 \times \text{taille}^{0.725} \times \text{poids}^{0.425} \quad (2.1)$$

La complexité à laquelle il est confronté est de retenir sa température interne aux alentours de 37°C, séparément des conditions climatiques déterminantes. En général, une personne est considérée en état de confort lorsqu'il y a un équilibre entre la chaleur échangée avec son environnement et sa température corporelle interne. Il s'agit d'un système de thermorégulation performant qui dirige la génération et le transfert de masse et de chaleur, à la fois internes et externes de l'organisme humain (Fu et al., 2016).

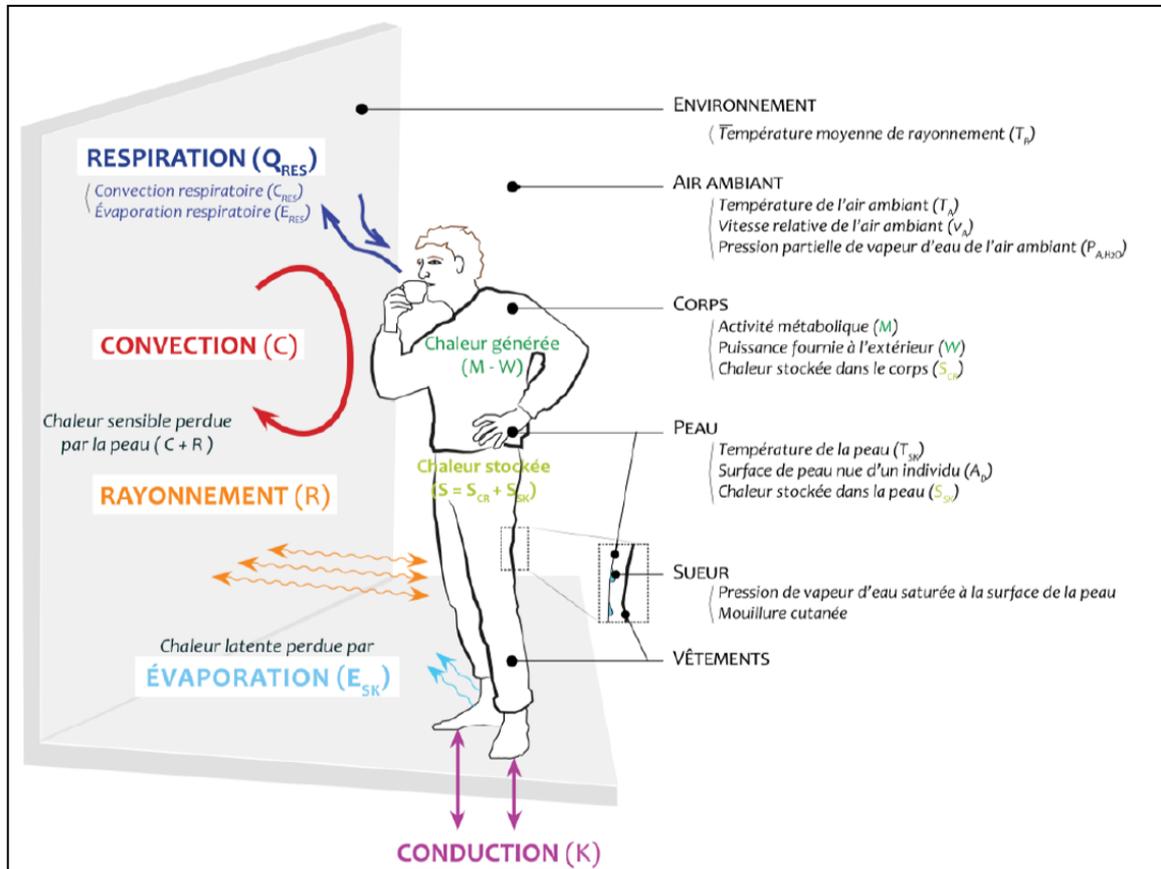
L'échange de chaleur à la surface de la peau ( $Q_{SK}$ ) englobe les transferts de chaleur par convection (C), par rayonnement (R), par conduction (K), et par évaporation de la sueur ( $E_{SK}$ ), conformément à l'équation (2.2) (ASHRAE, 2009):

$$Q_{SK} = C + R + K + E_{SK} \quad (2.2)$$

- $Q_{SK}$  : Flux de chaleur échangé à la surface de la peau, W/m<sup>2</sup>
- C : Échanges de chaleur par convection, W/m<sup>2</sup>
- R : Échanges de chaleur par rayonnement, W/m<sup>2</sup>
- K : Échanges de chaleur par conduction, W/m<sup>2</sup>
- $E_{SK}$  : Échanges de chaleur par évaporation, W/m<sup>2</sup>

Le processus de transfert de chaleur entre un individu et son environnement (tel qu'illustré dans la **(Figure 2.1)**) a fait l'objet d'études approfondies dans de nombreuses publications (Fanger, 1972; Givoni, 1978; Hoffmann, 1994).

Nous allons passer en revue les modes par lesquelles la chaleur est transférée, notamment les échanges radiatifs, convectifs et conductifs. De plus, nous explorerons les mécanismes de perte de chaleur par respiration et à travers l'évaporation.



**Figure 2.1.** Les échanges thermiques entre l'individu et son environnement

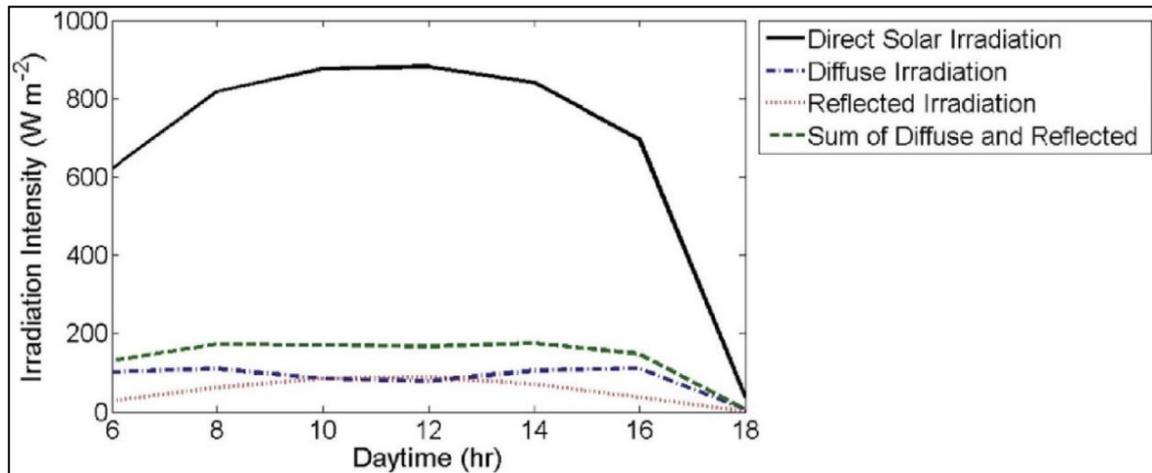
Source : (Batier, 2016)

### 2.1.1 Échanges radiatifs

On peut identifier deux catégories de rayonnement : le rayonnement à courte longueur d'onde et le rayonnement à grande longueur d'onde.

- Le rayonnement de courte longueur d'onde, en particulier relié aux apports solaires, ces apports solaires comprenant le rayonnement direct, indirect, diffus, et réfléchi, sont plus importants pendant la période diurne. Leur impact varie en fonction de la position du corps (debout ou assis), de l'albédo du terrain, et des surfaces verticales avoisinantes (Givoni, 1978). Par ailleurs, le rayonnement solaire direct joue un rôle prépondérant dans l'estimation du confort thermique en extérieur (**Figure 2.2**), et la vitesse du vent peut atténuer le gain de chaleur (Nazarian et al., 2017). Les effets radiatifs dépendent de la tenue vestimentaire en termes de résistance thermique, couleur, et ampleur, vu

que les vêtements interceptent le rayonnement solaire avant qu'ils n'atteignent directement la peau.



**Figure 2. 2.** Evolution journalières des apports solaires au niveau pédestres

Source : (Nazarian et al, 2017)

- L'échange par rayonnement entre les surfaces terrestres se fait fondamentalement par des ondes électromagnétiques de grande longueur désignée par rayonnement infrarouge. Ces échanges s'effectuent sans contact direct entre l'organisme humain et les surfaces environnantes de diverses températures. L'énergie absorbée émane de la température des surfaces, de leurs capacité d'absorptivité et de dispersion, de l'albédo, de la couleur, également des conditions thermiques des bâtiments (Brown and Gillespie, 1990).

### 2.1.2 Échanges convectifs

La convection désigne le transfert d'énergie entre le corps humain et un fluide en mouvement, découlant de l'écart de température entre la peau et l'air ambiant. Avec l'accélération de la vitesse de l'air, l'échange de chaleur s'accroît et les vêtements qui présentent une couche isolante réduisent les échanges convectifs en diminuant l'écart de température entre la couche de protection thermique et la peau. La convection peut être catégorisée en deux types distincts (Kedissa, 2020) :

- La convection naturelle correspond au déplacement de l'air provoqué par son échauffement près du corps. Les couches limites le long du corps présentent des vitesses maximales, généralement comprises entre 0.1 et 0.2 m/s.
- La convection forcée se réfère au déplacement de l'air induit par une force externe, telle que le vent

### 2.1.3 Échanges conductifs

L'effet conductif se produit à travers des surfaces en contact (comme le sol ou chaise...), cette forme d'échange entre l'individu et le sol est considérée comme négligeable. Par conséquent, les températures de surface et les caractéristiques conductrices sont prises en compte dans les échanges convectifs.

Bien que le transfert de chaleur par conduction se produise, il est limité à de petites régions du corps. Quand des entités corporelles plus étendues entrent en contact avec des objets de mobilier, les tissus en interaction atteignent rapidement un état d'équilibre, agissant ainsi comme un isolant thermique par rapport à l'environnement. En effet, les chaussures présentent une résistance thermique élevée et ont une surface d'échange significativement limitée (Candas, 2003).

### 2.1.4 Échanges de chaleur par respiration

Les poumons agissent comme une surface d'échange pratiquement infinie, avec une superficie d'environ 100 m<sup>2</sup>. L'air expiré est presque saturé d'humidité, et la quantité de vapeur d'eau expirée varie selon les conditions environnementales. En milieu sec, la quantité est d'environ 30 g/h, tandis que dans un climat chaud et humide, elle peut être réduite à une valeur comprise entre 0 et 20 g/h. Les pertes se manifestent sous forme de pertes de chaleur sensible, associées au réchauffement de l'air inspiré (par convection), et de pertes de chaleur latente (par évaporation) (**équation 2.3**), liées à l'humidification de celui-ci (Vinet, 2000).

$$Q_{RES} = C_{RES} + E_{RES} \quad (2.3)$$

- **Q<sub>RES</sub>** : Pertes de chaleur par respiration, W/m<sup>2</sup>
- **C<sub>RES</sub>** : convection respiratoire, W/m<sup>2</sup>
- **E<sub>RES</sub>** : évaporation respiratoire, W/m<sup>2</sup>

### 2.1.5 Échanges de chaleur par évaporation

La perte de chaleur par évaporation est un mécanisme performant pour contrôler la température corporelle, elle représente un indicateur physiologique essentiel du stress thermique. Le taux de perte de chaleur par évaporation à la surface de la peau est conditionné par le flux d'air, la variation de pression de vapeur entre la surface de la peau et l'air ambiant, de même que l'isolation vestimentaire au transfert de la vapeur d'eau (Berger and Sari, 2000).

- Les pertes par diffusion, désignées comme pertes par perspiration, sont constantes et elles sont établies par l'écart de pression de vapeur d'eau entre les pores de la peau, à saturation et à la température de la peau, et l'air environnant. Elles participent à environ 6% de la dissipation maximale de chaleur par évaporation. Dans des environnements à faible humidité, le taux mentionné ci-dessus peut être réduit à aussi peu que 2% lors d'expositions prolongées (MacIntyre, 1980).
- Perte thermique par sudation décrit le processus d'évaporation d'eau à partir de la peau par les glandes sudoripares pour réguler la température corporelle. C'est un phénomène de transfert de masse de la vapeur d'eau depuis la surface vers l'air ambiant.

### 2.1.6 Effet métabolique

La chaleur produite par un individu dépend de divers facteurs personnels comme, son niveau d'activité, sa taille, son âge, son poids et son sexe. Environ 77% de la dépense énergétique est attribuée à la production métabolique en raison de l'efficacité musculaire (Depecker et al., 1989). À mesure que l'activité corporelle augmente, le taux d'oxydation des aliments ainsi que leur attribution d'énergie doivent aussi croître. L'activité métabolique dans ce cas varie de type d'activité, de la vitesse de marche, des spécificités du terrain et de poids porté.

L'unité standard pour caractériser l'activité est le "MET", équivalent à une puissance de 1 MET = 58,2 W/m<sup>2</sup>. Par exemple, une personne assise génère 1 MET, alors qu'une personne marchant à 3,2 km/h produit 2 MET. Les valeurs métaboliques pour différentes activités sont répertoriées selon la norme ISO : 8996 (2004) (**Annexe A, Tableau A.1**) pour un cas standard (70 kg et surface corporelle A<sub>d</sub> : 1,8 m<sup>2</sup>).

### 2.1.7 Effet vestimentaire

De nombreuses difficultés se présentent lors de définir les propriétés thermiques des vêtements, ce qui constitue un défi lors des estimations liées au confort. La résistance thermique aux transferts de chaleur de l'habillement (I<sub>cl</sub>) est fréquemment exprimée en unité de 'CLO' (1 clo équivalent à 0,155 m<sup>2</sup>. °C/W). Cette unité représente l'isolation nécessaire pour maintenir l'équilibre thermique d'une personne sédentaire. L'isolation thermique d'un vêtement peut être mesurée directement ou calculée de manière théorique en cumulant l'isolation des différentes pièces qui le composent (Kähkönen et al., 1990).

L'isolation thermique fournie par les vêtements joue un rôle crucial. La température de la peau ( $T_{sk}$ ) peut fluctuer entre 33 et 34.5 °C, faisant sentir un inconfort généralisé en dessous de 32.5 °C et au-dessus de 34.8 °C (MacIntyre, 1980). Le style vestimentaire agit sur les échanges de chaleur sensible par convection : plus il est épais, plus il restreint les échanges thermiques, y compris les échanges radiatifs, car les vêtements, en couvrant la peau, limitent ces échanges. Par exemple, une personne portant un costume de travail et des sous-vêtements en coton peut ressentir une sensation de confort à une température environ 9 °C inférieure à celle d'un corps nu (Koenigsberger et al., 1975). Enfin, il faut se reporter à la norme (ISO : 9920, 2007) qui rend possible le calcul de ( $I_{cl}$ ) en partant des valeurs 'clo' des pièces unitaires, (**Annexe A, Tableau A.2**).

## 2.2 Bilan thermique

Divers indices développés pour analyser le confort thermique et le stress thermique en milieu urbain se fondent sur l'équation du bilan thermique. Le confort thermique est obtenu quand le corps humain maintient un équilibre thermique, ce qui signifie que la quantité de chaleur générée à l'intérieur équivaut à la quantité de chaleur dissipé (Emmanuel, 2016).

Pour maintenir l'homéothermie, le corps s'appuie principalement sur les systèmes physiologiques de thermorégulation. Ces mécanismes s'efforcent d'atteindre un équilibre entre les gains de chaleur et les pertes de chaleur. Le bilan thermique peut-être calculé pour l'ensemble du corps ou de manière spécifique à une région corporelle (jambes, mains, etc.), comme décrit par (**l'équation 2.4**) suivante (ASHRAE 55, 2010) :

$$M - W = Q_{SK} + Q_{RES} + S \quad (2.4)$$

- **M** : Métabolisme, W/m<sup>2</sup>
- **W** : Puissance fournie à l'extérieur, W/m<sup>2</sup>
- **Q<sub>RES</sub>** : Pertes de chaleur par respiration, W/m<sup>2</sup>
- **Q<sub>SK</sub>** : Flux de chaleur échangé à la surface de la peau, W/m<sup>2</sup>
- **S** : Chaleur stocké par le corps humain, W/m<sup>2</sup>

La génération d'énergie ou le métabolisme relève essentiellement de l'activité et varie de 50 à 500 W/m<sup>2</sup>. Une portion de cette énergie, majoritairement généré au centre du corps et dans les muscles est susceptible d'être convertie en travail mécanique occupant un

maximum de 20 %. Le reste, identifié comme le métabolisme net, est nécessairement dissipé sous forme de chaleur. Cette transmission thermique du centre du corps vers la périphérie s'accomplit par le biais de la conduction à travers les tissus biologiques et par convection sanguine. Les échanges thermiques entre l'homme et son environnement se réalisent à travers divers mécanismes de transfert, impliquant la peau et les voies respiratoires (Parsons, 2014).

Ces échanges thermiques sont autant régis par les aspects physiques de l'individu particulièrement, les données de surface effective (aire de Dubois), la température cutanée et l'humidité de la peau. Le taux de transfert cutané est affecté par la présence potentielle de vêtements, généralement réducteurs de ces échanges. L'activité humaine influence directement les échanges respiratoires. Enfin, les données physiques et physiologiques présentent une variabilité temporelle et spatiale (Thellier, 1999).

### **2.3 Perception thermique et différents facteurs d'influence**

D'après Dear (1998), « *La sensation est considérée comme la détection d'un stimulus dans l'environnement, tandis que la perception fait référence à la manière dont on interprète cette information.* »

La perception thermique englobe deux dimensions sémantiques principales (Vellei et al., 2021): la sensation et le confort. La sensation thermique (c'est-à-dire se sentir chaud, neutre, froid, etc.) est considérée comme sa dimension objective ou descriptive et est couramment évaluée à l'aide de l'échelle à sept points de l'ASHRAE (2010), exprimant ainsi l'intensité thermique perçue.

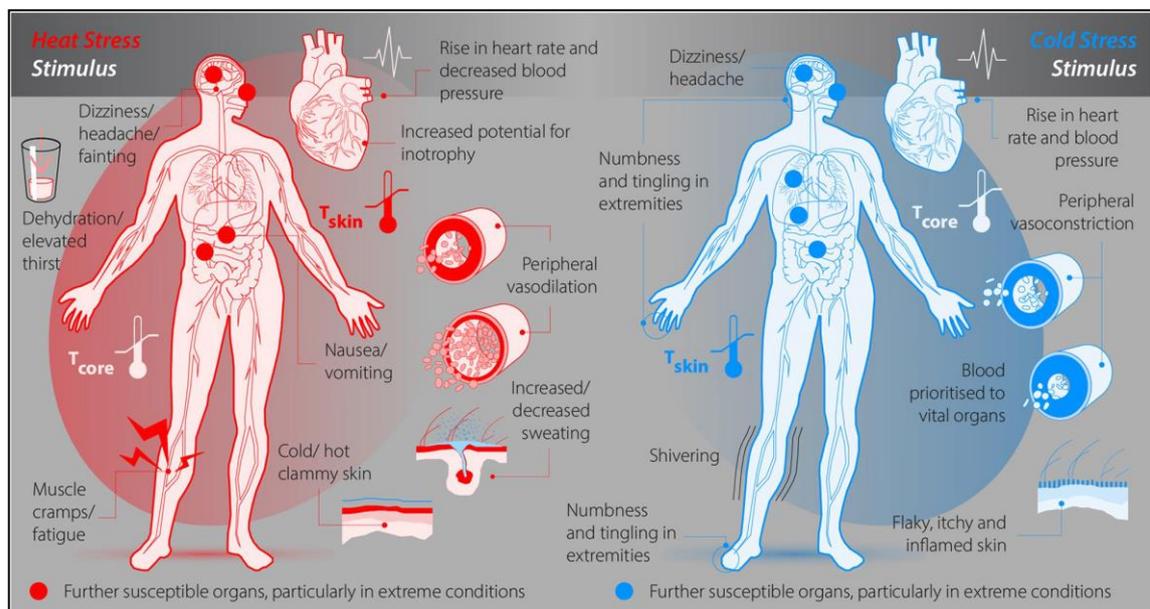
Le confort thermique est la composante affective ou hédonique de la perception thermique et peut être évalué en utilisant d'autres critères que ceux proprement liés au confort, par exemple, (1) l'acceptabilité thermique, en tant que dimension liée à la fois aux réponses affectives et aux réponses comportementales potentielles, (2) la préférence thermique, qui reflète les préférences des individus en ce qui concerne les conditions thermiques en fonction de leurs actions et choix. (3) la satisfaction thermique, qui est souvent considérée comme un jugement global de la qualité de l'environnement thermique (Schweiker et al., 2020).

#### **2.3.1 Mécanismes physiologiques et traitement cognitif des stimuli thermiques**

Multiplés études en physiologies et psychophysiques (Candas, 2000; Candas and Dufour, 2005) ont établi des relations entre l'intensité perçue et celle du stimulus. L'intensité

perçue augmente proportionnellement avec la ‘puissance’ du stimulus ou la différence entre le stimulus et un seuil perceptif. Étant donné que l'organisme dispose de diverses voies sensorielles (visuelles, auditives, olfactives, thermiques... etc.), les réponses fluctuent selon les capteurs sensoriels impliqués, les voies sensibles sollicitées et les centres nerveux supérieurs distinctifs en action.

En ce qui concerne les aspects thermiques, la sensation est fréquemment le résultat de l'activation simultanée des récepteurs sensibles au froid et au chaud. Comme décrit par la littérature existante (Ebi et al., 2021; Kenny and Jay, 2013), et résumé de manière synoptique dans la (**Figure 2.3**), le système physiologique humain réagit au stimulus du stress thermique environnemental par le biais de deux mécanismes prédominants.



**Figure 2. 3.** Représentation des réponses biométéorologiques humaines aux stimuli du Stress Thermique chaud (HS), et Froid (CS). Source : (Santos Nouri et al., 2023)

Le corps possède de nombreux thermorécepteurs, qui sont des détecteurs sensoriels chargés du contrôle et de la régulation de la température interne du corps. Ces capteurs des terminaisons nerveuses libres, sont distribués simultanément dans la surface de la peau (périphériques) et au centre du corps (noyaux). Sensibles aux variations de température, ils transmettent des signaux au centre hypothalamique du cerveau par l'intermédiaire de la moelle épinière.

Ensuite, les données sont comparées à une valeur de référence et intégrées dans le système. Pour assurer la stabilité thermique, différentes mesures sont mises en œuvre en

fonction des écarts observés. Les échanges de chaleur à l'intérieur de l'organisme humain se génèrent par convection via le flux sanguin et par conduction entre les cellules (Batier, 2016).

- En cas de température excessive, il est nécessaire de rafraîchir le corps (**Figure 2.3**) Pour accomplir cela, l'hypothalamus (siège de contrôle de la thermorégulation) ordonne aux vaisseaux sanguins d'élargir leur diamètre, un phénomène physiologique appelé vasodilatation. Ce qui augmente le flux sanguin (dix fois dans l'ensemble du corps et jusqu'à trente fois dans les mains) et optimise l'échange thermique entre le noyau du corps et les extrémités (Vinet, 2000). En addition, un homme confronté à des températures élevées, la génération et la dissipation de la sueur constituent le mécanisme thermorégulateur le plus efficace, et parfois le seul moyen performant pour lutter contre l'hyperthermie (Moujalled, 2007).
- En cas de température trop basse, il est nécessaire de réchauffer le corps (**Figure 2.3**). Afin d'accroître la production de chaleur, le centre hypothalamique induit à l'inverse une vasoconstriction des vaisseaux sanguins (réduisant leur diamètre) pour diminuer le flux sanguin et le transfert de chaleur interne du centre vers l'environnement ambiant. Il peut aussi provoquer des contractions musculaires, comme les frissons qui augmentent la génération de chaleur par les muscles (Moujalled, 2007).

## 2.4 Variables physiques

L'environnement physique détermine en grande partie les échanges thermiques convectifs, radiatifs, évaporatifs et respiratoires entre le corps humain et son environnement. La température de l'air à une incidence directe sur le transfert de chaleur par convection entre le corps humain et le milieu ambiant, et elle a également un impact indirect sur les échanges thermiques radiatifs, évaporatifs et respiratoires (Thellier, 1999).

### 2.4.1 Facteurs micro-météorologiques

(Liu et al., 2016) ont réalisé une analyse de variance multifactorielle sur 7851 échantillons dans six espaces publics à Changsha, en Chine, caractérisée par un climat chaud en été et froid en hiver. Ils ont constaté que la température de l'air expliquait environ 65 % de la variation annuelle des sensations thermiques humaines en extérieur par rapport à trois autres paramètres météorologiques (température du globe, vitesse de vent, humidité relative).

(Chen et al., 2018) ont mené une enquête longitudinale d'une année sur la sensation thermique et le confort en extérieur à Harbin, située dans la région extrêmement froide de la Chine. Les personnes interrogées ont identifié la température de l'air comme la variable microclimatique la plus significative qui influence le confort thermique extérieur.

De plus, des chercheurs (Lai et al., 2014; Tsitoura et al., 2014) ont observé que la température de l'air présentait une forte corrélation avec la sensation thermique en extérieur par rapport aux trois autres indicateurs microclimatiques. Aussi, les aspirations en termes de radiation solaire, de vitesse du vent et d'humidité relative étaient liées à la température de l'air. Au fur et à mesure que la température de l'air intensifiait, les sujets préféreraient une vitesse du vent plus élevée également, tandis que les niveaux de préférences de radiation solaire et d'humidité relative chez les sujets diminuent, et vice versa (Lai et al., 2014).

Parallèlement, (Niu et al., 2015) ont souligné que les fluctuations de la vitesse du vent et de la température radiante ont un impact significatif sur la perception thermique. Ainsi, lors de la conception des espaces urbains thermiquement confortables, il est indispensable d'évaluer l'effet de la radiation solaire et de la vitesse du vent. Des travaux de recherches récentes ont fourni de multiples réponses à cette question, par exemple en utilisant une régression logistique, (Tseliou et al., 2015) ont constaté que le rayonnement solaire avait un impact significatif sur la sensation thermique, alors que la vitesse du vent avait un effet minimal.

Dans une étude menée par (Liu et al., 2016), il a été démontré que le rayonnement solaire et la vitesse du vent contribuaient par une variation annuelle de 22 % et 8 % des sensations thermiques humaines en extérieur. En 2007, Hwang et Lin (2007) ont réalisé une étude sur les évaluations subjectives des sensations thermiques (radiation solaire et vent), et ont conclu que la radiation solaire avait un impact plus prononcé sur la modification de la sensation thermique d'un sujet par rapport au mouvement de l'air.

(Shih et al., 2017) ont affirmé qu'au cours des mois d'été à Taïwan, l'insatisfaction liée à l'environnement thermique était plus étroitement associée au rayonnement solaire qu'au vent. De plus, (Lin et al., 2011; Xu et al., 2018; Yin et al., 2012) ont constaté que le rayonnement avait une influence plus importante que le vent sur la perception thermique en extérieur. Ils ont également observé une corrélation plus forte entre la sensation thermique extérieure et le rayonnement solaire par rapport au vent.

En revanche, les études menées par Krüger et al. (2013) à Glasgow, au Royaume-Uni, et Krüger & Rossi (2011) à Curitiba, au Brésil, ont montré que le vent avait une influence

significative par rapport au rayonnement solaire. Le climat tempéré (Cfb, ou climat tempéré maritime, selon la classification climatique de Köppen-Geiger) des villes étudiées ci-dessus pourrait expliquer les résultats contradictoires, car la perception d'une vitesse du vent plus élevée sous des températures d'air plus basses pourrait contribuer à ces différences comme énonçait par (Lin et al., 2013; Wang et al., 2018).

L'humidité relative a généralement été considérée comme le facteur climatique le moins significatif influençant la perception thermique en extérieur, comme en témoignent les résultats de Cheng et al. (2012), Kántor et al. (2012), Lai et al. (2014), Chen et al. (2018) et ils ont utilisé deux équations linéaires pour modéliser la sensation thermique en extérieur à Hong Kong, l'une utilisant l'humidité relative et l'autre non. Ils ont déterminé que la différence entre les deux lignes de régression était insignifiante.

Cependant, avec l'élévation de la température de l'air, sa capacité à contenir de la vapeur d'eau augmentent également, ce qui peut potentiellement amplifier l'impact de l'humidité de l'air sur la perception subjective du confort thermique en extérieur. À Singapour, qui connaît des températures élevées et une humidité importante, les participants ont identifié l'humidité relative comme le facteur microclimatique le plus inconfortable (Chow et al., 2016).

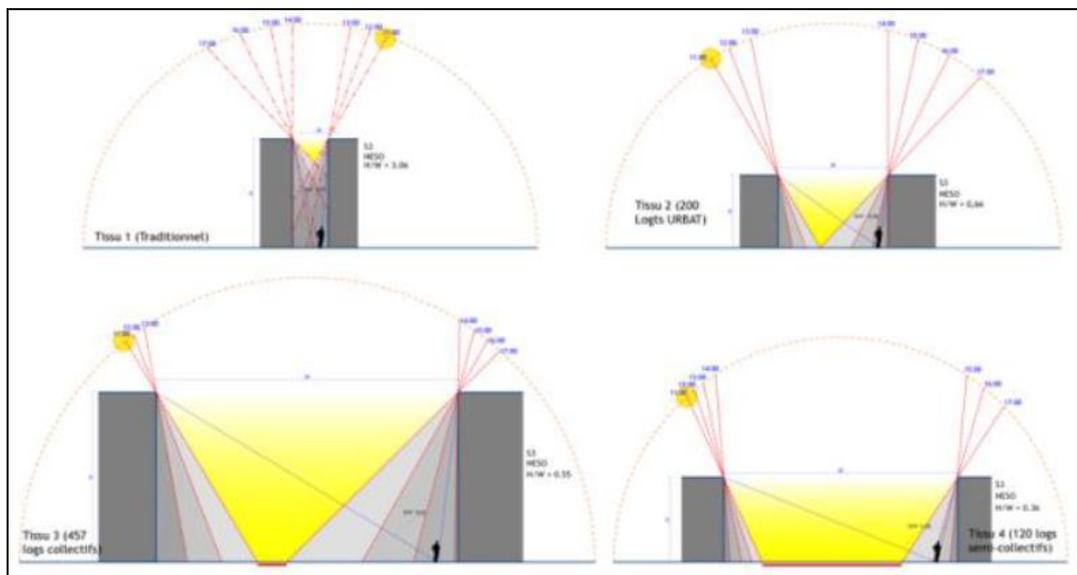
Par ailleurs, une caractéristique importante de l'environnement physique extérieur est sa nature dynamique. À une échelle temporelle plus longue, les facteurs microclimatiques extérieurs changent constamment. (Lai et al., 2017) ont introduit un indice de fluctuation (IF) pour les mesures de l'environnement thermique extérieur en tant que rapport de l'écart-type d'un paramètre micro-météorologique à sa valeur moyenne. Les auteurs ont observé que (IF) pour la température de l'air et l'humidité relative était d'environ 0,05, que le rayonnement solaire global avait un (IF) proche de 0,2 et que la vitesse du vent présentait la plus grande variation avec un IF proche de 0,5.

#### **2.4.2 Facteurs géométriques de l'espace urbain**

Les distances entre les surfaces dans les espaces publics exercent une influence dominante dans l'identification des facteurs de forme urbaine et de l'angle solide d'où le ciel est observable à partir d'un point donné. Cette interaction entraîne des variations substantielles dans les fluctuations de température diurnes entre les espaces larges et étroits. L'agencement des surfaces, y compris leur orientation, leur disposition (verticale, horizontale ou inclinée), ainsi que le rapport hauteur/largeur et la profondeur des structures

bâties, exercent une influence significative sur les effets thermiques et dynamiques des flux d'air (Boussoulim, 2002).

a) **Rapport d'aspect (H/W) :** les deux principaux facteurs qui affectent le climat urbain sont la géométrie urbaine et les propriétés thermiques des surfaces (Eliasson, 2000). L'un des paramètres clés pour déterminer la géométrie du canyon urbain est le rapport (H/W), qui est identifié par le rapport entre la hauteur des parois du canyon (H) et la largeur du canyon (W) (Oke, 1988). La relation entre la hauteur des bâtiments (H) et la distance entre eux (W) a un impact sur la quantité de rayonnement solaire reçu et émis (**Figure 2.4**), ainsi que sur les vitesses du vent.



**Figure 2. 4.** Différents ratios H/W configurés dans l'étude sur Béchar

Source : (Slimani & Mazouz, 2019)

Des études ont démontré que l'augmentation du rapport d'aspect entraîne une diminution de la température de l'air pendant le cycle diurne d'une journée chaude d'été (Bourbia and Awbi, 2004; Bourbia and Boucheriba, 2010; Johansson, 2006; Slimani and Mazouz, 2019).

Bourbia & Awbi (2004) ont constaté dans recherche menée en climat chaud et aride d'El Oued en Algérie, une disparité de 4 °C dans la température de l'air entre les canyons larges (H/W = 0,5) et les canyons étroits (H/W = 2). Dans une investigation ultérieure à Constantine, Bourbia et Boucheriba (2010) ont effectué des relevés de température de surface et d'air dans divers sites dont le rapport d'aspect varié de (1 à

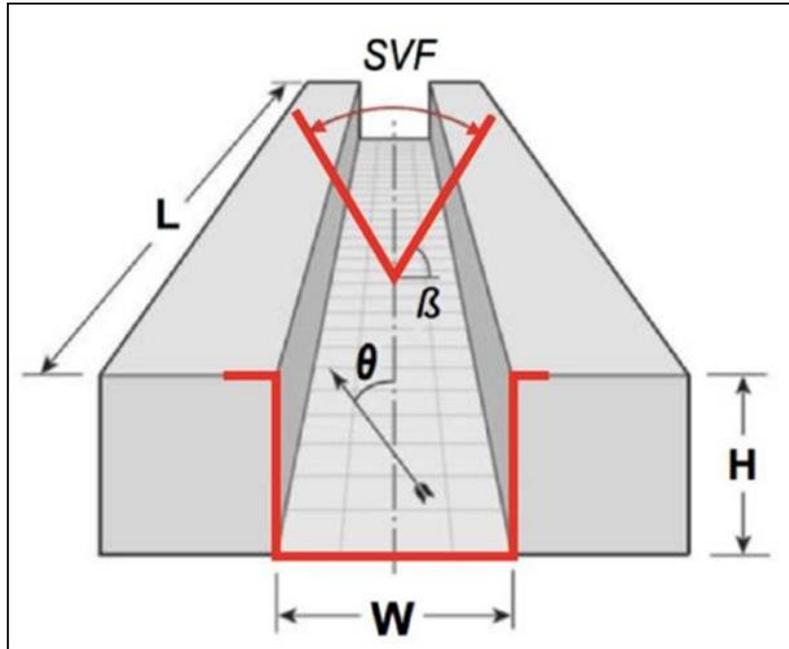
4,8). Leurs résultats révélèrent que les canyons urbains profonds présentaient des températures de l'air et de surface inférieures par rapport aux canyons larges.

De plus, le rapport (H/W), influencé par l'orientation des vents dominants, affecte significativement le degré d'atténuation du canyon (**Figure 2.4**). De plus, pour un rapport (H/W) donné, une relation claire se dessine entre l'atténuation de la vitesse du vent et l'angle d'attaque à proximité de l'axe de la rue et la direction du vent (Bouketta and Bouchahm, 2020; Erell et al., 2011).

En ce qui concerne la perception thermique, l'augmentation du rapport H/W contribue à une amélioration pouvant atteindre jusqu'à 24 °K dans les valeurs de l'Indice de Température Physiologique (PET) (Ali-Toudert and Mayer, 2006). Notamment, le PET augmente avec la diminution du rapport H/W, en raison de l'influence du rayonnement solaire total sur les surfaces. Parallèlement, les valeurs du PET diminuent en présence d'ombrage, un aspect principalement influencé par le rapport H/W (Abreu-Harbich et al., 2013).

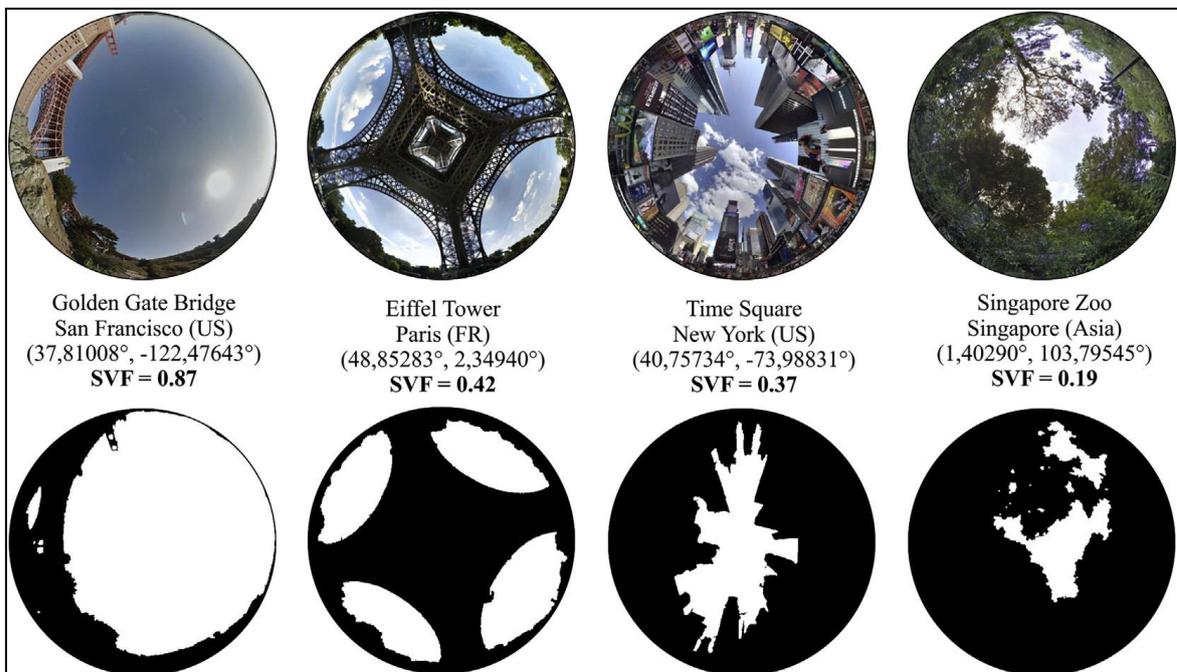
- b) Sky View Factor (SVF) :** le facteur de vue sur le ciel (SVF) est une mesure quantitative de la proportion de l'hémisphère (**Figure 2.5**), il mesure le degré d'obstruction du ciel par l'environnement environnant pour un point donné et est un paramètre couramment utilisé pour caractériser la géométrie des canyons urbains (Lindberg and Grimmond, 2010). Dans le domaine du climat urbain, le SVF est un indicateur significatif considéré comme l'un des facteurs déterminant des variations de température entre urbain et rural et intra-urbain (Chen et al., 2012).

Comme le soulignent diverses études (Höppe, 1999 ; Matzarakis et al., 2010), Le SVF exerce un contrôle optimal sur la Température Moyenne Radiante (T<sub>mrt</sub>) en contrôlant le rayonnement solaire à courtes ondes (direct, diffus et réfléchi) ainsi que le rayonnement à longues ondes. Par conséquent, le SVF a un impact direct sur l'indice (PET) et il est étroitement lié à la (T<sub>mrt</sub>).



**Figure 2. 5.** Ratio (H/W) et facteur (SVF) d'un canyon urbain  
 Source : (Erell et al., 2010) de (Slimani & Mazouz, 2019)

Ce facteur est indépendant de la latitude, de l'orientation, et même de la période de l'année, mais se varié exclusivement selon de la géométrie (Figure 2.6). Il atteint la valeur de 1 pour une surface horizontale dégagée où aucune obstruction ne limite la vue (100% du ciel), mais diminue lorsque la vue est obstruée (Kedissa et al., 2016).



**Figure 2. 6.** Photos Fish-eye et valeurs du facteur (SVF) respectives pour quatre emplacements à travers le monde. Source : (Middel et al., 2018)

Le SVF peut être déterminé à l'aide d'un modèle numérique de surface, comme le démontrent (Lindberg, 2010), et (Kastendeuch, 2013). Cependant, il est tout aussi crucial et essentiel de mesurer directement le SVF à partir d'images fish-eye, comme le soulignent (Honjo et al., 2019; Middel et al., 2017). Pour des illustrations explicatives du SVF et des photos fish-eye (**Figure 2.6**).

## **2.5 Variables humaines**

Parmi les facteurs déterminants de la sensation thermique, les différences anthropométriques (sexe, âge, masse corporelle et couleur de la peau) peuvent répondre dans une certaine mesure aux facteurs de subjectivité derrière les votes de sensation thermique rapportés (Kruger and Drach, 2017). En ce sens, (Tuomaala et al., 2013) indiquent de la logique sous-jacente à une approche plus holistique de la sensation thermique, où des facteurs externes liés à l'environnement et des aspects internes liés au sujet participent à la sensation thermique perçue.

### **2.5.1 Variables sociodémographiques**

Un nombre limité d'études se sont intéressées à l'âge et au sexe en tant que variables efficaces sur la sensation thermique en extérieur (Amindeldar et al., 2017; Jin et al., 2020; Kenawy and Elkadi, 2012; Kruger and Drach, 2017; Krüger and Rossi, 2011; Tung et al., 2014). Plusieurs recherches ont exploré les différences liées au sexe dans le confort thermique intérieur. L'analyse de la littérature de (Karjalainen, 2012) a révélé que, malgré des conditions thermiques similaires, les femmes signalent des niveaux plus élevés d'insatisfaction que les hommes dans plus de la moitié des études menées.

De plus, la majorité des études ont rapporté que les femmes sont plus sensibles, et moins satisfaites des expositions au froid que leurs homologues masculins, cependant, il n'y avait pas de dissimilitudes de sexe substantielles dans la perception de la température neutre (Indraganti and Humphreys, 2021; Schweiker et al., 2018; Wang et al., 2018).

Wang (2018), a noté que la différence de la perception thermique entre les deux sexes provient essentiellement des vêtements avec une isolation thermique réduite et de l'activité métabolique inférieure des femmes par rapport aux hommes. Par conséquent, cette influence peut diminuer après avoir pris en compte le taux métabolique ou les variables anthropométriques dans le modèle évalué.

Finalement, les mécanismes d'adaptation comportementale liés au sexe tels que, l'attitude visible des femmes envers la protection solaire, sont fréquemment observés dans les espaces extérieurs à Taïwan. Les femmes utilisent diverses solutions pour se protéger du soleil, en restant dans des zones ombragées par des arbres ou des bâtiments, ou en recourant à des parasols, des chapeaux ou d'autres objets d'occultation solaire (Lin, 2009). Ces comportements démontrent que les femmes taïwanaises font preuve d'un niveau remarquable de vigilance pour minimiser l'exposition au soleil.

En ce qui concerne l'impact du facteur 'Âge' sur la sensation thermique perçue, (Indraganti and Rao, 2010) ont constaté que, les individus les plus âgés éprouvent une sensation thermique légèrement plus basse par rapport aux sujets plus jeunes. Cette observation a été réalisée en comparant deux sous-groupes : ceux de moins ( $< 40$ ans) et ceux de (40 ans) et plus ( $\geq 40$ ). Les auteurs suggèrent que cet effet est attribuable à des taux métaboliques réduits et à un mode de vie plus sédentaire chez les personnes âgées (Schellen et al., 2010). Les participants âgés ont exprimé des niveaux de satisfaction plus élevés avec un pourcentage important de 'pas de changement' pour le vote d'aspiration thermique.

À mesure qu'une personne vieillit, sa sensibilité aux changements de température diminue. Dans une étude menée par Schellen et al. (2010), l'impact d'une légère variation de température sur le confort thermique de huit jeunes adultes (20-25 ans) et huit individus plus âgés (67 et 73 ans) a été examiné à l'aide d'une chambre climatique. Les résultats ont révélé que, globalement, les participants plus âgés ont signalé une sensation thermique réduite par rapport aux participants plus jeunes.

Pantavou et al. (2014) ont utilisé l'Indice UTCI, dans des enquêtes par questionnaire menées à Athènes. L'objectif était d'évaluer dans quelle mesure les facteurs subjectifs des sujets interrogés étaient démontrés par les valeurs de l'indice. Un stress thermique plus élevé a été observé au sein du sous-groupe féminin. En ce qui concerne l'âge, une diminution du pourcentage de votes en stress thermique a été remarquée pour les classes d'âge croissantes.

Pour ce qui est du paramètre 'masse corporelle', Karyono (2000) a mené une étude de terrain en Indonésie avec 596 travailleurs de bureau. Cette étude a parallèlement mis en œuvre des enquêtes par questionnaire et des observations sur site. Les résultats ont été analysés en se basant sur les températures neutres par plusieurs sous-groupes, en tenant compte de facteurs tels que le sexe, l'âge et la masse corporelle.

En général, les hommes ont ressenti une chaleur plus élevée que les femmes, bien que les différences aient été plutôt négligeables et statistiquement insignifiantes au niveau de

confiance 5%. En ce qui concerne les différences liées à l'âge, les individus plus âgés ont présenté des températures neutres légèrement plus basses par rapport aux sujets plus jeunes que les plus jeunes.

En relation avec l'Indice de Masse Corporelle (IMC), (Karyono, 2000) a constaté que les individus avec une masse corporelle plus importante présentaient généralement des températures neutres plus basses par rapport à ceux avec une masse corporelle normale (20 à 25 kg/m<sup>2</sup>).

Indraganti et al. (2015), ont démontré que les individus présentant un faible indice de masse corporelle (défini comme inférieur à 18,5 kg/m<sup>2</sup>) ont connu des températures de confort plus élevées par rapport à ceux ayant un (IMC) élevé (défini comme IMC > 25 kg/m<sup>2</sup>).

En outre, Tuomaala et al. (2013) ont réalisé une étude en utilisant une approche de simulation, où ils ont employé un Modèle Thermique Humain (HTM) dynamique et multi-nodal pour prédire le confort thermique humain. Les niveaux de vêtements, le taux métabolique et la taille ont été maintenus constants, tandis que l'étude manipule l'âge et l'indice de masse corporelle dans un environnement de salle d'essai contrôlée.

Les constatations majeures indiquent que la sensibilité thermique diminue avec l'âge, dans l'ensemble, l'impact de l'indice de masse corporelle sur les données de sensation thermique a été montré comme étant minime. Dans le second cas, une augmentation de l'indice de masse corporelle a été observée comme entraînant une légère diminution de l'indice de sensation thermique utilisé dans les prédictions.

### **2.5.2 Adaptation thermique**

Le terme 'adaptation' correspond à la diminution progressive de la réponse de l'organisme à un stimulus répété, couvrant toutes les actions qui rendent les individus mieux adaptés à un environnement distinctif. Dans le contexte du confort thermique, cela peut impliquer tous les processus par lesquels les individus passent pour améliorer l'ajustement entre l'environnement et leurs besoins. Le principe adaptatif est formulé par (Nicol et al., 2012) comme suit : « *si une modification des conditions climatiques se produit et provoque de l'inconfort, les personnes entreprendront des actions visant à rétablir leur confort* ».

Dans les recherches récentes sur le confort thermique, on observe deux approches : l'approche du bilan thermique et l'approche adaptative. Les modèles du bilan thermique, également appelés modèles "statiques", étaient à la base des travaux pionniers de (Gagge et

al., 1986) et (Fanger, 1972). Ces modèles considèrent la personne comme un récepteur passif des stimuli thermiques et reposent sur l'hypothèse que les effets d'un environnement thermique donné sont seulement régulés par les échanges de chaleur et de masse entre le corps humain et son environnement.

Cependant, les adeptes de l'approche adaptative estiment que l'approche simpliste de cause à effet exprimée dans les modèles statiques est insuffisante pour décrire la perception thermique dans le monde réel. En conséquence, l'hypothèse statique est considérée comme un modèle de confort thermique 'à température unique' (Humphreys and Nicol, 1998; Nicol, 1993).

De cette manière, alors que l'approche statique peut être décrite comme un processus linéaire dans lequel les conditions environnementales induisent des réactions physiologiques qui altèrent la perception de confort ou d'inconfort chez l'individu. L'approche adaptative considère l'occupant comme un acteur actif confronté à des conditions qu'il perçoit comme inconfortables, peut être symbolisée à travers l'introduction de boucles rétroactives dans la chaîne linéaire de l'approche statique (Benharkat, 2017).

Pour conclure, la recherche menée par Nikolopoulou et al. (2001) figure parmi les recherches pionnières sur le confort thermique en extérieur qui examine le comportement adaptatif des individus. La méthodologie de recherche et les techniques d'analyse de cette étude ont eu un impact significatif sur les études ultérieures dans ce domaine. Par la suite, Nikolopoulou et Steemers (2003) ont approfondi ce concept en classifiant l'adaptation thermique en trois catégories distinctes : physique, physiologique et psychologique.

#### a) **Adaptation physique : thermorégulation comportementale**

En réponse aux perturbations induites par le climat, et par conséquent face à une situation d'inconfort, l'individu prend des mesures de protection en se réfugiant dans un microclimat. En effet, durant la saison estivale, il se met à l'ombre, tandis qu'il bénéficie des rayons solaires durant l'hiver. L'adaptation physique implique toutes les modifications qu'une personne apporte afin de s'ajuster à son environnement ou de le modifier selon ses besoins. On peut ainsi identifier deux types d'adaptation différents, réactive et interactive (Nikolopoulou et al., 1999):

- **Dans l'adaptation réactive**, seules des modifications personnelles surviennent entre autres, le changement du taux d'habillement, de la posture (debout/assis) et changement de position, ou encore la modulation de la chaleur métabolique par la consommation de boissons chaudes ou froides.

Par conséquent, l'individu est en mesure d'anticiper son inconfort afin de rétablir une situation de confort. À cet égard, la modification de ses vêtements lui permet d'ajuster leur résistance thermique en fonction des fluctuations climatiques, la modulation de son niveau d'activité accroît ou diminue son métabolisme entraînant ainsi une production de chaleur plus ou moins importante, et l'ajustement de sa posture diminue les échanges de chaleur avec son milieu ambiant. Cette dynamique relève de la thermorégulation comportementale, attribuant ainsi à l'individu l'implication de son état de confort ou d'inconfort (Batier, 2016).

- **Dans l'adaptation interactive**, les individus effectuent des changements dans l'environnement afin d'améliorer leurs conditions de confort, tels que l'ouverture d'une fenêtre pour augmenter ou diminuer la ventilation de la pièce, le réglage d'un thermostat, l'ouverture d'un parasol, etc.

L'adaptation interactive en extérieur est limitée ou restreinte, contrairement à la situation en intérieur, Nikolopoulou et al. (1999) avançaient deux raisons à cela. Tout d'abord, il n'y a pas beaucoup d'éléments qui permettent une telle interaction avec l'environnement. Deuxièmement, même dans les endroits où des éléments tels que des parasols étaient disponibles, aucune interaction n'a été remarquée de la part du public. L'ouverture et la fermeture des parasols étaient strictement effectuées par un membre du personnel, généralement tous ouverts ou fermés en même temps. Cela doit être dû au fait que les gens ne se sentent pas autorisés à imposer des changements dans l'espace extérieure, d'autant plus que cela affecterait les autres usagers.

#### **b) Adaptation physiologique : thermorégulation végétative**

Les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement sont constants. En cas de déséquilibre, le corps met en place une régulation inconsciente appelée thermorégulation végétative (Batier, 2016).

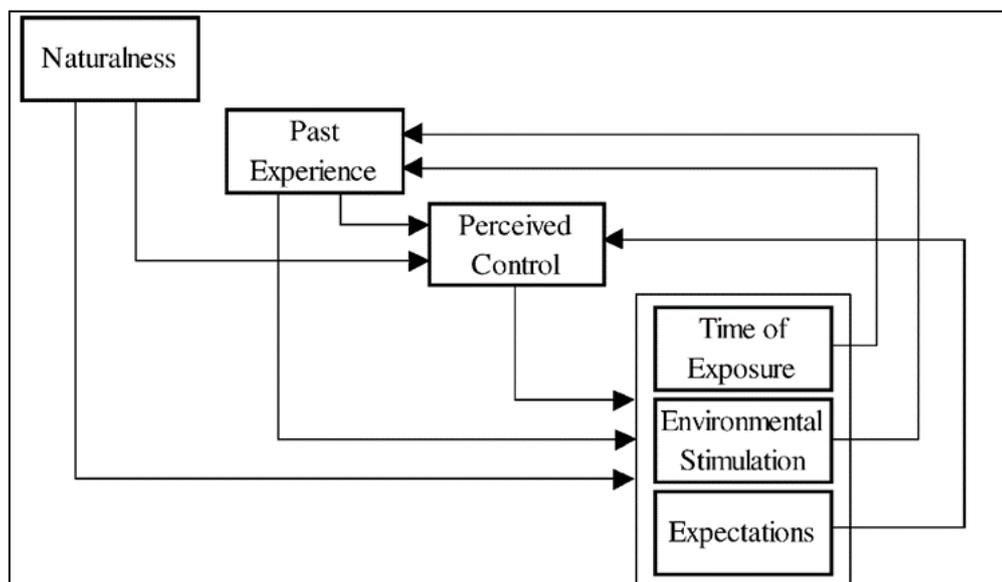
L'adaptation physiologique fait référence aux réactions physiologiques qui se produisent en raison d'une exposition continue ou répétée à un stimulus de stress thermique, entraînant une réduction progressive de la réponse humaine induite par une telle exposition. Dans le contexte de l'environnement thermique, ce processus est appelé acclimatation physiologique (Nikolopoulou and Steemers, 2003).

Bien que ce processus soit évident dans des environnements hostiles, par exemple, ceux originaires de régions plus froides comme la Scandinavie ou l'Écosse mentionnaient souvent que leur origine leur permettait de tolérer des températures relativement froides et

des vents violents. Également, durant l'été les individus de la région méditerranéenne expriment souvent leur familiarité avec la chaleur élevée en raison de leurs origines géographiques (de Dear et al., 1998; Knez and Thorsson, 2006; Lin and Matzarakis, 2008; Nikolopoulou et al., 1999). Néanmoins, dans quelle mesure l'adaptation physiologique par rapport aux facteurs psychologiques contribue à ce phénomène reste ambiguë, car elle est influencée par des expériences antécédentes distinctes et des attentes ultérieures.

### c) Adaptation psychologique

Les individus ont des perceptions variées de leur environnement, et la réaction humaine à un stimulus physique ne se limite pas uniquement de son intensité, mais aussi aux informations sensorielles qu'ils détiennent concernant une situation donnée. Les facteurs psychologiques exercent une influence significative sur la perception thermique d'un espace (Figure 2.7).



**Figure 2. 7.** Interactions entre les différents paramètres de l'adaptation psychologique

Source : (Nikolopoulou & Steemers, 2003)

Ils pourraient potentiellement être la cause des écarts constatés entre les prédictions (calculs) du confort thermique et les sensations subjectives de confort (Chen and Ng, 2012). L'adaptation psychologique dans les espaces extérieurs est détaillée dans les travaux de (Nikolopolo et al, 1999, 2003) comme ci-dessus (Figure 2.7) :

- **Aspect naturel**, un environnement dénué d'artificialité, peut conduire l'individu à accepter des modifications significatives dans son milieu physique, pourvu qu'elles soient engendrées de manière naturelle.

- **L'habitude et les attentes** jouent un rôle significatif dans la formation des perceptions des individus principalement, au sein des bâtiments ventilés naturellement. Dans de tels édifices, les personnes anticipent des fluctuations de température au fil du temps et de l'espace. En revanche, dans les espaces climatisés, les individus s'attendent à un environnement thermique constamment stable.

En milieu extérieur, cela concerne la réponse commune que les individus fournissent généralement toute l'année, telle que « *c'est acceptable pour cette saison particulière* », ou « *puisque c'est l'hiver, il est attendu qu'il fasse froid* ». Dans les cas rares où les circonstances thermiques divergeaient des expériences précédentes des individus, cela peut provoquer des changements dans leurs évaluations de la perception, voire des réclamations, car leurs anticipations (expectations) avaient changé.
- **L'expérience** ou '**histoire thermique**' influe directement sur les attentes des individus et peut être différenciée à court et à long terme. L'expérience à court terme est associée à la mémoire et apparaît comme responsable des changements dans les attentes des sujets. Cela explique pourquoi la neutralité thermique pour les conditions extérieures entre l'hiver et l'été est approximative de la température moyenne de l'air (Nikolopoulou et al, 2001).

L'expérience à long terme est liée aux schémas que les individus ont construits dans leur esprit, déterminant le choix d'une action dans des circonstances différentes. Ainsi, les changements de vêtements, la consommation de boissons fraîches pour modifier la chaleur métabolique, le passage du soleil à l'ombre, etc., représentent tous des choix bien établis d'action face à la variabilité de l'environnement thermique. Comme le soutient (Wohlwill, 1974), les niveaux d'adaptation sont instaurés selon les expériences thermiques passées.
- **Temps d'exposition**, expérimenter un inconfort temporaire n'est pas perçu négativement tant que cela ne cause pas d'insatisfaction considérable, comme quitter une voiture chaude pour entrer dans un bâtiment en hiver. En effet, c'est un facteur critique dans la perception et la fréquentation des espaces extérieurs, qui sont principalement utilisés pour des activités récréatives et les individus adaptent la durée qu'ils passent à l'extérieur suivant leurs exigences.

Le temps que les individus passaient dans divers sites présentait une variation significative, la perception thermique de l'environnement étant un paramètre crucial

influençant leur prise de décision quant à la durée à passer dans un endroit particulier. Deux facteurs distincts semblaient exercer une influence sur cette décision : l'appréciation momentanée de la chaleur et l'expérience thermique à court-terme des sujets. En général, si l'exposition à l'inconfort n'est pas menaçante pour le corps vivant, telle que la sensibilité au froid plutôt qu'à la chaleur, la tolérance à l'environnement thermique demeure élevée.

- **Sensation de contrôle ou 'contrôle perçu'**, les individus qui ont un degré élevé de contrôle sur une source de gêne sont en mesure de supporter des variations significatives, éprouvent moins d'irritation et présentent des réactions émotionnelles négatives considérablement réduites.

Les personnes qui ont le choix de s'asseoir au soleil ou à l'ombre, indépendamment de leur usage, ressentent moins d'inconfort. De plus, ceux qui ont diverses raisons d'être dans un espace ou optent délibérément pour une activité de plein air, agissant par choix plutôt que par contrainte, sont plus tolérants à l'environnement thermique défavorables. Car ils le perçoivent comme leur propre choix, contrairement à ceux qui sont dans un tel espace uniquement pour rencontrer quelqu'un, et qui n'ont pas le choix de quitter l'espace à leur guise, provoquant ainsi un stress et une réduction de la tolérance à l'environnement thermique.

- **Stimulation environnementale**, il existe un consensus croissant selon lequel un environnement dynamique, par opposition à un environnement statique est préférable. L'intensité de l'environnement stimulant dans les espaces extérieurs est déterminant notamment, dans les endroits où il y a peu de limitations thermiques. C'est un avantage significatif de ces espaces et probablement la principale raison pour laquelle la majorité des individus choisissent de s'asseoir en plein air.

## 2.6 Indices d'évaluation du stress thermique en espace urbain

L'évaluation du confort thermique humain est en cours depuis le XX<sup>e</sup> siècle, également les premiers modèles de base ont été établis en s'appuyant sur l'interaction de deux facteurs météorologiques (la température et l'humidité) (Fabbri, 2015). Dans les années 1930 (Gagge, 1936) a introduit le 'modèle à deux nœuds', qui fut la première utilisation de principe de la thermodynamique.

Givoni (1963) a approfondi ces résultats de recherche en créant l'indice de stress thermique (Givoni, 1963), tandis que Fanger (1972) a développé le Vote Moyen Prévisible (PMV) au cours des années 1970. Enfin, la dernière frontière d'exploration dans le confort thermique est l'étude du confort thermique adaptatif, tel que discuté dans les travaux de Brager & de Dear, (1998) ; Humphreys & Nicol, (1998) ; Nikolopoulou et al, (1999).

L'étude du confort intérieur a fait l'objet de recherches approfondies au cours des décennies précédentes, et sa quantification est bien établie grâce aux ambiances stable des espaces intérieurs en termes (de température, d'humidité, et de flux d'air) et aussi de la capacité à les contrôler mécaniquement selon les exigences du confort humain (Coccolo et al., 2016).

Par contre, le confort thermique en extérieur est un domaine de recherche relativement récent, au début des années 2000, un intérêt croissant pour l'étude des espaces extérieurs a émergé, ce qui a conduit à l'emploi de méthodes et d'indices de confort thermique développés pour les espaces intérieurs (Johansson et al., 2014).

Cependant, cette approche a rencontré des défis, car l'environnement extérieur est bien plus complexe que l'environnement intérieur. Par exemple, il existe d'importantes fluctuations spatiales et temporelles des paramètres météorologiques dans les espaces extérieurs, notamment en termes d'exposition solaire et de vitesse du vent.

De plus, la durée d'exposition peut varier de quelques minutes à plusieurs heures, et les individus dans ces espaces doivent s'adapter physiquement et socio-culturellement, soulignant la nécessité d'utiliser des modèles non constants (*non-steady state models*) pour mesurer le confort humain en extérieur (Höppe, 2002; Johansson et al., 2014).

En outre, l'environnement extérieur présente une grande diversité de fonctions et d'usagers. Les individus participent à diverses activités dans cet espace, et chaque piéton ayant des expériences thermiques, des accoutumances et des attentes distinctes, ce qui rend difficile l'application directe d'une approche intérieure aux conditions extérieures (Nikolopoulou et al., 2001).

Conformément au climat et les objectifs de la recherche, les indices de confort thermique peuvent être divisés dans les catégories suivantes (Blazejczyk et al., 2012) :

- Les indices basés l'équation du bilan thermique 'indices rationnels',
- Les Indices basés sur l'analyse objective et subjective 'indices empiriques',
- Les indices basés sur des mesures directes de variables météorologiques 'indices directs'.

### 2.6.1 Indices directs

Le groupe initial d'indices quantifie le confort humain en considérant précisément l'effet de la température de l'air, de la vitesse du vent et de l'humidité relative, tout en négligeant le comportement humain (Coccolo et al, 2016). Les recherches à long terme sont mieux adaptées aux indices simplifiés, ces indices sont utilisés par divers services météorologiques nationaux et locaux à travers le monde. Certains indices tels que ‘*Effective Temperature*’ (ET) sont issus d'études réelles, tandis que d'autres sont basés sur des considérations théoriques. Cette étude examine uniquement les indices qui fournissent la température comme output.

#### a) Indice de chaleur (HI)

L'indice de chaleur (HI) ‘*Heat index*’ est une combinaison de la température de l'air et de l'humidité relative, déterminant la sensation de chaleur ressentie. Issu de la température apparente (AT) de (Steadman, 1984) par une analyse de régression multiple tenant compte de la température et l'humidité relative, l'équation de l'HI reflète l'impact de l'humidité sur la régulation thermique du corps humain (**Equation 2.5**). Aux États-Unis, l'HI est largement utilisé et calculé comme suit (Blazejczyk et al., 2012) :

$$\begin{aligned} HI = & -8.784695 + 1.61139411 \times T + 2.338549 \times RH \\ & - 0.14611605 \times T \times RH - 1.2308094 \times 10^{-2} \times T^2 \\ & - 1.6424828 \times 10^{-2} \times RH^2 + 2.211732 \times 10^{-3} \times T^2 \times RH \\ & + 7.2546 \times 10^{-4} \times T \times RH^2 - 3.582 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

- **T** : température de l'air en (°C)
- **RH** : humidité relative (%)

#### b) *Humidex*

Le *Humidex* (H) a été initialement défini par (Masterton and Richardson, 1979) pour les prévisions météorologiques courantes au Canada. Le *Humidex* est décrit par une équation linéaire (**Equation 2.6**) qui relie la température de l'air ( $T_a$ ), l'humidité relative (RH) et la pression de vapeur d'air ( $vp$ ) en un seul valeur numérique (**Equation 2.7**) pour refléter la température perçue comme suit (d'Ambrosio Alfano et al., 2011):

$$Humidex = T_a + \frac{5}{9} \times (vp - 10) \quad (2.6)$$

$$vp = 6.112 \times \left( \frac{7.5 \times Ta}{10^{237.7 + Ta}} \right) \times \frac{RH}{100} \quad (2.7)$$

- **Ta** : la température de l'air (en °C),
- **RH** : l'humidité relative (%),
- **Vp** : la pression en vapeur d'eau saturante (hPa),

#### c) **Température effective (ET)**

L'indice (ET) a été présenté par Houghton & Yaglou (1923) pour proposer une approche permettant d'évaluer les effets de la température de l'air et de l'humidité sur le confort thermique. Missenard (1933) a introduit une expression mathématique pour la température effective (ET), également connue sous le nom de 'température résultante'. Cet indice permet la détermination de la température effective ressentie par le corps humain en fonction de facteurs météorologiques tels que la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent, qui influent sur l'échange thermique entre corps humain et l'environnement.

La température effective (ET) a été largement utilisée en Allemagne de l'Est, en Pologne, en Union soviétique et dans d'autres pays. L'ET est actuellement en utilisation active en Allemagne. La formule de (Missenard, 1933) pour l'ET est exprimée comme suit:

$$ET = 37 - \frac{37 - T}{0.68 - 0.0014 \times RH + \frac{1}{1.76 + 1.4 \cdot v^{0.75}}} - 0.29 \times T \times (1 - 0.01 \cdot RH) \quad (2.8)$$

Plusieurs échelles d'évaluation sont adaptées pour l'ET, en Europe centrale, les seuils suivants sont utilisés : <1°C = très froid ; 1–9 = froid ; 9–17 = frais ; 17–21 = agréable ; 21–23 = confortable ; 23–27 = chaud ; >27°C = très chaud (Blazejczyk et al., 2012).

#### d) **Température au thermomètre-globe mouillé (WBGT)**

L'indice de Température du Thermomètre à Globe Humide (WBGT) a été initialement établi pour atténuer les maladies liées à la chaleur dans les camps d'entraînement militaire. Il a depuis été reconnu dans des normes internationales par l'ISO 7243 (1989).

Le (WBGT) est déterminé par l'évaluation simultanée de trois paramètres (**Equation 2.9**) : la température du globe (Tg), la température sèche (Ta) et la température du bulbe humide (Tw). Le facteur (Tg) quantifie la vitesse de l'air, la quantité de rayonnement solaire

et la température de l'air. Par contre, le paramètre ( $T_w$ ) mesure le taux d'évaporation (Budd, 2008), la formule du (WBGT) pour l'environnement extérieur est la suivante :

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (2.9)$$

- $T_w$  : la température de bulbe mouillé en ventilation naturelle, (°C) ;
- $T_g$  : la température de globe noir exposé au soleil, (°C) ;
- $T_a$  : la température de l'air sous abri, (°C) ;

Toutefois, le principal inconvénient du l'indice (WBGT) réside dans la difficulté de mesure de la température au thermomètre globe ( $T_g$ ) (**Equation 2.9**). L'indice (WBGT), mesuré en (°C), est un indicateur standard qui a été testé et confirmé dans diverses situations. Pour garantir des résultats fiables, il est essentiel de respecter le protocole de mesure spécifié par la norme (ISO 7243:, 2017).

## 2.6.2 Indices empiriques

D'autres indicateurs sont présents pour prévenir la perception thermique des individus. Les indices empiriques quantifient le niveau de confort humain dans un climat spécifique et se présentent sous la forme de modèles de régression linéaire/multiple issus d'investigation sur terrain, impliquant une mesure des paramètres environnementaux (évaluation objective) et des questionnaires sur place (évaluation subjective). Ces indices empiriques sont mis en œuvre dans des zones climatiques spécifiques et pour un contexte local choisi, où elles sont définies et vérifiées (Coccolo et al, 2016).

### a) Vote de sensation effective (ASV)

Dans une étude menée dans un espace ouvert urbain dans la ville de Cambridge, Nikolopoulou et al. (2001) ont sollicité d'évaluer la perception thermique des individus sur une échelle de 5 points allant de 'très froid' à 'très chaud', désignée par (ASV) '*Actual Sensation Vote*'. Les chercheurs ont également pris en compte des variables personnels tels que l'âge, le sexe, type vêtements, ainsi que des variables du microclimat comme la température de l'air, le vent et le rayonnement solaire.

Conformément à cette approche (Thorsson et al., 2004), ont mené une étude sur l'influence des conditions thermiques sur les attitudes des individus dans un parc urbain localisé au sein de la ville de Rothenburg en Suède. La méthode d'enquête a été utilisée pour évaluer la sensation thermique subjective des participants en utilisant l'indice de sensation

effective (ASV). De même, l'indice de confort thermique (PMV) a été calculé et comparé aux résultats de l'(ASV).

Le Vote de Sensation Effectif (ASV), faisant partie du projet européen RUROS, est déterminé par une équation linéaire en combinant une campagne de mesures microclimatiques et des questionnaires, réalisés dans quatorze sites européens distincts (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006). Cette équation implique la multiplication de paramètres microclimatiques tels que la température de l'air, le rayonnement global, la vitesse du vent et l'humidité relative par un coefficient numérique changeant selon le climat (**Equation 2.10**). Puis, une valeur moyenne de l'(ASV) a été formulée en fonction d'un modèle combiné pour l'Europe, dont l'expression est :

$$ASV = 0,049 Ta + 0,001 Rglo - 0,051 Va + 0,014 RH - 2,079 \quad (2.10)$$

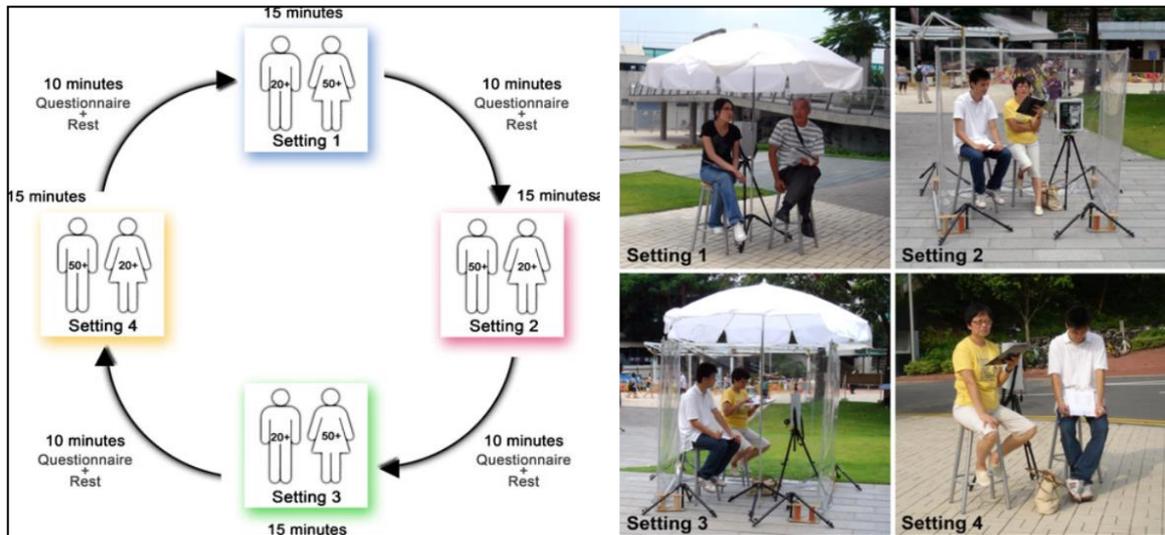
- **Ta** : température de l'air, (°C),
- **Rglo** : radiation solaire globale, (W/m<sup>2</sup>),
- **Va** : la vitesse du vent, (m/s),
- **RH** : l'humidité relative, (%),

#### b) **Vote de sensation thermique (TSV)**

Cheng (2012), ont rapporté les résultats d'une étude sur le confort thermique en extérieur réalisée à Hong Kong à l'aide d'expériences longitudinales, une approche alternative aux enquêtes transversales. Dans une expérience longitudinale, les sensations thermiques d'un nombre relativement restreint de sujets dans différentes conditions environnementales sont suivies et évaluées. Les votes de sensation subjective appréhendaient l'évaluation de l'environnement thermique sur une échelle de 7 points, avec (-3) représentant 'froid' et (+3) représentant 'chaud'. Le point médian (0) représente une sensation thermique neutre, souvent associée à un état de confort.

L'objectif est d'examiner l'impact résultant de fluctuation des variables climatiques tels que la température de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire sur les perceptions thermiques. Les observations ont été effectuées dans un campus universitaire pendant la saison hivernale et estivale. Le protocole expérimental (**Figure 2.8**) impliquait la création de quatre ambiances extérieurs distincts : le premier mettant les sujets sous une protection solaire, le deuxième les abritant du vent par un coupe-vent vertical, le troisième combinant

les deux approches précédentes, et enfin le dernier exposant les sujets aux rayonnements solaires et au vent (**Figure 2.8**).



**Figure 2. 8.** Protocole expérimental de l'étude longitudinale réalisée en espace urbain à Hong-Kong. Source : (Cheng et al, 2012)

Enfin, une formule prédictive (**Equation 2.11**) pour estimer la sensation thermique en extérieur pendant l'été et l'hiver est décrite en fonction de la température de l'air, de la vitesse du vent, de l'intensité du rayonnement solaire et de l'humidité absolue (Cheng et al., 2012) :

$$TSV = 0,1185 Ta - 0,6019 Va + 0,0025 SR + 0,1155 HR - 4,77 \quad (2.11)$$

- **Ta** : température d'air (°C),
- **Va** : vitesse de l'air (m/s),
- **SR** : Radiation solaire global (W/m<sup>2</sup>)
- **HR** : humidité absolue (g/kg air)

### 2.6.3 Indices rationnels

Cette catégorie d'indices est basée sur le bilan d'équilibre thermique du corps humain, soulignant la relation entre le taux métabolique, résistance d'habillement et les paramètres climatiques (température de l'air, température radiante moyenne, vitesse du vent, radiation solaire et humidité relative) sur la perception thermique des individus. Parmi ces modèles, le (PMV) et le (SET\*) développés au départ pour les environnements intérieurs, puis modifiés ultérieurement pour s'adapter à l'environnement extérieur (Coccolo et al, 2016).

La plupart des indices dits ‘rationnels’ sont exprimés en tant que mesure de « *température équivalente d'un environnement donné, où la réponse physiologique d'un individu de référence est similaire à celle dans les conditions extérieures, exprimée en °C* » (Blazejczyk et al, 2012).

**a) Indice de vote moyen prévisible (PMV)**

Le (PMV) est un indice rationnel basé sur l'équation d'équilibre thermique de (Fanger, 1972). Il représente l'un des indices les plus répandus à l'échelle mondiale, élaboré de manière empirique par Fanger, qui a émis l'hypothèse selon laquelle la contrainte physiologique induite par l'environnement détermine la sensation ressentie par un sujet.

Le (PMV) est identifié comme le vote moyen de sensation thermique d'un groupe de personnes allant de (-3) ‘froid’ à (+3) ‘chaud’ et il est lié au (PPD), qui caractérise le nombre de personnes insatisfaits de climat ambiant. Par conséquent, Fanger (1972) a prévu le niveau de confort en tenant compte de la résistance thermique des vêtements et de l'activité métabolique. L'équation finale pour atteindre un confort thermique optimal est peu complexe. La norme (ISO : 7730) inclut une application informatique pour calculer le (PMV) (Blazejczyk et al, 2012).

Bien que, l'indice est établi à l'origine pour des études dans les espaces intérieurs, sous des conditions climatiques stables, il a été appliqué dans certaines études en extérieur. Tandis que, divers chercheurs notamment (Höppe, 2002), et (Cheng et al, 2012) ont démontré que la corrélation entre le (PMV) et les évaluations de la sensation thermique subjectives était minime. En outre, il a été constaté que le (PMV) surestime la perception thermique pendant les périodes de chaleur.

**b) Température effective standard (SET\*) et (OUT\_SET\*)**

(SET\*) repose sur la température cutanée (Tsk) et la contrainte thermorégulatrice (w) en tant que facteurs déterminants, avec des valeurs pour (Tsk) et (w) provenues d'un modèle à deux nœuds de physiologie humaine proposé par Gagge et al. (1971 et 1986).

La température effective standard (SET\*) se décrit comme la température analogue d'un milieu isotherme à 50 % d'humidité relative, vitesse du vent inférieure à 1,5 (m.s<sup>-1</sup>) et température de l'air égale à la température radiante moyenne, où résistance thermique d'habillement d'un individu est adaptés à l'activité respective, reproduisant ainsi les conditions environnementales réelles (Gagge et al., 1986).

Pour des études en milieu urbain, l'indice (SET\*) est modifié en (OUT\_SET\*) ‘*Outdoor Effective Temperature*’ introduit par (de Dear and Pickup, 2000), intégrant une

méthode d'estimation de la température radiante moyenne ( $T_{mrt}$ ) en extérieur, ce modèle a été établi à l'origine pour évaluer le confort thermique extérieure pour la ville de Sydney (Spagnolo and de Dear, 2003).

**c) Température Physiologique Equivalente (PET)**

Le (PET) est défini comme la température équivalente d'un environnement isotherme de référence, défini par une pression de vapeur d'eau de 12 hPa et une légère brise de (0,1 m/s). Dans lequel, le bilan énergétique d'une personne de référence est retenu avec une température cutanée et du noyaux équivalente à celles observées dans des conditions spécifiques (Höppe, 1999).

Le modèle (PET) tire son origine du Modèle de Bilan Énergétique de Munich pour les Individus (MEMI) par Höppe (1999), qui établit l'équation du bilan d'équilibre thermique du corps humain comme suit (**Equation 2.12**) :

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{SW} + S = 0 \quad (2.12)$$

- **M** : le niveau d'activité métabolique,
- **W** : la production d'effort physique,
- **R** : la radiation nette du corps
- **C** : le flux de chaleur convectif,
- **ED** : le flux de chaleur latente pour évaporer l'eau en vapeur d'eau diffusant à travers la peau,
- **ERe** : la somme des flux de chaleur pour chauffer et humidifier l'air inspiré,
- **ESW** : le flux de chaleur dû à l'évaporation de la transpiration,
- **S** : représente les flux de chaleur stockés pour chauffer ou refroidir la masse corporelle.

D'après la revue littérature, la neutralité thermique du (PET) a été ajustée pour s'adapter à différents climats :

- En Europe centrale, la plage de température neutre est comprise entre  $18 < PET < 23^\circ\text{C}$ , comme déterminé par (Matzarakis et al., 1999).
- La zone de confort varié de 26 à 30 °C de (PET) dans le climat chaud et humide de Taïwan, (Lin and Matzarakis, 2008).
- Le climat méditerranéen côtier se caractérise par une plage de température neutre de 20 à 25 °C, (Cohen et al., 2013).

Le PET a été appliqué dans plusieurs climats à travers le monde, les résultats obtenus par simulation ont montré des comparaisons favorables avec les mesures sur site. En conséquence, le PET est approuvé par un référentiel allemand (VDI, 2008). De plus, il est essentiel de noter que l'échelle de stress thermique du PET peut fluctuer en fonction du climat. Dans les cas où l'échelle n'a pas été encore définie, il est nécessaire de valider les simulations en effectuant une investigation sur site et en administrant des questionnaires (Coccolo et al, 2016).

#### **d) Indice de climat thermique universel (UTCI)**

En 1999, la Société Internationale de Biométéorologie (ISB) a créé une Commission intitulée 'Sur le développement d'un Indice de climat thermique universel (UTCI)'. La finalité de ce projet consistait à dériver un indice thermique basé sur le modèle thermo-physiologique le plus avancé. Depuis 2005, ces efforts ont été renforcés par l'Action 730 du COST (Cooperation in Science and Technical Development) européen, qui a mobilisé des experts dans les domaines de la thermo-physiologie, de la modélisation physiologique, et de la climatologie, pour le développement de l'Indice (UTCI). En 2009, l'Action 730 du COST a abouti avec succès, marquant le développement de l'indice l'UTCI (Błażejczyk et al., 2010; Jendritzky et al., 2012).

L'UTCI est basé sur le modèle thermo-physiologique dynamique à plusieurs nœuds '*multi node*' UTCI-Fiala ; ce modèle définit les effets thermiques (actifs et passifs) sur le corps humain (pour l'intégralité du corps ou des parties spécifiques) dans divers climats et il est validé avec des étude de terrain (Fiala et al., 2012).

Le terme '*multi-node*' décrit la capacité du modèle à prédire la réponse locale des entités distinctes du corps humain ; le système passif du modèle '*multi-node*' se compose de 12 éléments corporels englobant au total 187 nœuds. Quant aux réactions thermorégulatrices du système nerveux central sont prédite par le système actif. Les paramètres de référence ont été établies pour les facteurs météorologiques et autres variables y compris, l'activité métabolique et l'isolation thermique des vêtements (Błażejczyk et al., 2013) :

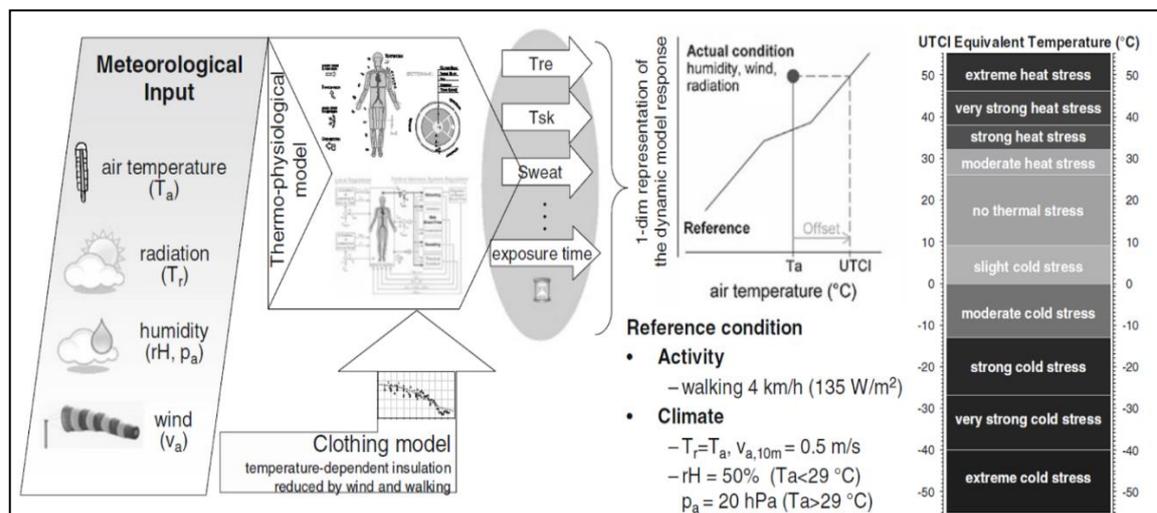
- Une vitesse du vent ( $v_a$ ) de 0,5 m/s pour une hauteur de 10 m et environ (0,3 m/s à une hauteur de 1,1 m).
- Une température radiante moyenne ( $T_{mrt}$ ) équivaut à la température de l'air.
- La pression de vapeur ( $v_p$ ) se rapporte à une humidité relative de 50 %, ainsi sous des températures élevées ( $T_a > 29^\circ\text{C}$ ) l'humidité de référence est maintenue stable à 20 hPa.

- Le taux métabolique est de 2,3 MET, ce qui équivaut à  $135 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pour une activité représentative d'une personne marchant à une vitesse de 4 km/h (1,1 m/s),
- L'isolation globale du vêtement est influencée par l'interaction de l'habillement, de la vitesse de marche et de la vitesse du vent dans un environnement représentatives.

L'objectif de l'indice (UTCI) est de développer une mesure unique qui reflète avec précision la réponse physiologique humaine à la condition thermique réellement définie de manière multidimensionnelle, comme illustré dans la (**Figure 2.9**). L'équation de base pour décrire l'UTCI est la suivante (Bröde et al, 2012a) :

$$UTCI(T_a, T_{mrt}, V_a, p_a) = T_a + offset(T_a, T_{mrt}, V_a, p_a) \quad (2.13)$$

- **T<sub>a</sub>** : représente la température de l'air (°C),
- **T<sub>mrt</sub>** : est la température radiante moyenne (°C),
- **v<sub>a</sub>** : est la vitesse du vent ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- (**p<sub>a</sub>**) : est la pression de vapeur d'eau (hPa),
- **Offset** : est l'écart par rapport à la température de l'air.



**Figure 2. 9.** Concept de l'UTCI dérivé en tant que température équivalente en (°C)

Source : (**Bröde et al, 2012a**)

## 2.6.4 Echelle de perception du stress thermique

Le (**Tableau 2.1**) ci-dessous présente les échelles de perception thermique correspondant aux indices précédemment définis tels que le (PET), le (SET\*) et l'(UTCI).

**Tableau 2.1.** Echelle de perception des indices (PET/SET\*/UTCI).

Source : (Emmanuel, 2016)

PET (°C)	SET* (°C)	UTCI (°C)	Echelle de perception thermique
–	–	<-40	Froid glacial
≤4	–	-40 – -27	Extrêmement froid
4 – 8	10.0 – 14.5	-27 – -13	Très froid
8 – 13	14.5 – 17.5	-13 – 0	Froid
13 – 18	17.5 – 22.2	0 – 9	Légèrement froid
18 – 23	22.2 – 25.6	9 – 26	Neutre
23 – 29	25.6 – 30.0	–	Légèrement chaud
29 – 35	30.0 – 34.5	26 – 32	Chaud
35 – 41	34.5 – 37.5	32 – 38	Très chaud
>41	>37,5	38 – 46	Extrêmement chaud
–	–	>46	Chaleur étouffante

Enfin, Blazejczyk et al. (2012) ont examiné les performances de plusieurs indices thermiques, à la fois rationnels et directs (simples), en analysant des données climatiques provenant de différents types de climat, ils ont démontré que tous les indices rationnels présentent de corrélations significatives entre eux. Néanmoins, les indices directs tels que le (WBGT) et le (HI) n'ont présenté qu'une corrélation faible avec les indicateurs rationnels plus complexes.

En résumé, la caractérisation significative de l'environnement thermique sur le plan thermo-physiologique requiert l'application d'un modèle basé sur le bilan thermique adoptant ainsi l'ensemble des mécanismes d'échange de chaleur.

## Conclusion

L'exploration des échanges thermiques entre l'homme et son environnement a ouvert la voie à la discussion du bien-être thermique en extérieur. Étroitement lié à la perception thermique individuelle, l'environnement thermique dans les espaces extérieurs influence l'usage de ces espaces. L'adaptation thermique, impliquant des facteurs physiologiques, psychologiques et comportementaux, joue également un rôle déterminant dans l'évaluation des environnements thermiques par les usagers.

Dans l'objectif d'évaluer l'environnement thermique en extérieur, de nombreuses recherches ont été menées pour examiner les facteurs climatiques, physiologiques, et

psychologiques qui exercent une influence sur le bien-être thermique individuel. La compilation et l'analyse des indices de confort thermique ont apporté des informations significatives sur les méthodes de calcul et les spécificités de chacun de ces indices, une diversité d'indicateurs a été exposée au cours de notre analyse.

Les indices rationnels sont exprimés en ( $^{\circ}\text{C}$ ), facilitant ainsi leur interprétation par les acteurs impliqués dans des projets urbains, tels que les architectes et les urbanistes. Parmi ces derniers, l'indice (PET) qui est le modèle le plus largement utilisé ayant été examiné dans diverses approches comparatives avec des études de terrain. L'UTCI basé sur le modèle thermo-physiologique le plus avancé, est le seul modèle appliqué à tous les climats, y compris polaires. D'autres indices tels que (OUT\_SET\*) et (SET\*), sont moins détaillés pour les conditions extrêmement froides mais présentent une échelle précise de sensation thermique autour de la zone de confort.

À l'inverse, les indices empiriques (ASV, TSV) décrivent de manière détaillée les sensations thermiques des individus et les facteurs environnementaux qui affectent principalement leur comportement thermique. Cependant, le principal inconvénient de ces modèles simplifiés est qu'ils négligent les échanges d'énergie entre le corps humain et l'environnement.

Finalement, établir une corrélation entre les modèles rationnels et les modèles empiriques s'avère essentiel ; alors que les premiers définissent une approche 'universelle' pour quantifier le confort humain, les seconds ont la capacité de traiter la perception thermique, y compris les préférences thermiques individuelles, en fonction du climat local, et la sensibilité à certains stimuli.

## **CHAPITRE III**

# **TECHNIQUES D'INVESTIGATIONS ET CADRE CONCEPTUEL DE LA PERCEPTION THERMIQUE EXTÉRIEURE**

## **CHAPITRE III : TECHNIQUES D'INVESTIGATIONS ET CADRE CONCEPTUEL DE LA PERCEPTION THERMIQUE EXTERIEURE**

### **3. Introduction**

Au XXe siècle, l'ajustement des indices de confort thermiques était basé sur des expériences en chambres climatiques et des calculs du bilan énergétique (Blazejczyk et al., 2012; Fiala et al., 2012). Ultérieurement, il a fallu de modifier les indices de confort selon les conditions climatiques locales et de les adapter à différentes régions géographiques et en fonction du comportement culturel. Par exemple, la Température Physiologiquement Équivalente (PET) a été introduite par Mayer et Höppe (1987) et ajustée pour l'Europe du Centre sur la base du bilan énergétique par (Matzarakis et al., 1999).

d'après la revue de littérature de (Johansson et al., 2014; Potchter et al., 2018a; Lai et al., 2020), l'évaluation des indices thermiques par la perception subjective est devenue une approche systématique conventionnelle depuis le début du XXIe siècle, dans le but d'estimer le confort thermique humain dans des situations climatiques diverses.

Ce chapitre se divise en trois parties fondamentales. Dans un premier temps, une revue de la littérature est entreprise, explorant les études portant sur la perception thermique en environnement extérieur. L'objectif de cette revue est d'identifier les techniques d'évaluation de la perception thermique humaine, de définir les repères de sensation thermique et les procédures de modification des seuils d'échelle des indices thermiques.

Ensuite, la deuxième partie consiste en une comparaison des approches d'évaluation. L'examen et la compilation des données a été mené de la manière suivante : les techniques et méthodes d'enquête ont été extraites des travaux de recherche. Subséquemment, en fonction de la méthode de calibration utilisée, les seuils des indices les plus couramment utilisés ont été étudiés par rapport aux contextes climatiques.

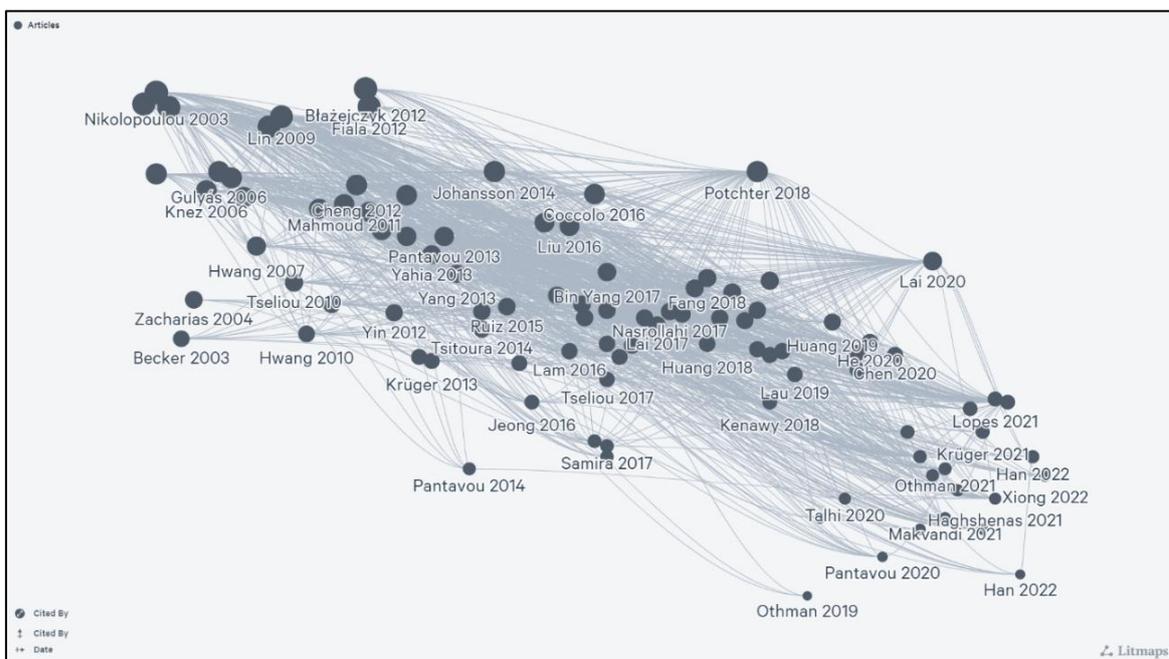
Enfin, la troisième partie propose un protocole de base pour la recherche sur la perception thermique en environnement extérieur, recommandé par (Potchter et al, 2022). Un cadre fondamental pour l'évaluation de la perception thermique est présenté, comprenant plusieurs étapes pour le recueil des facteurs micro-météorologiques, des procédés d'exploitation des données, et des méthodes de modification des indices.

### 3.1 Etudes préliminaires sur la perception thermique en espace urbain

Nous avons réalisé un examen approfondi en recherchant des publications scientifiques dans des bases de données telles que *Google Scholar*, *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *Springer et Wiley*. Les mots-clés utilisés étaient ‘*thermal perception*’ la perception thermique, ‘*outdoor human thermal comfort*’ le confort thermique humain en extérieur, ‘*human thermal index*’ l’indice thermique humain et ‘*thermal sensation scale*’ l’échelle de sensation thermique.

Seules les études combinant les conditions de l’environnement thermique avec les réponses subjectives humaines ont été sélectionnées. Les travaux de recherche se focalisant sur l’évaluation de l’environnement thermique, en s’appuyant sur des indices de confort sans incorporer les données subjectives de perception thermique dérivées des questionnaires et basées sur des mesures microlitiques ont été exclus de notre analyse. Tous les articles utilisant le même ensemble de données pour analyser différents aspects de la perception thermique en extérieur ont été inclus.

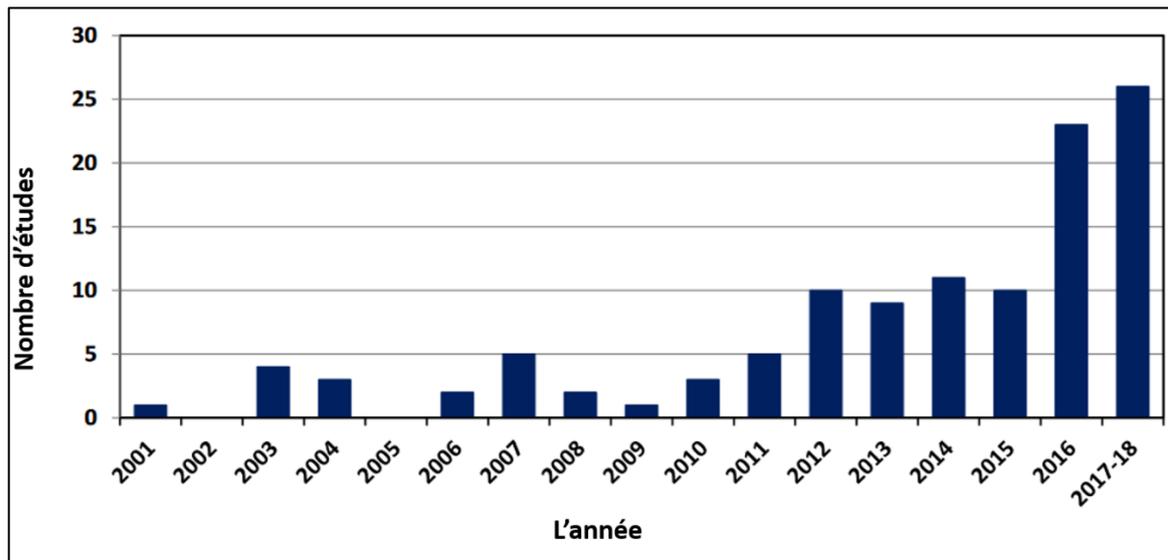
Ensuite, les articles identifiés ont été visualisés à l’aide d’une plateforme de recherche en ligne (Litmaps) pour générer une carte de revue de littérature interactive. Ces cartes présentent une collection d’articles liés à notre sujet de recherche et illustrent les liens entre les différentes études, (**Figure 3.1**).



**Figure 3. 1.** Carte de revue de littérature effectuée depuis 2000-2022

Source : (Litmaps, 2022)

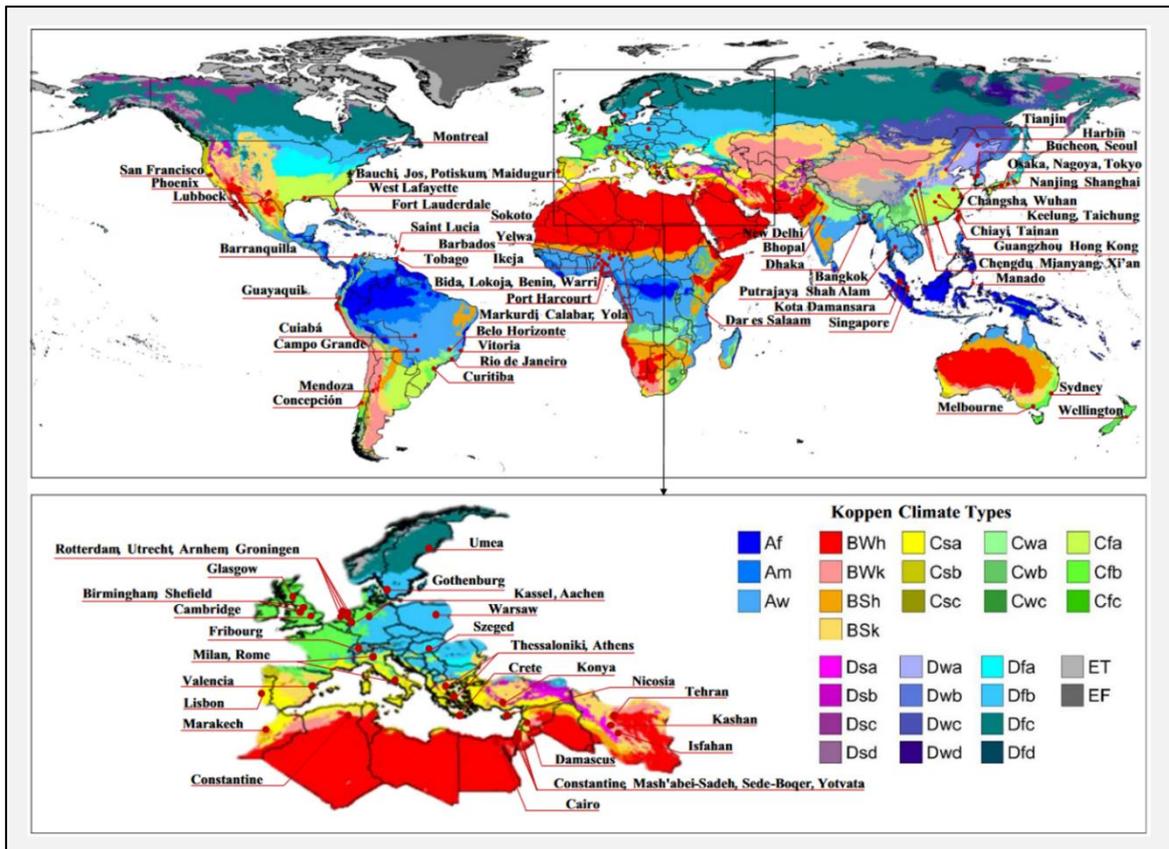
Organiser la recherche par année met en évidence la focalisation et l'intérêt croissant sur l'investigation de la perception thermique humaine en extérieur de 2001 à 2018 (**Figure 3.2**) : jusqu'à 5 études par an ont été menées jusqu'en 2011. À partir de 2012, le nombre annuel d'investigations a multiplié, allant de 9 à 11 études par an jusqu'en 2015. En 2016, il y a eu une augmentation significative avec 24 nouvelles recherches. En 2017, montre que cette tendance se poursuit avec 23 nouvelles études (Potchter et al., 2018b).



**Figure 3. 2.** Evolution du nombre d'études sur la perception thermique extérieure entre 2001-2018 (nombre d'études 115). Source : (**Potchter et al, 2018**)

Les articles examinés ont été réalisés dans différentes régions climatiques à travers le monde, en utilisant différentes méthodes pour la collecte des données. Ces études ont appliqué divers techniques d'interprétation des données, identifiant ainsi les facteurs qui influencent la perception thermique en extérieur.

Les chercheurs ont étudié la perception thermique en extérieur dans diverses villes situées dans différentes zones climatiques. La **Figure 3.3** illustre ces villes sur une carte mondiale basée sur la classification climatique de Köppen-Geiger. Des études ont été menées dans 107 villes sur tous les continents, à l'exception de l'Antarctique. Parmi celles-ci, 42 étaient en Asie et 22 en Europe. Bien que les villes comprennent 20 en Afrique, 16 d'entre elles étaient au Nigeria, comme l'ont étudié (Eludoyin and Adelekan, 2013).



**Figure 3.3.** Études sur la perception thermique extérieure menée dans diverses villes basée sur la classification climatique de Köppen-Geiger. Source : (Lai et al., 2020)

Plusieurs villes ont fait l'objet de plusieurs enquêtes dans diverses études. Par exemple, Taichung, Taïwan, a été étudiée dans 6 projets de recherche différents (Hwang and Lin, 2007; Hwang et al., 2010; Lin, 2009; Lin et al., 2011, 2013; Tung et al., 2014). Athènes, Grèce, dans 5 études (Nikolopoulou and Lykoudis, 2006; Tseliou et al., 2010; Pantavou et al., 2013a, 2014; Tseliou et al., 2017), et Hong Kong, en Chine, dans 5 études (Cheng et al., 2012; Cheung and Jim, 2018; Huang et al., 2017; Li et al., 2018; Lau et al., 2019). La vaste recherche thermique en extérieur menée démontre sa signification et son importance à l'échelle mondiale.

Enfin, l'analyse des publications a permis d'identifier les techniques de collecte de données, les stratégies d'enquête de terrain, les méthodes pour déterminer la plage thermique neutre, et les procédures de calibration de l'échelle des indices thermiques les plus utilisés. C'est ce que nous allons développer plus en détail dans la partie qui suit.

### 3.2 Variété des procédures dans la collecte des données météorologiques

La synthèse des recherches relatives à l'évaluation de la perception thermique en espace urbain a souligné la diversité des méthodes de recueil de données micro-météorologiques. Cela inclut la variété dans la saison d'investigation, la durée de mesure, le choix de sites, et les outils de mesure, comme indiqué dans le (Tableau 3.1).

**Tableau 3.1.** Procédures de collecte de données météorologiques issues de diverses études

Source : (Auteur, 2022)

Auteurs	Ville et zone climatique	Saison	Site d'investigation	Outils de mesure	Durée
Lin and Matzarakis, 2008	Sun Moon Lake, Taiwan (Cwa)	Tout les saisons	–	Office centrale de météorologie (MOTC)	–
da Silva and de Alvarez, 2015	Vitoria, Brazil (Af)	Hiver, printemps et été	11 canyons urbains	Portable HOBO mini station météorologique	11:00 – 13:30
Elnabawi et al., 2016	Caire, Egypte (BWh)	Hiver et été	1 Canyon urbain	Davis Vantage Vue 6250 et kestrel heat stress tracker 4400	8:00 – 10:00 13:00 – 17:00 18:00 – 19:00
Shoostarian and Rajagopalan, 2017	Melbourne, Australie (Cfb)	Printemps, été et automne	3 espaces ouverts dans campus universitaire	station météorologique portable mini Testo 480 IAQ Pro	10:00 – 17:00
Lam et al., 2018	Melbourne, Australie (Cfb)	Été	Jardins Botaniques	4 Campbell station et 1 Kestrel Heat Stress Tracker 4400	10:00 – 15:00
Zhang et al, 2021	Xi'an, China (BSk) et (Cwa)	–	6 espaces ouverts dans un campus universitaire	HOBO, Kestrel 5500, Delta OHM HD 2107.2	–
Xiong & He, 2022	Chongqing, China (Cfa)	Hiver	2 rues piétonnes	Testo 174H, Delta HD 2103.2, TM-188D	–

#### 3.2.1 Saison d'investigation

Certaines études ne couvrent pas les conditions thermiques saisonnières, plus précisément, ils omettent de tenir compte de l'influence notable de certaines saisons, comme l'hiver dans les climats froids. Pour étayer ce point, l'étude de (Yang et al., 2017) menée dans un climat subarctique, en Suède, visait à comprendre la relation entre le microclimat, l'utilisation des parcs et le schéma comportemental dans la période chaude de l'été. Des analyses de comportement, des enquêtes structurées, et des mesures microclimatiques ont été effectuées en juillet et août 2015.

D'autres études se sont concentrées sur une saison spécifique, par exemple la saison froide (Xiong and He, 2022), ou la saison chaude (Yin et al., 2012; Louafi et al., 2017; Johansson et al., 2018; Sayad and Alkama, 2021), (Tableau 3.1). L'étude de Xiong et He, (2022), a mené une investigation empirique à l'aide de mesures microclimatiques et

d'enquêtes par questionnaire pour saisir les sensations thermiques et le confort des personnes pendant l'hiver froid et humide à Chongqing, en Chine. Alors que l'objectif de l'étude de Yin et al (2013), était d'interpréter les niveaux de confort et les appréciations des enquêtés sur les facteurs climatiques, et par la suite identifier les causes de la variabilité de la réponse subjective au confort thermique en été à Nanjing, en Chine.

Cependant, ces recherches (Elnabawi et al., 2016; Mahmoud, 2011; Yahia and Johansson, 2013) ont été menées dans deux conditions climatiques différentes, été et hiver. Elnabawi et al, (2016), a examiné la perception de l'environnement thermique des usagers dans une rue urbaine au Caire, en Égypte caractérisée par un climat chaud et aride. À l'aide de sondages subjectifs par l'enquête et une semaine de mesures sur le terrain dans les deux saisons.

L'étude de Yahia et Johansson, (2013), avait deux objectifs, le premier était d'évaluer la performance de divers indices thermiques en examinant pendant l'été et l'hiver différents espaces urbains à Damas en Syrie. Le deuxième objectif était de définir les limites inférieures et supérieures de la zone de confort thermique pour certains indices (PET, SET\*). L'étude reposait sur des mesures micro-météorologiques approfondies combinées à des questionnaires.

D'autres investigations ont également porté sur l'évaluation de la sensation thermique et du confort en extérieur sur une année complète englobant les différentes fluctuations saisonnières. Dans les régions de froid intense à Harbin, en Chine par une enquête longitudinale (Chen et al., 2018), et dans la région méditerranéenne à travers une enquête de terrain transversale menée à Rome, en Italie (Salata et al., 2016a).

### **3.2.2 Durée et temps de mesure**

La durée et le temps de mesure varient d'une étude à l'autre, la plupart des recherches ont une durée de plusieurs heures pendant la journée, certaines se concentrant uniquement sur les heures du matin et de midi (da Silva and de Alvarez, 2015). Cette étude visait à évaluer l'impact de la ventilation sur le confort thermique des piétons dans une région côtière de la ville de Vitória en Brésil, caractérisée par un climat chaud et humide. L'enquête de terrain couvrait six jours de mesures où les données climatiques ont été collectées à midi en hiver et à 11 heures du matin pendant le printemps et l'été pour garantir une similitude temporelle. La durée de mesure a suivi deux critères de sélection : le nombre de personnes dans les espaces étudiés et la trajectoire solaire.

Cependant, un nombre limité d'investigations (Becker et al., 2003; Cohen et al., 2013) ont continué pendant plusieurs jours consécutifs, couvrant une période complète de 24 heures. L'étude de Cohen et al. (2013) a mené une enquête pendant les étés et hivers de 2007 à 2011, explorant les espaces urbains extérieurs dans un climat méditerranéen. Les stations météorologiques ont enregistré les données empiriques des différentes variables climatiques pendant 24 heures, accompagnées de questionnaires subjectifs sur la perception thermique.

### 3.2.3 Site d'investigation et outils de surveillance

En ce qui concerne la sélection du site d'investigation, plusieurs études ont examiné certains types d'environnements extérieurs urbains tels que les parcs (Ali and Patnaik, 2018; Mahmoud, 2011), les places (Lin, 2009), les campus universitaires (Shooshtarian and Ridley, 2017), ou les canyons urbains (Elnabawi et al., 2016).

Les outils de surveillance varient également d'une étude à l'autre. Certaines recherches ont appliqué des données provenant de stations de surveillance officielles à proximité du site d'étude, comme démontré dans le travail de (Lin et Matzarakis, 2008). La méthode prédominante dans de nombreuses investigations implique l'utilisation de données de stations météorologiques fixes. Cependant, ces recherches utilisent des instruments avec des qualités de capteurs divers, englobant des caractéristiques techniques spécifiques à savoir, l'état de calibration, la résolution, et les valeurs de seuils de mesure. Des exemples de tels instruments incluent Campbell, comme expliqué dans les travaux de (Cohen et al., 2013; Johansson et al., 2018), HOBO (Krüger et al., 2020), et la station Davis Vantage Vue 6250 (Elnabawi et al., 2016), (**Tableau, 3.1**).

De plus, un ensemble d'études a adopté une combinaison de stations météorologiques (**Tableau 3.1**), fusionnant des données provenant de Campbell avec le Kestrel Heat Stress Tracker 4400, comme illustré dans la recherche menée par (Lam et al., 2018). Une autre approche combine l'utilisation de HOBO pour la température de l'air et l'humidité relative, Kestrel 5500 pour la vitesse du vent, et Delta OHM HD 2107.2 pour la température du globe, Tel que observé dans les travaux de recherche de (He et al., 2020), et Zhang et al. (2021). Ou bien le recours au Testo 174H pour quantifier la température de l'air et humidité relative, le Delta HD2103.2 pour recorder la vitesse du vent, et TM-188D pour estimer la température du globe tel qu'effectué dans l'étude de (Xiong & He, 2022).

### 3.3 Diversité des stratégies d'enquête sur le terrain

De manière similaire aux mesures micro-météorologiques, une étude préliminaire des études de terrain a montré une grande variation dans la conception des questionnaires et les échelles d'évaluation des questionnaires, les populations cibles, les méthodes d'échantillonnage et la taille de l'échantillon. Alors que toutes les études ont recueilli des informations personnelles telles que l'âge, le sexe, le type de vêtements et l'activité métabolique, d'autres études de Curitiba (Bröde et al., 2012; Krüger and Rossi, 2011) ont recueilli des données sur la masse corporelle (taille et poids) pour calculer l'indice thermique (UTCI).

#### 3.3.1 Echelle d'évaluation de la perception thermique

D'après (McIntyre, 1980), le protocole pour examiner la perception thermique humaine en extérieur est basé sur des questionnaires d'entretien structurés de la norme ASHRAE 55 (1992), initialement conçus pour l'environnement intérieur dans le but de correspondre à l'échelle de 7 points du (PMV).

Cependant (Liu et al., 2020), ont indiqué que cette échelle descriptive unidimensionnelle a été initialement développée pour des évaluations en intérieur et présente donc certaines lacunes dans les environnements extérieurs. L'échelle ne contient aucune information affective et néglige les flux dynamiques du vent et du rayonnement solaire en extérieur.

La norme ISO 10551 (2019), principalement destinée aux environnements de travail, propose cinq échelles de jugement subjectif pour décrire l'état thermique d'une personne, notamment la perception thermique, le confort thermique (évaluation affective), la préférence thermique, l'acceptabilité thermique. La norme ASHRAE 55 (2010), inclut des échelles pour la perception thermique et l'acceptabilité thermique. Le (**Tableau 3.2**) présente les échelles de jugement utilisées dans la norme ISO : 10551 (2019) et la norme ASHRAE 55 (2010).

Conformément à l'étude de Johansson et al, (2014), différentes échelles de perception thermique ont été appliquées. L'échelle de 7 points de l'ASHRAE 55 est la plus couramment utilisée, suivie par une échelle de 9 points, et d'une échelle de 5 points. La dernière échelle comprenait généralement des alternatives de réponses telles que (très froid, froid, neutre, chaud et très chaud).

**Tableau 3.2.** Evaluation de la perception subjective de l'environnement thermique

Source : (Johansson et al, 2014) adapté par l'auteur

Paramètre de l'état thermique	Standard	Question posé	Echelle de mesure
Perception thermique	ISO : 10551 (2019)	<i>'How are you feeling now?'</i>  Fr : Comment vous sentez-vous maintenant ?	<u>Échelle de 7 points</u> : froid (-3), frais (-2), légèrement frais (-1), neutre (0), légèrement chaud (+1), chaud (+2) et très chaud (+3)  ou <u>Échelle de 9 points</u> : avec 'Très froid' (-4) et 'Très chaud' (+4) (principalement utilisée dans des environnements extrêmes).
	ASHRAE 55 (2010)	<i>'What is your general thermal sensation?'</i>  Fr : Quelle est votre sensation thermique générale ?	Échelle de perception thermique symétrique de 7 points (formulée de la même manière que l'ISO 10551) (souvent appelée échelle ASHRAE de 7 points)
Confort thermique (évaluation affective)	ISO : 10551 (2019)	<i>'Do you find this environment...?'</i>  Fr : Trouvez-vous cet environnement... ?"	<u>Échelle de 4 points</u> : confortable (0) comme point de départ suivi de légèrement inconfortable (1), inconfortable (2), très inconfortable (3) ;  <u>Échelle de 5 points</u> : le point extrêmement inconfortable (4) est rajouté à l'échelle de 4 points
Préférence thermique	ISO : 10551 (2019)	<i>'Please state how you would prefer it to be now'</i>  Fr : "Veuillez indiquer Svp comment vous préféreriez d'être maintenant."	<u>Échelle de 7 points</u> : beaucoup plus frais (-3), plus frais (-2), légèrement plus frais (-1), ni plus chaud ni plus froid (0), un peu plus chaud (+1), plus chaud (+2) et beaucoup plus chaud (+3)

	McIntyre (1980)	<i>'Would like it to be ...?'</i>  Fr : "Souhaiteriez-vous que cela soit...?"	<u>Échelle de 3 points</u> : plus frais (1), pas de changement (0) et plus chaud (+1).
<b>Acceptabilité thermique</b>	ISO : 10551 (2019)	<i>'On a personal level, this environment is for me ...'</i>  Fr : 'Sur un plan personnel, cet environnement est pour moi...'	<u>Déclaration à deux catégories</u> : acceptable plutôt que inacceptable (0) et inacceptable plutôt que acceptable (1).
<b>Satisfaction thermique</b>	ASHRAE 55 (2010)	<i>'How satisfied are you with the temperature in your space?'</i>  Fr : À quel point êtes-vous satisfait(e) de la température dans votre espace ?	<u>Échelle de 7 points</u> : très satisfait (+3) et très insatisfait (-3) avec neutre (0) au milieu

Plusieurs recherches ont utilisé l'échelle de 7 points de l'ASHRAE tout en employant l'indice (PET) pour évaluer le stress thermique à travers neuf catégories par exemple, (Canan et al., 2019; da Silva and de Alvarez, 2015; Ouis et al., 2023; Salata et al., 2016b; Shoostarian and Ridley, 2016a).

Dans certains cas, les chercheurs ont utilisé soit l'échelle en 7 points, soit celle de 9 points de l'ASHRAE pour évaluer (SET\*/OUT\_SET\*), qui comprend 8 catégories de stress thermique (Gobo et al., 2018; Hwang and Lin, 2007; Lin et al., 2011; Pantavou et al., 2013b). De même, pour l'UTCI, qui englobe 10 catégories de stress, les chercheurs ont utilisé la même échelle (Hadianpour et al., 2018; Krüger et al., 2020; Pantavou et al., 2013b; Xu et al., 2018).

diverses recherches ont utilisé une échelle en 5 points pour ajuster les catégories d'indices de stress thermique telles que le (PMV), 8 catégories comme (OUT\_SET\*), ou 9 catégories comme le PET (Ruiz and Correa, 2015; Tsitoura et al., 2014).

Dans une étude récente menée par (Chen et al., 2020), les chercheurs ont utilisé un questionnaire à échelle de 11 points. Cependant, ils ont apporté des modifications à l'échelle

en élargissant le nombre de catégories de stress à 10 pour le (PET) (au lieu des 9 catégories originales) et à 10 catégories pour (SET\*) (au lieu des 8 catégories originales).

A part la température, d'autres recherches (Wang et al., 2017; Yang et al., 2013; Ouis and Benhassine, 2022) ont inclus la perception de diverses variables micro-météorologiques, à savoir le vent, l'humidité et la radiation solaire. Johansson et al, (2014), mettaient en évidence dans leurs revues de littérature que plus de la moitié des recherches sur la perception thermique incluaient une question sur les aspirations liées aux facteurs du microclimat de type : « *Comment préféreriez-vous être maintenant ?* ».

La variable la plus couramment revendiquée était la température, mais l'évaluation des variables telles que le vent, le rayonnement solaire et l'humidité était également sollicitée. Tel qu'expliqué précédemment, différentes échelles ont été utilisées dans ces études, avec la prédominance d'une échelle de 3 points communément appelée échelle McIntyre, pour l'analyse des aspirations liées au microclimat (**Tableau 3.2**).

### **3.3.2 Adaptation physiologique et psychologique**

Plusieurs études telles que (Huang et al., 2019; Katzschner, 2006; Knez and Thorsson, 2006; Lin, 2009; Makvandi et al., 2021; Nikolopoulou, 2004; Nikolopoulou and Steemers, 2003; Spagnolo and de Dear, 2003) ont intégré des questions axées sur les mécanismes psychologiques impliqués dans l'évaluation de l'adaptation thermique en espace urbain. La majorité des enquêtes transversales comportaient une question concernant l'histoire thermique à court terme du sujet, généralement pour savoir où le sujet avait été dans la dernière demi-heure avant l'enquête de terrain.

D'autre part, diverses études (Pantavou et al., 2013a; Wang et al., 2017; Lopes et al., 2021) ont également interrogé les sujets sur la durée de résidence afin d'identifier ceux qui n'étaient pas adaptés physiquement et psychologiquement aux conditions climatiques locales. Par ailleurs, la majorité des études telles que (Lin, 2009; Elnabawi et al., 2016; Johansson et al., 2018) ont posé une question sur la raison de la visite (motifs de visite) du site étudié, afin de distinguer entre ceux qui ont été simplement de passage et ceux qui ont de raisons préalables (socialisation, détente), et identifier par la suite l'effet de contrôle perçus sur la perception thermique des individus.

### 3.3.3 Population ciblé et méthodes d'échantillonnage

Plusieurs études ont indiqué qu'un groupe de personnes peut percevoir différemment les conditions thermiques de leur environnement. Par exemple, les touristes peuvent le percevoir différemment des résidents locaux (Lam et al., 2018; Lopes et al., 2021), les résidents temporaires peuvent avoir des perceptions différentes des résidents locaux natifs (Wang et al., 2017; He et al., 2020), et les immigrants peuvent le percevoir différemment des personnes nées dans le pays (Shooshtarian and Ridley, 2016b; Kenawy and Elkadi, 2018). Par conséquent, il est impératif d'intégrer des critères tels que l'origine de naissance, l'ethnie, le contexte culturel et l'histoire thermique dans les questionnaires.

Deux méthodes d'échantillonnage sont couramment utilisées dans les études de perception thermique ; la méthode longitudinale et la méthode transversale. L'approche longitudinale repose sur la facilité d'échantillonnage, où un groupe de sujets est exposé de manière constante à l'environnement thermique. Ces sujets dans les études de (Becker et al., 2003; Bröde et al., 2012; Cheng et al., 2012), fournissent leurs appréciations à des intervalles de temps constants tout au long de la période d'enquête, générant ainsi un grand nombre de votes. L'approche transversale utilisée dans les recherches de (Nikolopoulou et al., 2001; Spagnolo and de Dear, 2003; Lin and Matzarakis, 2008) s'appuie sur un échantillonnage aléatoire, où les usagers des espaces extérieurs sont interviewés une seule fois pendant la période d'enquête.

L'avantage de l'approche longitudinale est qu'elle offre un meilleur contrôle du groupe démographique étudié de point de vue de l'âge, sexe, type d'habillement, type d'activité physique, et de l'expérience thermique à court terme des sujets. Les inconvénients incluent le nombre limité et l'homogénéité des sujets, qui ne représentent pas nécessairement la population. De plus, les sujets peuvent développer un biais envers les résultats de recherche attendus (Knez and Thorsson, 2006).

L'avantage de l'approche transversale est la taille importante de l'échantillon, acquiesçant ainsi des résultats représentatifs de l'ensemble de la population. L'inconvénient réside notamment dans la difficulté de contrôler l'activité métabolique, l'âge et l'histoire thermique, ainsi que la disponibilité des sujets pendant la période d'enquête (Salata et al., 2016 ; He et al., 2020).

La taille de l'échantillon est conditionnée par la méthode utilisée ainsi que de la population spécifique examinée. L'analyse des articles cités ultérieurement indique que l'approche longitudinale est associée à une taille d'échantillon relativement restreinte, allant

de 6 à 40 individus, tandis que la méthode transversale implique des échantillons plus larges, couvrant une dizaine à des milliers de sujets (Potchter et al., 2018b).

Afin d'atteindre un niveau souhaité de précision il est primordial de veiller à ce que le nombre des participants est suffisamment grand, également l'échantillon doit refléter l'ensemble de la population ciblée. Le nombre de participants dans l'échantillonnage peut être estimé en fonction de la densité démographique, de la marge d'erreur statistique et de la répartition des réponses.

Les tailles d'échantillon acceptables pour les grandes populations se situent souvent dans la fourchette de 400 à 500 personnes. Cependant, d'autres facteurs tels que l'obtention d'une représentation équilibrée de l'âge et du sexe, ainsi que la répartition des enquêtés dans le temps pour tenir compte des fluctuations saisonnières, semblent être plus importants (Johansson et al., 2014).

### **3.4 Comparaison des approches et techniques d'évaluation**

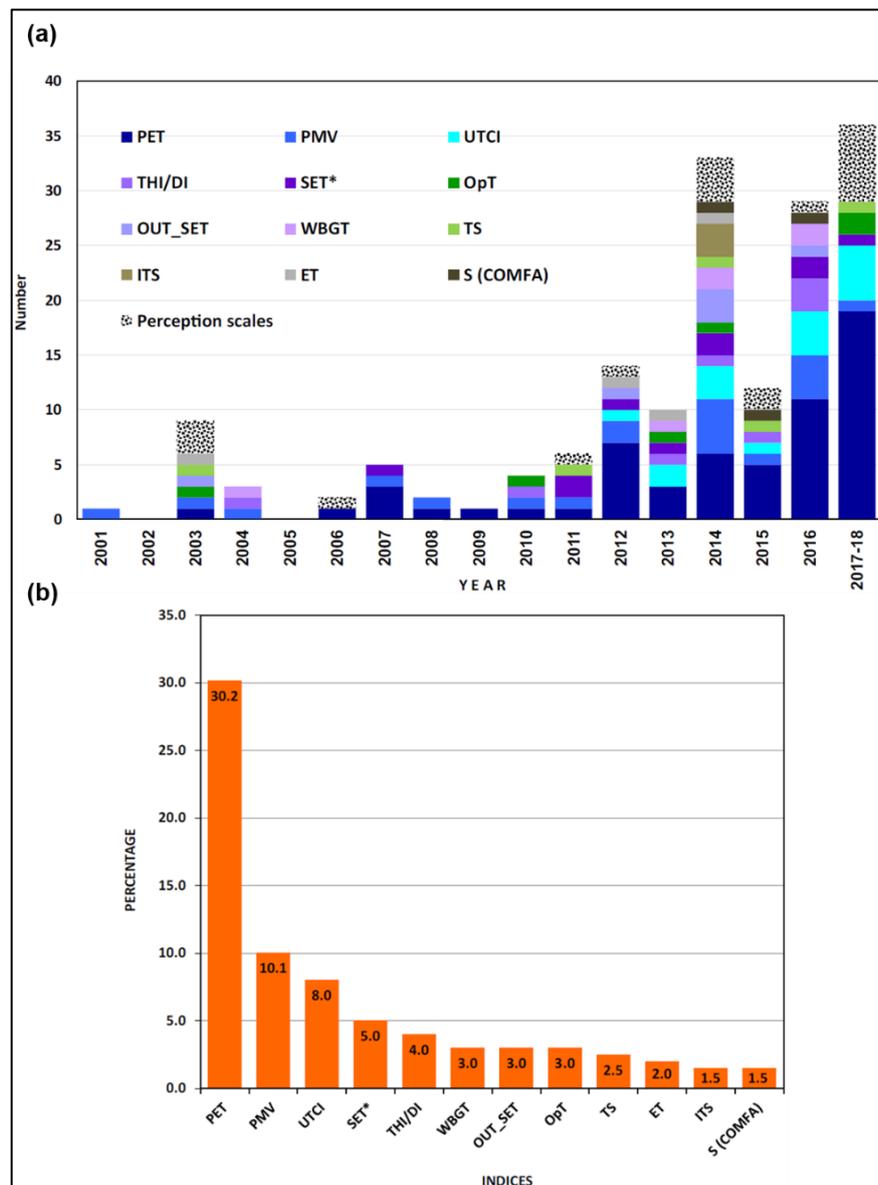
#### **3.4.1 Surabondance d'indice thermique**

Les études antérieures ont indiqué que parmi les 165 indices thermiques humains existants, seuls quelques-uns étaient initialement destinés à évaluer la perception thermique en extérieur et a été jugé adapté à cette fin (Blazejczyk et al., 2012; Johansson et al., 2014; Potchter et al., 2018a). Potchter et al. (2022) ont analysé 194 articles publiés entre 2001 et 2021 dans leur revue systématique de littérature. L'objectif de ces articles était d'étudier la relation entre l'environnement thermique et la perception thermique des individus, la recherche a révélé un total de 295 études de cas qui ont utilisé 59 indices différents.

De plus, l'analyse précédente de (Potchter et al, 2018) des indices utilisés pour évaluer les enquêtes thermiques subjectives dans les études en extérieur de 2001 à 2017 a révélé les conclusions suivantes :

- Le (PMV) a été le premier indice utilisé dans ces recherches, et depuis 2003, divers indices sont utilisés pour l'évaluation de la perception thermique humaine, comme indiqué dans la **Figure 3.4 (a)**.
- L'indice (PET) a été initialement utilisé pour évaluer la perception thermique en 2003. À partir de 2006, il est régulièrement utilisé, augmentant en fréquence

d'utilisation, et en 2012, il est devenu l'indice prédominant en pratique, comme indiqué dans la **Figure 3.4 (a)**.



**Figure 3. 4.** Fréquence des types d'indices thermiques utilisés dans les études de cas examinées.

Source : (Potchter et al, 2018)

- L'indice (UTCI) a été introduit pour la première fois en 2012 et est utilisé de manière continue depuis, témoignant d'une fréquence d'utilisation en constante augmentation, comme illustré dans la **Figure 3.4 (a)**.
- Une analyse de la fréquence des différents types d'indices thermiques employés dans les études examinées révèle que 12 indices ont été utilisés trois fois ou plus, constituant ainsi 72% du total des études de cas, **Figure 3.4 (b)**.

- D'après la (**Figure 3.4 (b)**), les trois indices les plus utilisés (PET, PMV et UTCI) représentent 48,2% de tous les cas d'études. L'UTCI a été utilisé dans 8 % des recherches, le PMV dans 10,1 % des études examinées et l'indice PET dans 30,2 % des études.

En somme, le (PET), le (PMV) et l'(UTCI) sont les trois indices les plus fréquemment utilisés (**Figure 3.4**). Ils partagent des caractéristiques similaires, notamment leur universalité pour évaluer les conditions thermiques dans des climats froids et chauds. De plus, ils incluent une large fourchette de sensations thermiques ou de niveaux de stress thermique qui sont classés en 7 à 10 échelles.

Quant aux indices restants, à savoir (SET\*), (WBGT), et (OUT\_SET\*), ils trouvent principalement leur application dans des zones chaudes et couvrent un spectre limité de sensations thermiques de 4 ou 5 points, allant du froid au confortable à très chaud.

### 3.4.2 Absence d'uniformité dans la détermination de la « plage de confort »

L'examen des recherches indique que multiples méthodes ont été utilisées pour modifier et déterminer la plage du confort thermique humain (**Tableau 3.3**). Deux méthodes principales se distinguent : la première consiste à déterminer la plage de confort annuelle de manière indépendante, tandis que la seconde consiste à définir la plage de confort en tant que composante dans la modification de l'échelle globale de l'indice.

Vingt-sept des cas d'études examinées ont ajusté la 'plage de confort thermique' pour concéder au climat spécifique de la région, en utilisant différentes méthodes telles que la régression linéaire, la régression multiple, la régression logistique ordinaire, la régression cubique, le pourcentage de plage d'acceptabilité thermique, l'analyse probit, la méthode discriminante linéaire et la fréquence relative de la sensation thermique (**Tableau 3.3**).

La méthode de la régression linéaire s'appuie sur l'application de Vote Moyen de Sensation Thermique (MTSV) des questionnés, pour évaluer sur une plage de  $\pm 1$ , ou des échelles supplémentaires de  $\pm 0,85$  et  $\pm 0,5$  (**Tableau 3.3**). Parallèlement, les techniques basées sur la plage d'acceptabilité thermique se basent sur des pourcentages changeant de 80% à 90%, avec des ajouts de 5% (soit 80%, 85%, et 90%).

Un total de huit (08) approche distinctes a été recensé pour définir la plage de confort, avec certaines études utilisant deux indices ou plus, comme indiqué dans (**Tableau 3.3**). Parmi celles-ci, vingt-deux (22) études ont défini la plage « neutre » du (PET), tandis que onze (11) ont déterminé la plage 'pas de stress thermique' de l'(UTCI), et cinq (05) se sont

basées sur la plage ‘confortable’ du (SET\*/OUT\_SET\*). Cette diversité d'approches pour déterminer la « plage de confort thermique humain » introduit des complexités lors de la comparaison des résultats.

**Tableau 3.3.** Identification de la ‘plage de confort’ des indices de confort par multiples méthodes

Source : (Auteur, 2022)

Type de méthode	Location	Détermination de la plage de confort et référence		
		PET	UTCI	SET*/OUT_SET*
<b>Ajustement de régression linéaire entre <math>-0,5 \leq TSV \leq +0,5</math></b>	Glasgow, Royaume-Uni	Krüger et al, 2013		
	Athènes, Grèce		Pantavou et al, 2014	
	Crète, Grèce	Tsitoura et al, 2014		Tsitoura et al, 2014
	Rome, Italie	Salata et al, 2016		
	Séoul, Corée			Jeong et al, 2016
	Dar es Salaam, Tanzanie	Ndetto et Matzarakis, 2017		
	Téhéran, Iran	Hadianpour et al, 2018	Hadianpour et al, 2018	
	Konya, Turquie	Canan et al, 2019		
	Xi'an, Chine	Mi et al, 2020	He et al, 2020	
	Curitiba, Brésil		Krüger et al, 2020	
	Kuala Lumpur, Malaisie	Othman et al, 2021		
Harbin, Chine	Chen et al, 2020	Chen et al, 2020	Chen et al, 2020	
<b>Régression linéaire multiple</b>	Santa Maria, Brésil	Gobo et al, 2018		Gobo et al, 2018
<b>Régression Logistique Ordinale</b>	Belo Horizonte, Brésil Kassel/Fribourg, Allemagne	da Silveira Hirashima et al, 2018		
<b>Régression Cubique</b>	Athènes, Grèce		Pantavou et al, 2013	
<b>90% d'acceptabilité</b>	Taichung, Taiwan	Lin, 2009		

	Damas, Syrie	Yahia & Johansson, 2013		Yahia & Johansson, 2013
	Le Caire, Égypte	Elnabawi et al, 2016		
	Guangzhou, Chine	Li et al, 2016		
	Melbourne, Australie	Kenawy & Elkadi, 2018		
	Xi'an, Chine	Mi et al, 2020		
<b>85% d'acceptabilité</b>	Athènes, Grèce		Pantavou et al, 2014	
<b>80% d'acceptabilité</b>	Xi'an, Chine		Xu et al, 2018	
	Xi'an, Chine		He et al, 2020	
	Athènes, Grèce	Pantavou et al, 2020		
<b>Analyse Probit à 50%</b>	Sydney, Australie	Spagnolo & de Dear, 2003		
	Athènes, Grèce		Pantavou et al, 2014	
	Harbin, Chine	Chen et al, 2020	Chen et al, 2020	
<b>Analyse discriminante linéaire</b>	Harbin, Chine	Chen et al, 2018		
<b>Fréquence relative de la sensation thermique</b>	Vitoria, Brésil	da Silva & de Alvarez, 2015		

### 3.4.3 Variabilité des méthodes dans la calibration d'indice thermo-physiologique

Matzarakis et al. (1999) ont noté que des altérations dans l'environnement thermique ou les processus physiologiques peuvent conduire à une adaptation thermique, entraînant ainsi la nécessité d'ajustements de l'échelle d'origine du (PET). En 2008, Lin et Matzarakis ont modifié pour la première fois l'échelle (PET) afin de l'adapter au climat subtropical du lac Sun Moon à Taïwan, en utilisant des questionnaires de sensation thermique basés sur l'échelle ASHRAE 55 (1995). Par la suite, plusieurs études (Tsitoura et al., 2014; Kenawy and Elkadi, 2018; Canan et al., 2020; Shooshtarian and Rajagopalan, 2019; Chen et al., 2020; Gobo et al., 2018; Hirashima et al., 2018; Mi et al., 2020) ont également calibrer l'échelle

(PET) pour s'adapter à diverses régions climatiques en employant six méthodes différentes ; pour de plus amples détails, (**Tableau 3.4**).

Trois cas ont utilisé la plage d'acceptabilité thermique basés sur un questionnaire à échelle de 7 points, deux cas ont fait une calibration annuelle de l'indice (PET) (Lin et Matzarakis, 2008 ; Kenawy & Elkadi, 2018), (**Tableau 3.4**). Dans certains cas, les chercheurs ont omis certaines catégories de stress thermique par exemple (Canan et al, 2020), tandis que d'autres ont choisi de ne pas attribuer d'échelles aux catégories de stress extrêmes telles que « très chaud » et « très froid » par exemple (Tsitoura et al, 2014). De plus, d'autres méthodes étaient basées sur un questionnaire à échelle de 11 points telles que ; l'analyse discriminante (Chen et al, 2020), et l'analyse probit (Yin et al., 2021), ou l'indice thermique était complètement modifié pour le climat continental avec hiver froid et sec pour la ville de Harbin en Chine, (**Tableau 3.4**).

L'UTCI, proposé initialement par Błażejczyk et al. (2010), vise à prévoir les perceptions thermo-physiologiques typiques vécues par les humains dans diverses circonstances climatiques. En 2013, Pantavou et al, ont adapté initialement l'échelle de l'UTCI au climat méditerranéen spécifique d'Athènes, en Grèce. Consécutivement, de multiples recherches (Chen et al., 2020; He et al., 2020; Krüger et al., 2020; Pantavou et al., 2014; Xu et al., 2018).

**Tableau 3.4. PETS modifiés pour diverses zones climatiques selon les méthodes de calibration**  
Source : (Auteur, 2022)

PET modifiées pour diverses zones climatiques												
Méthode de calibration	plage d'acceptabilité thermique			Régression linéaire			Régression multiple	Régression ordinale		Analyse probit	Analyse discriminante	Fréquence de la sensation thermique
Site	Sun Moon Lake	Melbourne, Australie	Athènes, Grèce	Crète, Grèce	Konya, Turquie	Harbin, Chine	Santa Maria	Kassel/Fribourg, Allemagne	Belo Horizonte, Brésil	Harbin, Chine	Harbin, Chine	Vitoria, Brésil
Climat	Cwa/Cwb	Cfb	Csa	Csa	BSk	Dwa	Cfa	Cfb	AW	Dwa	Dwa	Af
Référence	Lin & Matzarakis, 2008	Kenawy & Alkadi, 2018	Pantavou et al, 2020	Tsitoura et al, 2014	Canan et al, 2020	Chen et al, 2020	Gobo et al, 2018	da Silveira Hirashima et al, 2018	da Silveira Hirashima et al, 2018	Yin et al, 2021	Chen et al, 2020	Da Silva & De Alvarez, 2015
Echelle de TSV	7	7	7	5	7	11	7	7	7	11	11	7
Très froid	< 14	< 5	–	–	< -5,6	< -34.8	–	8	–	< -17	-10	–
Froid	14 - 18	5 - 10	<-0.7	–	-5.6 – 6.2	-34.8 ; -19.8	<5	8 – 13	<12	-17 ; 2	-10 ; -4	18 – 20
Frais	18 - 22	10 – 15	-0.7 – 5.2	<10	6.2– 17.9	-19.8 ; -4	5 – 11	–	12 – 16	2 – 7	-4 ; 3	–
Légèrement Frais	22 - 26	15 – 20	5.2 – 14.8	10 – 20	–	-4 ; 10.3	11 – 16	13–18	–	7 – 13	3 – 13	20– 22
Neutre	26 - 30	20 – 25	14.8 – 23.8	20 – 25	17.9 – 29.7	10.3 – 25.3	16 – 24	18–28	16 – 30	13 – 19.8	13 – 16	22– 30
Légèrement chaud	30 – 34	25 – 30	23.8 – 31.2	25 – 32	–	25.3 – 40.3	24 – 30	–	30 – 31	19.8 – 27	16 – 21	30– 34
Chaud	34 – 38	30 – 35	31.2– 39.1	>32	29.7– 41.5	40.3 – 55.4	30 – 39	28– 34	31–32	27– 38	21 – 28	–
Très chaud	38 - 42	35 – 40	>39.1	–	41.5 – 53.3	>55.4	>39	34–38	32–36	38 – 58	28 – 43	34 – 46
Extrêmement chaud	> 42	> 40	–	–	> 53.3	–	–	> 38	> 36	> 58	> 43	> 46
<b>Classification climatique de Koppen-Geiger : (Cwa/Cwb) : Climat subtropical humide mousson, hiver sec ; (Cfb) : Climat océanique ; (Csa) : Climat méditerranéen à été chaud ; (BSK) : Climat semi-aride froid ; (Dwa) : Climat continental humide, hiver sec ; (Cfa) : Climat subtropical humide, été chaud ; (AW) : Climat tropical humide et sec ; (Af) : Climat équatorial</b>												

Les cas d'études examinés dans le (**Tableau 3.5**) ont adapté l'échelle de l'indice UTCI à différentes régions climatiques ; pour Athènes (Csa), pour Xi'an (Cwa/Bsk), et pour Harbin (Dwa). Quatre méthodes ont été appliquées pour ces modifications : la régression linéaire, le pourcentage de plage d'acceptabilité thermique, la régression cubique, et une évaluation basée sur l'analyse probit, (**Tableau 3.5**). Toutes les études ont utilisé le questionnaire à 7 points, sauf à Harbin où le questionnaire à 11 points a été utilisé. Seules deux études ont modifié l'ensemble des catégories de stress thermique (He et al., 2020; Pantavou et al., 2013b).

**Tableau 3.5.** UTCI modifiées pour diverses zones climatiques selon les méthodes de calibration  
Source : **Auteur (2022)**

UTCI modifiées pour diverses zones climatiques							
Méthode de calibration	plage d'acceptabilité thermique		Régression linéaire		Analyse probit		Régression cubique
Site	Athènes, Grèce	Xi'an, Chine	Athènes, Grèce	Harbin, Chine	Harbin, Chine	Xi'an, Chine	Athènes, Grèce
Climat	Csa	Cwa/BSk	Csa	Dwa	Dwa	Cwa/BSk	Csa
Référence	Pantavou et al, 2013	He et al, 2020	Pantavou et al, 2013	Chen et al, 2020	Chen et al, 2020	Xu et al, 2018	Pantavou et al, 2014
Echelle de TSV	7	7	7	11	11	7	7
Extrêmement froid	4.1 - 5.9	2.5 - 4.8	-	-	-	-	-
Très Froid	5.9 - 9.1	4.8 - 7.5	-	-34 ; -19.2	-33.6 ; -13.8	-	-
Froid	9.1 - 14	7.5 - 10.9	10.6 - 15.4	- 19.8 ; - 4.4	-13.8 ; -2.6	-	8.9 - 14.5
Légèrement Froid	14 - 17.4	10.9 - 15.8	15.4 - 20	- 4.4 ; 10.4	-2.6 - 11.8	8.8 - 18.5	14.5 - 20
Pas de stress thermique	17.4 - 24.5	20 - 28.5	20 - 24.4	10.4 - 25.2	11.8 - 27	18.5 - 29.6	20 - 25.2
Légèrement chaud	24.5 - 29.1	28.5 - 34.6	24.4 - 29.2	25.2 - 40	27 - 34.4	29.6 - 37.5	25.2 - 29.9
Chaud	29.1 - 34.1	34.6 - 38.9	29.2 - 33.8	40 - 54.7	34.4 - 40.1	37.5 - 45.4	29.9 - 33.4
Très chaud	34.1 - 37.7	38.9 - 41.8	> 33.8	> 54.7	> 40.1	> 45.4	> 33.4
Extrêmement chaud	> 37.7	> 41.8	-	-	-	-	-

**Classification climatique de Koppen-Geiger : (Cwa) :** Climat subtropical humide mousson, hiver sec ; **(Csa) :** Climat méditerranéen à été chaud ; **(BSk) :** Climat semi-aride froid ; **(Dwa) :** Climat continental humide, hiver sec

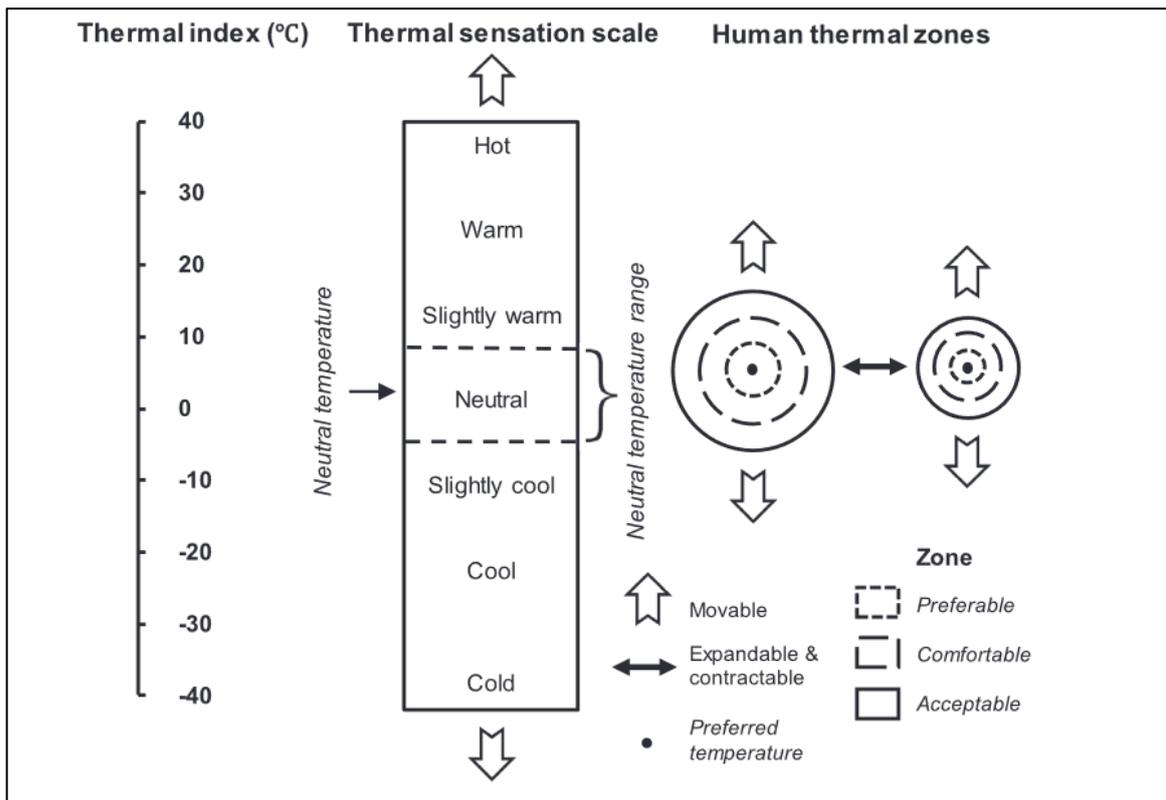
L'acceptabilité thermique est la méthode la plus couramment utilisée pour modifier intégralement l'échelle des indices. Néanmoins, la détermination de la catégorie « neutre » ou « pas de stress » est menée par des pourcentages subjectifs (90, 88, 85 ou 80 % d'acceptabilité) et par des augmentations de température qui dépendent de l'expertise et de l'interprétation du chercheur plutôt qu'une méthodologie statistique objective (Cheung and Jim, 2017), par conséquent, il n'est pas possible de comparer différentes zones climatiques.

Selon Potchter et al, (2022), la méthode de la régression linéaire est fortement corrélée à l'environnement thermique par rapport aux autres méthodes de modification des indices. Cette approche est largement employée dans la détermination du plage 'neutre' du (PET) et la plage 'pas de stress thermique' du (UTCI), et notamment dans la calibration partielle ou intégrale de ces indices thermiques, bien que le débat persiste quant à la considération de la plage neutre en tant qu'échelle linéaire ou ordinale (Matzarakis, 2020).

### **3.5 Protocoles d'évaluation de la perception thermique en espace urbain**

Les études récentes portant sur la perception thermique humaine en extérieur ont souligné la nécessité d'adopter une structure conceptuelle convenu, également appelé '*Framework*' pour la recherche biométéorologique (Cheung and Jim, 2017; Elnabawi and Hamza, 2020; Johansson et al., 2014; Lai et al., 2020; Potchter et al., 2022).

Spagnolo et de Dear (2003) ont été les premiers à développer un protocole de base pour l'évaluation de l'environnement thermique humain en extérieur : « *Conceptuellement, nous pouvons considérer l'environnement thermique humain comme un ensemble de "zones" concentriques avec la préférence thermique au centre, flanquée par une bande plus large de conditions thermiquement confortables, qui peuvent à leur tour être encadrée par de bandes plus larges de conditions thermiques acceptables, puis inconfortables, puis modérément stressantes, puis stressantes, et enfin, d'environnements thermiques dangereux.* ». Les relations entre ces niveaux et plages de référence peuvent être illustrées dans un cadre conceptuel, (**Figure 3.5**).



**Figure 3. 5.** Cadre conceptuel de l'environnement thermique humain

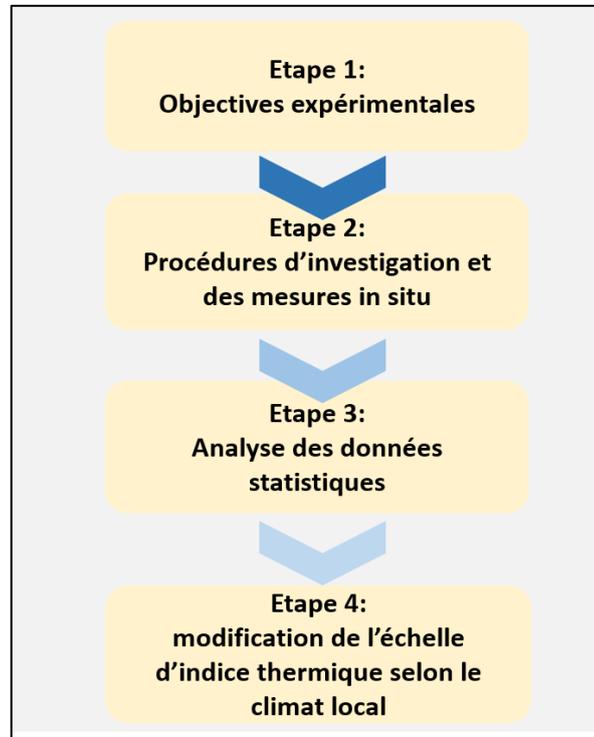
Source : (Cheung and Jim, 2017) de (Spagnolo and de Dear, 2003)

La représentation synoptique englobe trois échelles, à savoir l'indice thermique, la sensation thermique et la zone thermique humaine, qui ne sont pas dessinées à l'échelle. Les quatre zones restantes (inconfortable, modérément stressante, stressante et dangereuse) mentionnées auparavant ne sont pas présentées.

Tout d'abord, l'indice thermique est une échelle fixe qui permet d'exprimer les catégories ou zones des deux autres échelles (la sensation thermique et les zones thermiques humaines), (**Figure 3.5**). En ce qui concerne la sensation thermique, elle suit l'échelle de 7 points de l'ASHRAE, chaque sensation thermique pouvant être définie par une plage unique dans l'échelle de l'indice thermique. En parallèle, différentes zones thermiques humaines sont définies par une plage de température dans l'indice thermique.

Pour récapituler, la sensation thermique est également affectée par les facteurs sociodémographiques, la physiologie, et l'expérience (histoire) thermique. Ces facteurs expliquent la fluidité des zones thermiques humaines dans la (**Figure 3.5**), qui sont 'mobiles, rétractables et extensibles' par rapport à l'échelle fixe de l'indice thermique (Cheung & Jim, 2017).

Les lignes directrices pour la réalisation des recherches biométéorologiques en extérieur et l'évaluation de la perception thermique humaine reposent généralement sur un cadre conceptuel comprenant quatre étapes essentielles (Potchter et al, 2022) :



**Figure 3. 6.** *Framework* de base pour l'évaluation de la perception thermique en extérieur

Source : (Potchter et al, 2022) adaptée par l'auteur

### 3.5.1 Première étape : objectives expérimentaux

La première étape consiste à définir les objectifs expérimentaux et, en conséquence, à désigner le site d'étude, la saison, la durée ainsi que le groupe démographique étudié. Le site englobe l'aire géographique, et le contexte climatique.

Les sites devraient représenter l'unité étudiée et inclure au moins des conditions estivales et hivernales typiques, couvrant à la fois les heures chaudes et froides de la journée, à moins que les objectifs de recherche ne se concentrent sur des événements météorologiques extrêmes.

Il est recommandé que la durée de l'expérience couvre les heures du jour, y compris l'exposition aux radiations solaires directes ainsi que les conditions diurnes les plus fraîches. Étant donné que l'une des priorités est la population ciblée, il est important d'identifier les

renseignements personnels des sujets interrogés (sexe, âge), leur type d'activité (métabolisme), le taux de vêtements et l'expérience thermique des répondants.

### **3.5.2 Deuxième étape : procédures d'investigation et des mesures in situ**

La deuxième étape implique la mise en place de mesures sur terrain, incluant des instruments de mesures microclimatiques et des techniques de recueil de données, la mise en forme du questionnaire, des méthodes d'échantillonnage, également la détermination de la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ), et des procédures de calcul des indices thermique.

Il est donc crucial que les mesures sur terrain respectent des techniques de surveillance validées et des instruments de mesure cohérents conformément aux normes de (l'ASHRAE 55, et l'ISO 7726). Une taille d'échantillon suffisante est nécessaire pour garantir une représentation fiable de la population étudiée.

### **3.5.3 Troisième étape : analyse des données statistiques**

La troisième étape est l'analyse des données, comprenant le contrôle de la qualité des données, l'analyse de la perception thermique et la détermination du seuil de confort thermique. Le contrôle de qualité des données est nécessaire lors du tri des réponses au questionnaire. Les réponses au vote de sensation thermique (TSV) doivent être examinées attentivement, suite à des incompréhensions entre l'enquêteur et le répondant ou des erreurs de transcription des biais pourraient créer. Par conséquent, les votes aberrants devraient être extraits.

### **3.5.4 Quatrième étape : modification de l'échelle d'indice thermique selon le climat local**

La dernière étape nécessite l'ajustement de l'échelle d'indice initial pour correspondre aux conditions climatiques spécifiques de la région. Avant d'apporter des modifications, il est indispensable d'assembler toutes les données de l'enquête et de les compiler dans une base de données unifiée. Ensuite, grâce à des techniques de filtrage le contrôle de diverses valeurs est requis ; puis la base de données peut porter un ensemble d'analyses (méta-analyses) et de calculs d'indices.

La technique principale pour modifier les indices est l'acceptabilité thermique, qui permet la classification de toutes les catégories. Cette méthode dépend de l'expertise et de

l'interprétation du chercheur (**cf. section 3.3.3, pp : 83**), ce qui entraîne des variations dans son utilisation selon les cas, nécessitant un emploi prudent. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser une analyse statistique pour modifier toutes les échelles de l'indice plutôt qu'effectuer des accroissements équivalents de seuils. Les recherches appliquant des approches de régression linéaire et d'analyse discriminante ont modifié efficacement toutes les catégories d'échelle en fonction de critères statistiques systématiques et objectifs (**Tableaux 3.4 et 3.5**), recommandant ainsi l'utilisation de ces deux méthodologies (Potchter et al, 2022).

## **Conclusion**

Depuis le début des années 2000, multiples études ont été effectuées dans le but d'évaluer les conditions thermiques pour les êtres humains, et de classer le stress thermique. Ces études visent à identifier les conditions thermiques pour lesquelles les habitants dans une région climatique ou géographique particulière se sentiraient neutres ou confortables. Une telle recherche nécessite une enquête par questionnaire pour comprendre la perception subjective de l'environnement thermique, qui est évaluée par rapport aux données météorologiques objectives collectées simultanément.

Dans ce chapitre, l'analyse des articles évaluant la perception thermique entre 2001 et 2022 souligne trois facteurs principaux qui contribuent à la complexité du travail sur le confort thermique humain dans l'environnement extérieur : premièrement, la conception du questionnaire ; deuxièmement, la procédure de mesure in situ (site, saison, heure, durée et calcul de  $T_{mrt}$ ) ; troisièmement, variation des méthodes utilisées pour l'identification de la plage de confort thermique et la modification des seuils de stress thermique des indices.

Dans les études examinées, les échelles d'évaluation de la sensation thermique (TSV) intégrées aux questionnaires varient de 5 à 7 points et du 9 à 11 points. Par conséquent, l'utilisation des échelles (TSV) non uniformes, qui ne correspondent pas aux catégories d'indice de confort, entraînant ainsi des difficultés dans la modification de l'index. Par ailleurs, un nombre limité d'études ont collecté des données météorologiques représentant à la fois les saisons chaudes et froides, couvrant plusieurs heures tout au long de la journée et englobant des environnements thermiques urbains divers.

De plus, comparer la plage « neutre » modifiée du (PET) pour différentes zones climatiques est difficile, et cela devient encore plus compliqué lorsqu'on essaie de confronter des études ayant modifié l'ensemble des catégories de stress thermique.

Finally, The objective of the proposed protocol for biometeorological research outdoors is to establish common viable denominators for a better understanding of human thermal adaptation in different climatic contexts and to make the comparative examination of various studies more comprehensible.

**CHAPITRE IV**

**APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉVALUATION DE  
LA PERCEPTION THERMIQUE EN ESPACE PUBLIC  
EXTÉRIEUR**

## CHAPITRE IV : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉVALUATION DE LA PERCEPTION THERMIQUE EN ESPACE PUBLIC EXTÉRIEUR

### 4. Introduction

Les espaces publics extérieurs notamment, les places, les esplanades, et les parcs entre autres, contribuent de manière significative à la promotion de la vie urbaine, la santé et le bien-être. Comme l'affirment (Chen et Ng, 2012), '*l'état d'esprit*' ainsi que '*l'état du corps*' déterminent la manière dont les gens utilisent réellement les espaces urbains.

La perception thermique et le confort des individus dans les espaces extérieurs sont grandement affectés par les paramètres du microclimat. Cependant, leur évaluation ne dépend pas toujours de facteurs objectifs. Les aspects comportementaux et psychologiques jouent un rôle majeur en influençant les sensations thermiques humaines et l'usage des espaces urbains extérieurs (Nikolopoulou et Steemers, 2003).

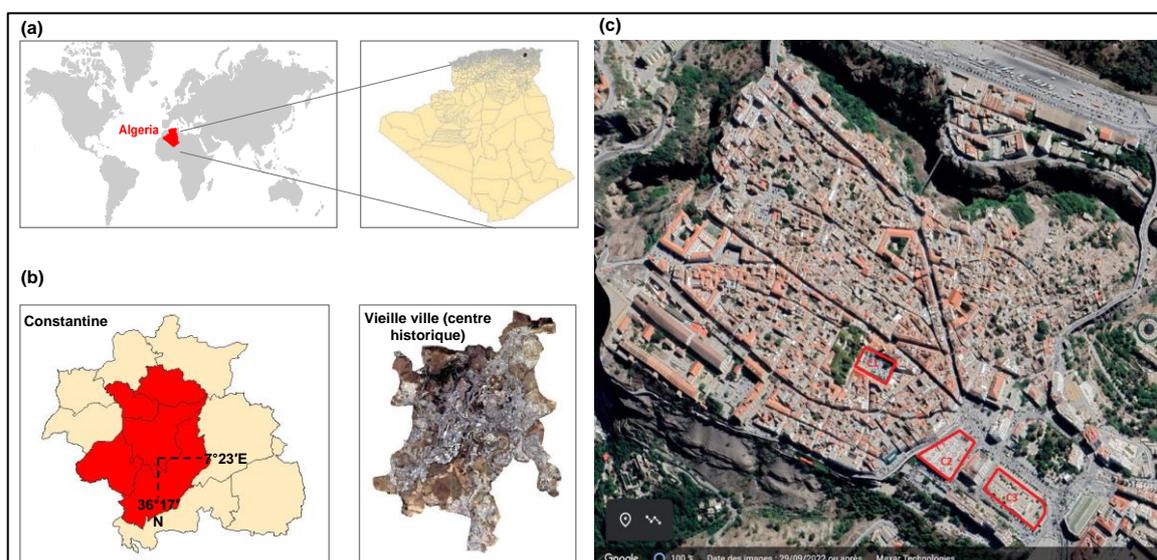
De nombreuses méthodes ont été utilisées au cours des dernières décennies pour identifier les facteurs qui déterminent la perception thermique et évaluer les environnements extérieurs, ils peuvent être classés en deux approches principales. Les analyses qualitatives requièrent des observations, des entretiens, et des enquêtes par questionnaire, tandis que les approches quantitatives reposent sur des mesures in situ ou/et des simulations numériques (Han et al., 2022).

Ce chapitre méthodologique offre un aperçu détaillé de l'approche suivie pour évaluer la perception thermique en espace publics extérieurs. Pour ce faire, il est impératif de définir l'ensemble des méthodes adoptées et les outils employés pour collecter, analyser, et interpréter les données. Enfin, les sections suivantes expliquent en détail la méthodologie de recherche et le diagramme dans la dernière section résume les différentes étapes. Mais avant ça nous allons présenter le contexte géographique et climatique des trois espaces publics sectionnés pour l'étude.

#### 4.1 Contexte géographique et climatique des cas d'étude

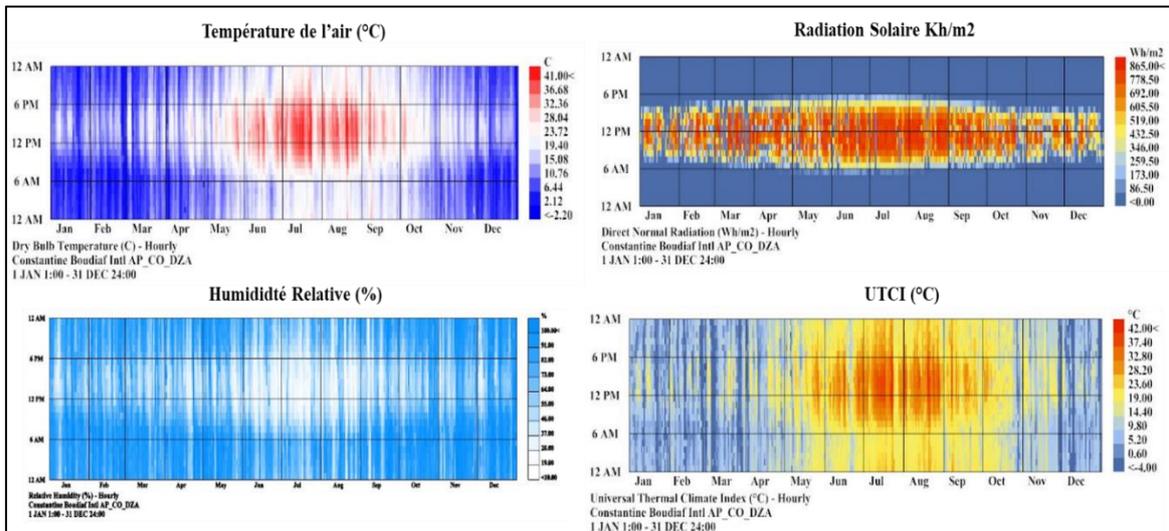
Nous avons désigné trois places publiques situées dans la vieille ville de Constantine. Une ville située au nord-est de l'Algérie, entre 7 ° 23' Est de longitude et 36 ° 17' Nord de latitude, et a une altitude de 687 m au-dessus de la mer (**Figure 4.1**).

Constantine appelée souvent 'cité aérienne', 'cité du ravin', et '*bled el haoua*' doit sa naissance et sa continuité à la valeur inhérente de son site. Le ravin étroit du *Rhumel*, long de 2800 m, et atteignant une profondeur de 37 m à l'entrée des gorges et de près de 200 m à sa sortie, encercle un énorme bloc de calcaire, formant ainsi une véritable acropole naturelle. Assurant la protection pour les communautés installées sur les hauteurs, il a délimité la première aire urbaine : le Rocher (**PPSMVSS, 2011a**).



**Figure 4. 1.** (a) L'Algérie dans le monde, (b) Aire d'étude, (c) Vue générale des sites d'étude dans la vieille ville de Constantine. Source : **Auteur (2022)**, (**Google earth**)

Constantine est classée sous un climat semi-aride froid avec des étés chauds et secs et des hivers froids, d'après la classification climatique de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). Le traitement des données météorologiques de Constantine pour la période de 2004 à 2018 (EnergyPlus de Constantine), en utilisant le plugin '*Ladybug/Grasshopper*', révèle deux saisons distinctes : une chaude et sèche de mai à septembre, et une froide et humide d'octobre à avril (Sahnoune, 2022). L'analyse des divers paramètres micro-météorologiques tels que la température de l'air, l'humidité relative, la radiation solaire et l'Indice de Confort Thermique Universel (UTCI) est résumée dans la (**Figure 4.2**).

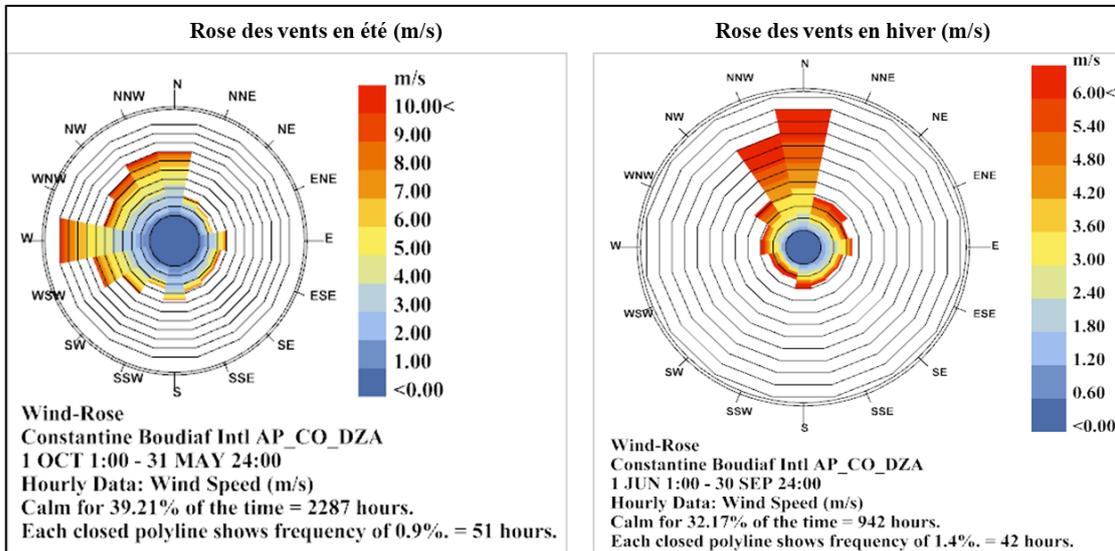


**Figure 4. 2.** Facteurs climatiques de Constantine (2004-2018).

Source : (Sahnoune, 2022)

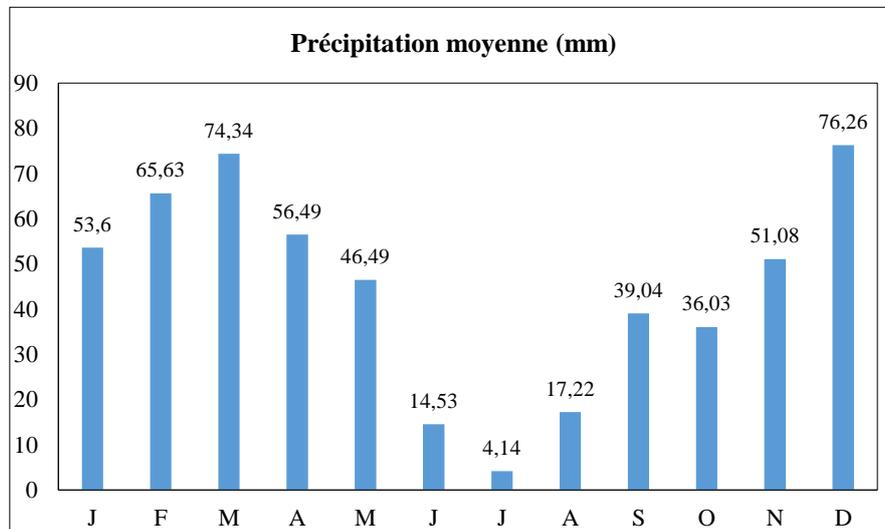
- La température moyenne annuelle est de 15.4 °C, avec des pics au-dessus de 40 °C en juillet, le mois le plus chaud de l'année, et des températures minimales en dessous de 2 °C en janvier. Toutefois, une saison de transition couvre le reste des mois (octobre/novembre et avril/mai) allant de 15.08 °C et 23.7 °C pour la température moyenne de l'air (**Figure 4.2**).
- L'humidité relative moyenne est de 67.5 %, atteignant un maximum de 53.13 % en été et un minimum de 67.5 % enregistré en janvier.
- Le rayonnement solaire moyen annuel est de 206.3 W/m<sup>2</sup>, avec un pic de plus de 909 W/m<sup>2</sup> en été et une baisse en dessous de 404 W/m<sup>2</sup> en hiver, ce qui souligne l'intensité élevée du soleil en été et sa faible présence en hiver. Cette variation a des implications importantes pour l'étude des espaces extérieurs exposés aux radiations solaire intenses (**Figure 4.2**).
- La région se caractérise par une faible vitesse du vent, avec une moyenne de 2.4 m/s. Les vents dominants soufflent du nord au nord-nord-ouest toute l'année, mais ils viennent de l'ouest pendant l'été (avec une moyenne de 2.6 m/s) et du nord pendant l'hiver avec une moyenne de 3.4 m/s, (**Figure 4.3**).
- Pour les précipitations, le centre de prévision météorologique de Constantine indique une moyenne annuelle de 531.6 mm pour la période de 2004 à 2015, (**Figure 4.4**). Une courte période de sécheresse s'étend de juin à août, avec un minimum de 4.14 mm enregistré durant le mois de juillet qui marque son aridité, la pluie se manifeste

principalement sous forme d'orages. Le reste de l'année est caractérisé par des précipitations plus abondantes, avec un pic de 76.26 mm enregistré en décembre, le mois le plus humide.



**Figure 4. 3.** Diagrammes des roses des vents : (a) données horaires pendant la période estivale de juin à septembre. (b) données horaires pendant la période hivernale d'octobre à mai.

Source : (Sahnoune, 2022)



**Figure 4. 4.** Interprétation graphique de la moyenne annuelle des précipitations (2004-2015)

Source : (Sahnoune, 2022)

#### 4.1.1 Choix et présentation des cas d'étude

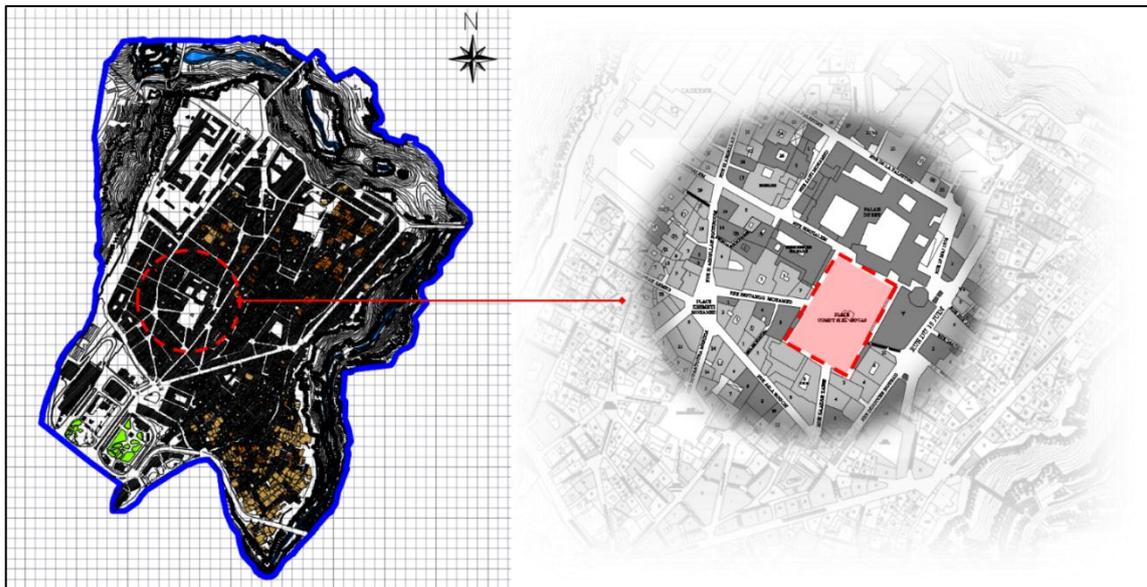
La délimitation de notre champ de recherche a été effectuée lors de la pré-investigation en nous basant sur l'observation et la validation du questionnaire-test. Notre champ d'investigation expérimental concerne trois places publiques situés dans le secteur

sauvegardé de la vieille ville de Constantine (PPSMVSS, 2012) ; il s'agit de la place *Si el Haoues* 'connue par la place du palais' (C1), l'esplanade de la Révolution 'connue par la Brèche' (C2), et la place *Hadj Ahmed Bey* connue par place '*Dounia Ettraif*' (C3).

a) **Place Si El Haoues (C1)**

La place, connue par rapport à sa proximité du palais *Ahmed Bey* de Constantine, qui est reconverti en musée national des arts et expressions culturelles traditionnelles en 2012. Ex : 'Place Générale' devient la place '*Si el Haoues*' le nom de guerre d'un chahid, colonel de l'ALN (Armée de Libération National).

La place à une forme presque rectangulaire (70\*49) m, elle est accessible par la rue *Zaater Taib* qui se connecte en diagonale par le croisement de la rue *Aselah Houcine* et la rue *Didouche Mourad* anciennement 'la rue de France'. A l'est un escalier près de la porte de la mosquée *Houssine bey* connu par 'la mosquée de *Souk el Ghezal*', et se connecte au centre de la longueur à la rue *Bestandji Mohamed* du côté ouest (Figure 4.5). À l'angle nord-ouest la rue Jérusalem '*el Qods*' rejoint la place perpendiculairement, bordant la façade principale du palais (Bouchareb, 2020).

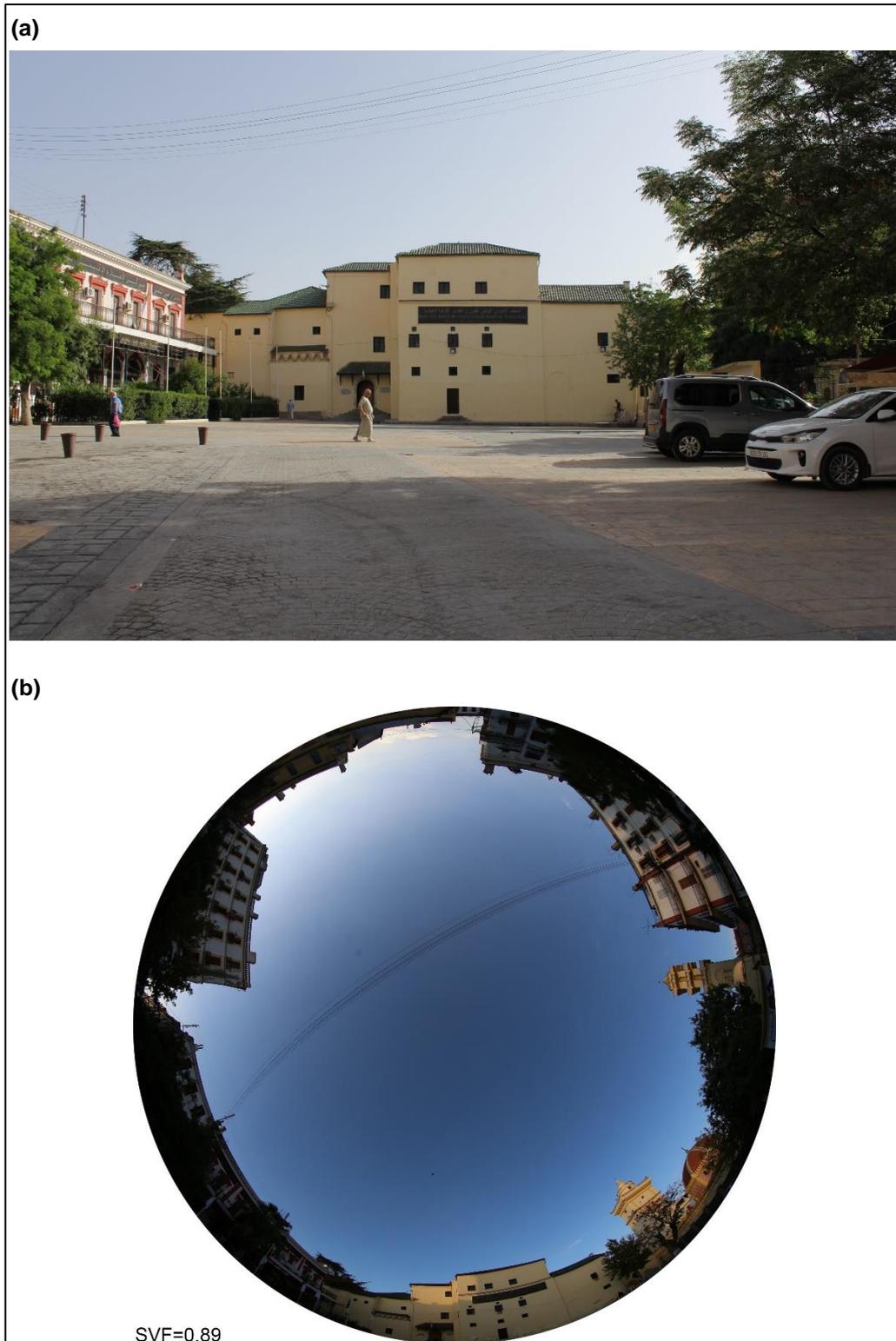


**Figure 4. 5.** Situation et limites de la place *Si El Haoues* (C1) à la vieille ville de Constantine

Source : plan de (PPSMVSS, 2011b) adapté par l'auteur

Pour appréhender l'interrelation entre la morphologie urbaine et l'environnement thermique, le (SVF) a été calculé pour chaque place (Figure 4.6). A l'aide d'un appareil

photo Reflex Canon EOS 5D équipé d'un objectif fish-eye EF 8-15 mm, des photos fish-eye ont été capturés, ensuite ces photos hémisphériques ont été introduit dans RayMan.

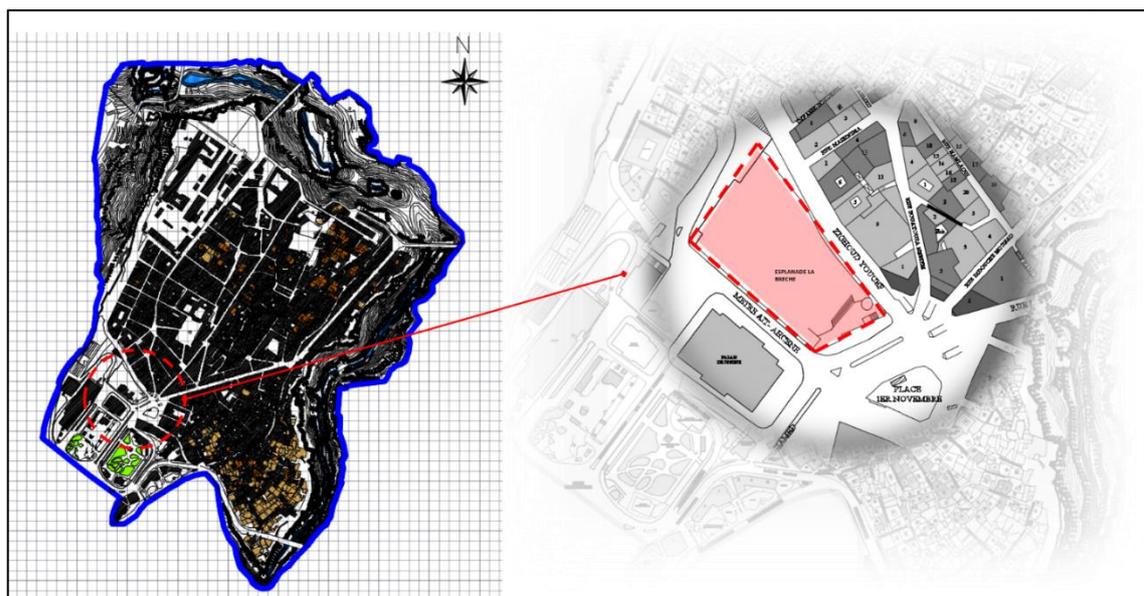


**Figure 4. 6.** (a) Vue sur la place *Si El Haoues*, (b) photo fish-eye et valeur du SVF

Source : (Auteur, 2021)

## b) Esplanade de la Brèche (C2)

Il est utile de signaler que l'espace public où on a effectué notre travail de terrain concerne seulement le toit terrasse du marché 'Boumezzou' (Figure 4.7). En effet, l'esplanade de la Brèche fait partie de la grande place 1<sup>er</sup> Novembre, appelée par les Constantinois la place de 'la Brèche' ou place du 'Théâtre' très populaire par ces marchands au noir. Cependant on n'a pas prolongé l'investigation jusqu'au place du 1<sup>er</sup> Novembre en vue de plusieurs contraintes.

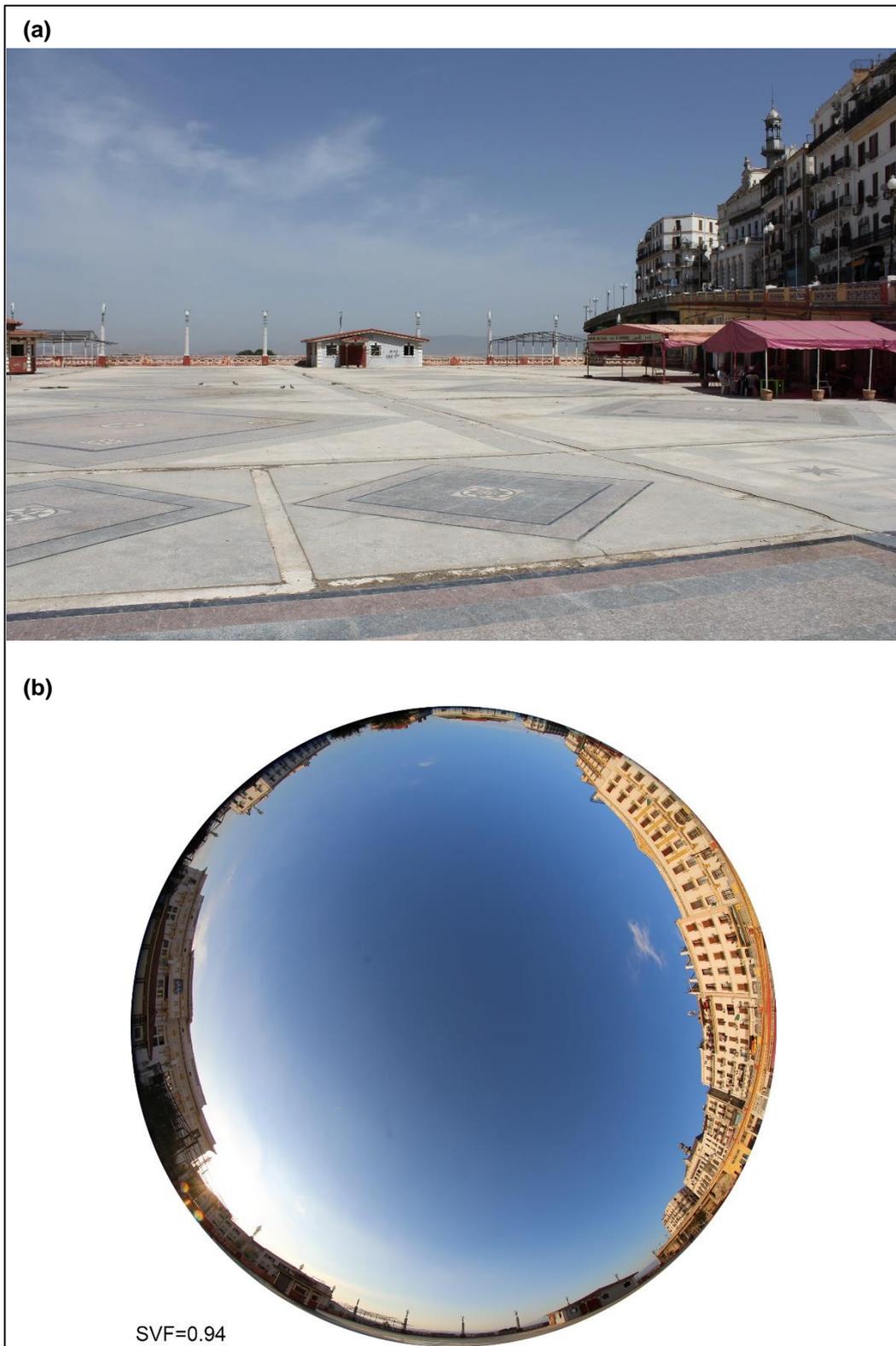


**Figure 4. 7.** Situation et limites de l'esplanade la Brèche (C2) à la vieille ville de Constantine

Source : plan de (PPSMVSS, 2011b) adapté par l'auteur

L'esplanade de la Brèche se trouve en plein centre de la ville, elle occupe un espace centrale où convergent trois percées haussmanniennes telles que ; le Boulevard *Zighoud Youcef*, la rue *Didouche Mourad* (ex-rue de France), et la rue *Larbi Ben M'Hidi* (ex-George Clémenceau) (Foura Mohamed & Yasmina, 2003). De plus, l'avenue de *Ben Boulaid Mohamed* (ex-Pierre Liagre) aboutissant dans son prolongement sur le côté sud-ouest la place des Martyrs (ex-Lamoricière). Donc, chacune de ces artères importantes reliant l'esplanade de la Brèche aux divers quartiers de la vieille ville de Constantine.

La centralité de l'esplanade est accentuée par les édifices tertiaires importants qui reflètent l'architecture française du XIX<sup>e</sup> siècle. Elle est limitée sur les deux côtés par le bâti, et son troisième côté offre une perspective largement dégagée sur le mont *Chettaba* et la vallée du *Hamma* (Figure 4.8).



**Figure 4.8.** (a) Vue sur l'esplanade de la Brèche, (b) photo fish-eye et valeur du SVF  
Source : (Auteur, 2021)

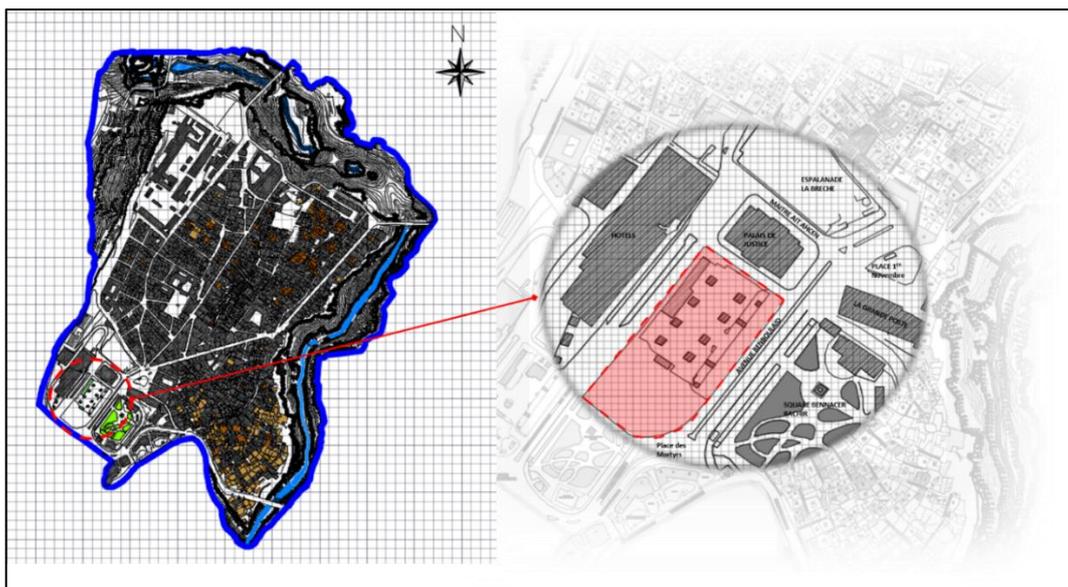
c) **Place Hadj Ahmed bey (C3)**

En 2015 dans le cadre de la manifestation de ‘Constantine capitale de la culture arabe’ la place *Ahmed bey* a été rénovée. Cette place autrefois connue par ‘square de la république’ (**Figure 4.9**), un jardin peu aménagé abritant des vestiges historiques de l’époque romaine, juste en face du jardin *Bennacer Bachir* (ex-square Vallée) (Boutebba, 2019). La place *Hadj Ahmed bey* est située le long de l’avenue *Ben Boulaid Mohamed*, reliant ainsi les deux hôtels Ibis et Novotel, et délimitée par le palais de justice sur le côté nord et au sud par la place des Martyrs (**Figure 4.10**) et (**Figure 4.11**).



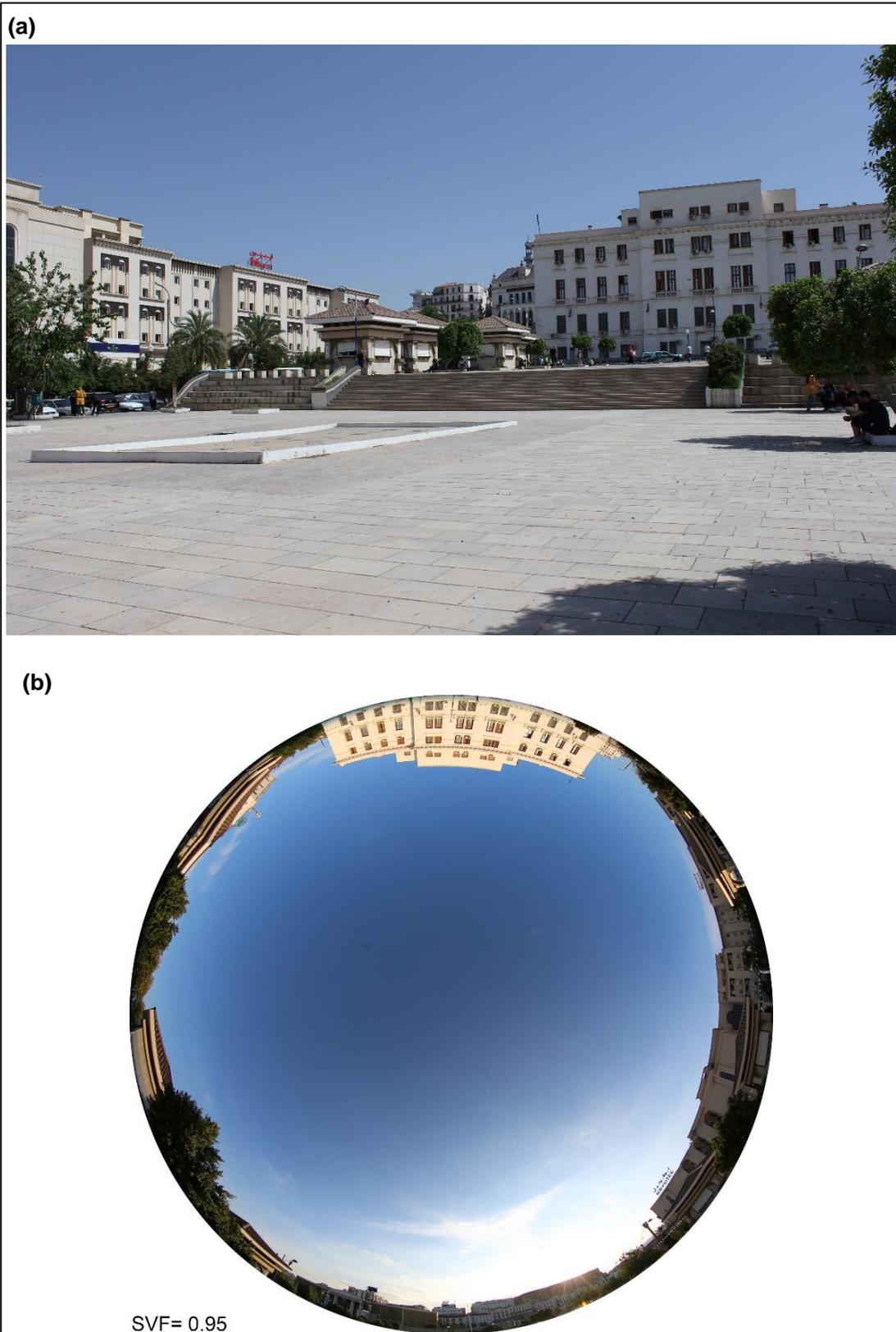
**Figure 4.9.** Square de la république en face square Vallée

Source : (Boutebba, 2019)



**Figure 4.10.** Situation et limites de la place Hadj Ahmed bey (C3) à la vieille ville de Constantine

Source : plan de (PPSMVSS, 2011b) adapté par l’auteur



**Figure 4.11.** (a) Vue sur la place *Hadj Ahmed Bey*, (b) photo fish-eye et valeur du SVF  
Source : (Auteur, 2021)

## 4.2 Démarche expérimentale par l'analyse microclimatique

Les mesures du microclimat impliquent la collecte régulière des données météorologiques dans une zone géographique déterminée, telle qu'une zone urbaine limitée, un espace vert désigné ou une structure individuelle. La finalité principale de ces mesures microclimatiques est de fournir des données précises sur les conditions atmosphériques locales, qui peuvent être utilisées pour comprendre l'impact de l'environnement bâti sur le confort humain.

### 4.2.1 Instrument de mesure

L'acquisition des données micro-météorologiques est couramment effectuée par des capteurs (thermomètres, d'anémomètres, de baromètres...) et des outils de surveillance qui enregistrent différents facteurs environnementaux, incluant la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, les précipitations et les radiations solaires. Pour accomplir nos mesures, nous avons utilisé l'instrument Delta OHM HD 32.3 qui est conçu pour l'analyse des environnements chauds en présence ou absence de rayonnement solaire (**Figure 4.12**).



**Figure 4.12.** (a) Mesures microclimatiques avec Delta OHM HD 32.3, (b) Sondes de l'instrument Delta OHM HD 32.3 . Source: (Auteur, 2021)

**a) Sondes et caractéristiques techniques**

L'instrument Delta OHM HD 32.3 est doté de différentes sondes ; une sonde thermométrique à globe (TP3276.2, diamètre du globe= 50 mm) pour mesurer la température de thermomètre globe T<sub>g</sub> (°C) ; une sonde combinée (HP3217.2, avec un capteur sensible Pt100) pour l'enregistrement de la température de l'air T<sub>a</sub> (°C). Alors que l'humidité relative Rh (%) a été mesurée par une sonde combinée (HP3217.2, capteur capacitif) ; et la vitesse de l'air V<sub>a</sub> (m/s) par une sonde omnidirectionnelle (AP3203.2, NTC 10Kohm), pour plus de détails voir la (Figure 4.12) et le (Tableau 4.1).

**Tableau 4.1.** Caractéristiques techniques de l'instrument Delta OHM 32.3

Source : **Delta OHM HD32.3 (2019)**

Paramètres climatiques	Type de sonde	Précision	Résolution	Plage de mesures
Température de l'air (T <sub>a</sub> )	Sonde combinée HP3217.2R, Capteur sensible Pt100	Class 1/3 DIN ± 0.1 °C	0.1 °C	-40°C à +80°C
Humidité relative (Rh)	Sonde combinée HP3217.2R, capteur capacitif	±1.5% (0...90% Rh) ±2% (90...100%)	0.1%	0% à 100%
Vitesse de l'air (V <sub>a</sub> )	Sonde omnidirectionnelle à fil chaud AP3203.2, NTC 10Kohm	±0.2 m/s (0.1÷1 m/s) ±0.3 m/s (1÷5 m/s)	0.01 m/s	0.1 m/s à 5 m/s
Température du globe (T <sub>g</sub> )	Sonde thermométrique à globe TP3276.2 (Ø = 50 mm) Pt100	Class 1/3 DIN ± 0.1 °C	0.1 °C	-10°C à 100°C

De plus, pour estimer la température moyenne radiante T<sub>mrt</sub> (°C) nous devons détecter à proximité du thermomètre à globe ; la température du globe, la température de l'air et vitesse de l'air. L'équation permettant de calculer (T<sub>mrt</sub>) selon (ISO : 7726, 1998) et (Thorsson et al 2007) et comme suit :

$$T_{mrt} = \left[ (T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v_a^{0.6}}{(\epsilon \times D^{0.4}) \times (T_g - T_a)} \right]^{0.25} - 273.15 \quad (4.1)$$

Où **Tmrt** représente la température radiante moyenne (°C) ;

**Tg** - Température de thermomètre globe (°C) ;

**Ta** - Température de l'air (°C) ;

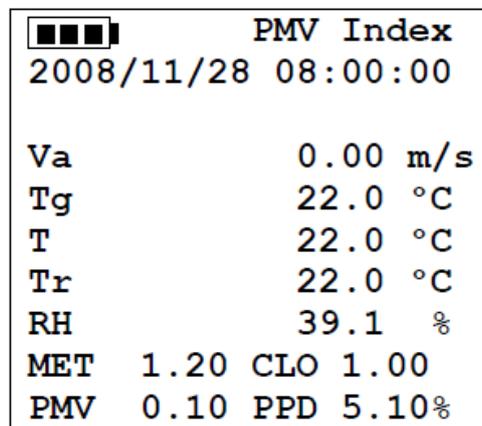
**Va** - Vitesse de l'air (m/s) ;

$\epsilon$  - Emissivité du globe (0,95) ;

**D** - Diamètre du thermomètre à globe (50 mm).

## b) Protocole de mesure

Delta OHM 32.3 peut détecter et visualiser parallèlement plusieurs facteurs et indices (Figure 4.13).



PMV Index	
2008/11/28 08:00:00	
Va	0.00 m/s
Tg	22.0 °C
T	22.0 °C
Tr	22.0 °C
RH	39.1 %
MET	1.20 CLO 1.00
PMV	0.10 PPD 5.10%

**Figure 4.13.** Interface de l'instrument Delta OHM 32.3 lors de mesure

Source : (Delta OHM 32.3, 2019)

- (Va) Vitesse de l'air (m/s)
- (Ta) Température de l'air (°C)
- (Tg) Température de thermomètre globe (°C)
- (Tr) Température moyenne radiante (°C)
- (RH) Humidité relative (%)
- (MET) Taux métabolique défini par préalablement par l'enquêteur
- (CLO) Résistance thermique des vêtements définie par l'enquêteur
- (PMV) indice de vote moyen prévisible
- (PPD) indice de pourcentage prévisible d'insatisfait

**MET** : unité utilisée pour quantifier l'énergie produite à l'intérieur du corps résultant d'une activité métabolique, ou le taux métabolique d'individu moyen assis et au repos est  $1.0 \text{ Met} = 60 \text{ W/m}^2$  (ASHRAE 55, 2010).

**CLO** : unité utilisée pour exprimer l'isolation thermique des vêtements et ensembles vestimentaires, ou  $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$  Paramètres microclimatiques mesurés (ASHRAE 55, 2010).

Au cours de cette recherche, les facteurs microclimatiques : la température de l'air  $T_a$  ( $^\circ\text{C}$ ), la température de thermomètre globe  $T_g$  ( $^\circ\text{C}$ ), l'humidité relative  $R_h$  (%), et la vitesse de l'air  $V_a$  (m/s) ont été mesurés simultanément par l'instrument Delta OHM HD 32.3 dans les trois places publiques (**Figure 4.13**).

### **1- Fréquence et durée de mesures**

Les paramètres microclimatiques mesurés ont été enregistrés simultanément avec une heure (1h) d'intervalle à l'aide de l'instrument Delta OHM HD 32.3 (**Figure 4.14**). La fréquence d'enregistrement était horaire pour coïncider avec les inputs et outputs des simulations effectuées par le logiciel ENVI-met.

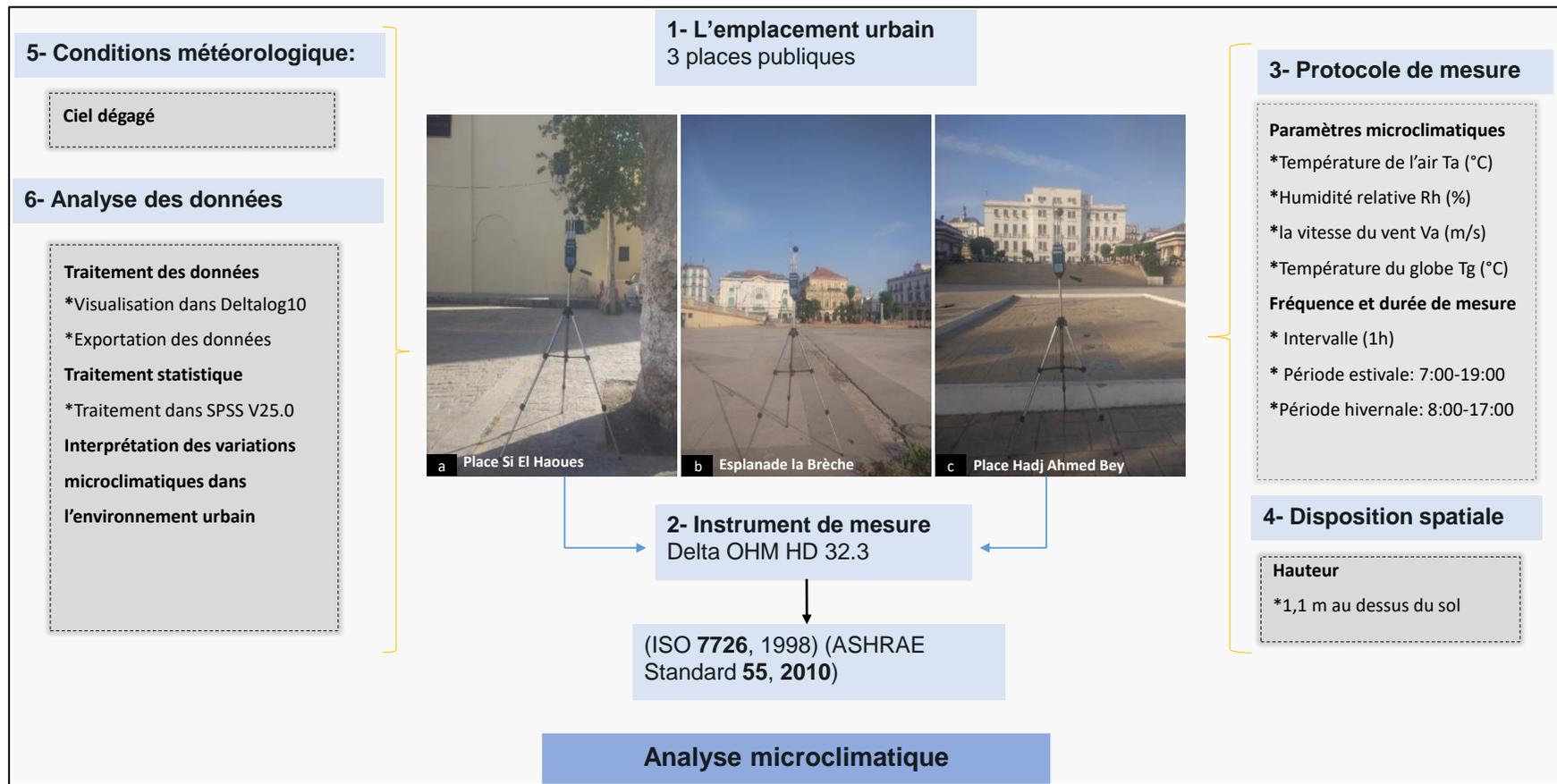
Pendant la saison estivale, les mesures du microclimat ont été effectuées du 7h du matin à 19h sans interruption, afin de capturer les différentes fluctuations diurnes et couvrir les heures prolongé d'ensoleillement. Néanmoins, en hiver on s'est ajusté aux conditions environnementales de la saison froide, les mesures s'étendent de 8h à 17h sans interruptions.

### **2- Disposition spatiale**

Les mesures microclimatiques dans les espaces urbains étudiés (**Figure 4.14**) ont été effectuées à une hauteur de 1,1m au-dessus du sol, conformément aux recommandations d'ASHRAE 55 (2010).

#### **4.2.2 Traitement des données microclimatiques**

À l'aide du logiciel DeltaLog10 inclus avec l'instrument de mesure microclimatique Delta OHM 32.3, les paramètres physiques de l'environnement thermique ont été visualisés, puis un fichier (csv) a été exporté vers Excel pour compléter le traitement et l'analyse des données. Le logiciel DeltaLog10 offre aussi la possibilité d'effectuer une analyse de statistique descriptive englobant les valeurs (maximales, minimales, moyenne, et écart type) des données enregistrées lors des mesures.



**Figure 4.14.** Les différentes étapes de la démarche expérimentale par l'analyse microclimatique

Source : (Auteur, 2021)

### 4.3 Méthode de l'enquête par le questionnaire

La mise en place du questionnaire suit des directives rigoureuses assurant que la question formulée soit rentables génératrices d'information pertinentes dans le but d'affirmer ou d'infirmer des hypothèses (Benhassine, 2011). Le choix du questionnaire comme outil nous offre la possibilité de recueillir des données factuelles, et des renseignements subjectifs sur la perception de l'environnement thermique par les individus.

Les enquêtés expriment directement à travers des questions structurées leurs satisfactions et préférences vis-à-vis la température, le vent et d'autres facteurs climatiques qui influent leurs confort et usage des places publiques. Ainsi, les caractéristiques comportementales et psychologiques, de l'adaptation thermique et des facteurs sociaux sont traitées pour évaluer leurs effets sur la perception thermique extérieure. Enfin, le questionnaire nous permet aussi de comprendre comment le confort et la perception thermique des individus en climat semi-aride varie à travers les saisons et les différentes conditions environnementales.

#### 4.3.1 Mise en forme du questionnaire

##### a) Choix des questions

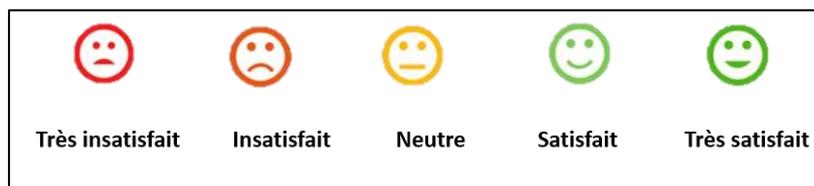
Afin d'assurer une collecte de données efficace, nous avons définis clairement nos objectifs de l'enquête, quelles sont les informations spécifiques qu'on veut recueillir ? Puis, on a effectué un examen de la littérature pour identifier les questionnaires existants qui correspondent à nos objectifs de recherche. Un ensemble de questions initiales a été élaboré en s'appuyant sur de références clés (Johansson et al., 2018; Pantavou et al., 2013; Wang et al., 2017) et la norme ("ASHRAE Standard 55," 2010), (ISO 10551:2019). De ce fait le questionnaire (**Annexe B, Figure B.1-3**) est composé de :

- 1) **Questions fermées :** Ce type de question est employé pour collecter des informations spécifiques et structurées afin de faciliter l'analyse des données collectées. L'enquêté est contraint devant un nombre prédéfini de réponses parmi lesquels il est requis de choisir la réponse la plus appropriée.

Nous collectons des renseignements sociodémographiques sur les tranches d'âge, le sexe, la taille, le poids, et le lieu de résidence, et d'autres questions en liens avec les facteurs psychologiques et aspects comportementaux portant sur ; la raison et fréquence de visite, le type de vêtements, niveau d'activité physique (taux

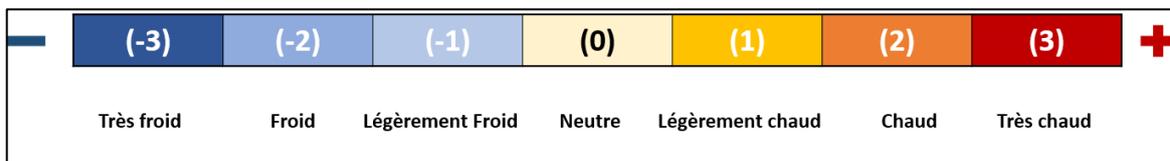
métabolique), l'adaptation thermique, l'histoire thermique et le temps d'exposition au soleil. Ces données sont nécessaires pour évaluer l'influence de certains facteurs subjectifs sur la perception thermique dans les places publiques. Elles seront ensuite confrontées aux données climatiques (facteurs objectifs) enregistrées dans les sites étudiés.

- 2) **Echelle de Likert** : ce type de question vise à évaluer les comportements, les appréciations ou les sensations des enquêtés. Typiquement en présentant une échelle d'options de réponse à 5 ou 7 points (**Figures 4.15 et 4.16**), permettant une compréhension plus détaillée des réponses fournies par les répondants sur une question particulière.



**Figure 4.15.** Echelle de satisfactions de cinq points

Source : adapté par l'auteur (2022)



**Figure 4.16.** Vote de Sensation Thermique (TSV) échelle de sept points

Source : (Auteur, 2022)

A travers ces questions, nous nous renseignons sur les sensations climatiques dans les espaces urbains étudiés. Afin d'estimer si les usagers perçoivent (ressentent) ces variations microclimatiques et déterminer l'importance de ces changements sur leurs activités et usage des espaces extérieures. Cet aspect est traité de manière explicite où nous sollicitant une appréciation des variables microclimatiques (ex. la température de l'air) d'après les questionnés sur une échelle de sensation thermique de sept points en se basant sur (ASHRAE Standard 55, 2010).

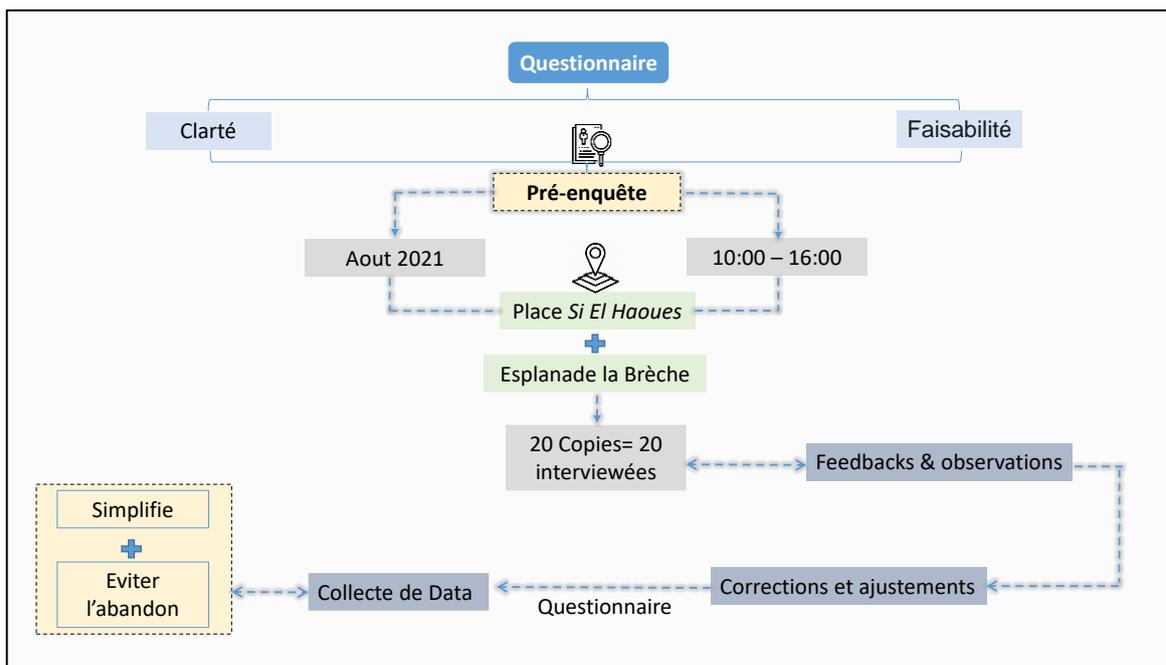
Cette échelle, désignée par Vote de Sensation Thermique (TSV) est ordonnée de (-3) très froid, (-2) froid, (-1) légèrement froid, (0) neutre, (+1) légèrement chaud, (+2) chaud, (+3) très chaud. Quant à la satisfaction thermique a été évalué pour chaque répondant sur la même échelle de ASHRAE à savoir ; (-3) très insatisfait, (-2)

insatisfait, (-1) légèrement insatisfait, (0) neutre, (1) légèrement satisfait, (2) satisfait, (3) très satisfait.

De plus, on demande aux sujets d'indiquer leurs préférences par rapport aux variables climatiques sur une échelle de trois nommée par Vote de Préférence Thermique (TPV) classée de ; (-1) plus bas, (0) pas de changement, et (+1) plus élevé (MacIntyre, 1980).

## b) Pré-enquête et ajustements

- 1) **Évaluation préalable** : consiste d'une étape primordiale avant la collecte des données nécessaires pour l'étude. A cette fin, une pré-enquête a été menée lors des sorties sur terrain, avec 20 participants (10 personnes dans la place *Si El Haoues* et 10 personnes à l'esplanade de la Brèche), afin d'approuver le questionnaire en vérifiant la clarté des questions et en le structurant de manière concise et directe, pouvant être rempli dans une durée de 8 à 10 minutes (**Figure 4.17**).



**Figure 4.17.** Etapes de la Pré-enquête et ajustements du questionnaire

Source : (Auteur, 2021)

- 2) **Réajustements nécessaires** : en nous basant sur l'observation directe et en fonction des feedbacks collectées de questionnaire-test, plusieurs ajustements ont été apportés principalement sur la longueur du formulaire pour éviter l'abandon du questionnaire pendant le recueil des données et estimer la durée adéquate pour l'enquête.

Par suite des accidents engendrés par la pandémie COVID-19, une nouvelle section composée de six questions a été ajoutée au questionnaire (**Annexe B, Figure B.1, section 3**), traitant les effets des restrictions imposées par le post- la pandémie telles que ; masque facial, distanciation sociale, et couvre-feu sur la perception thermique des individus et l’usage des places publiques durant cette période.

#### 4.3.2 Méthode de recueil de données

Le groupe démographique visé dans la collecte des données par l’intermédiaire du questionnaire était constitué des usagers des espaces urbains notamment les places publiques à la vieille ville de Constantine.

##### a) Echantillonnage et exigences de collecte de données

Pour veiller à ce que les résultats de l’étude soient représentatifs et peuvent être généralisés à une population plus large ou à d’autres contextes. Nous n’avons pas appliqué des critères de choix basés sur des facteurs démographiques spécifiques, adoptant plutôt une approche aléatoire pour la sélection des enquêtés dans les différentes places étudiées.

**Tableau 4.2.** Récapitulatif des questionnaires collectés par date, par heure et par saison

Source : (**Auteur, 2022**)

Saison	Site	Date	Durée	Questionnaires collectés	
Saison Estivale	Place <i>Si El Haoues</i> (C1)	16 Aout 2021	7 :00_19 :00	103	254
	Esplanade de la Brèche (C2)	22 Aout 2021	7 :00_19 :00	40	
	Place <i>Hadj Ahmed Bey</i> (C3)	24 Aout 2021	7 :00_19 :00	111	
Saison hivernale	Place <i>Si El Haoues</i> (C1)	18 Janvier 2022	8 :00_17 :00	113	265
	Esplanade de la Brèche (C2)	24 Janvier 2022	8 :00_17 :00	47	
	Place <i>Hadj Ahmed Bey</i> (C3)	23 Janvier 2022	8 :00_17 :00	105	
<b>Totale des questionnaires collectés</b>				<b>519</b>	

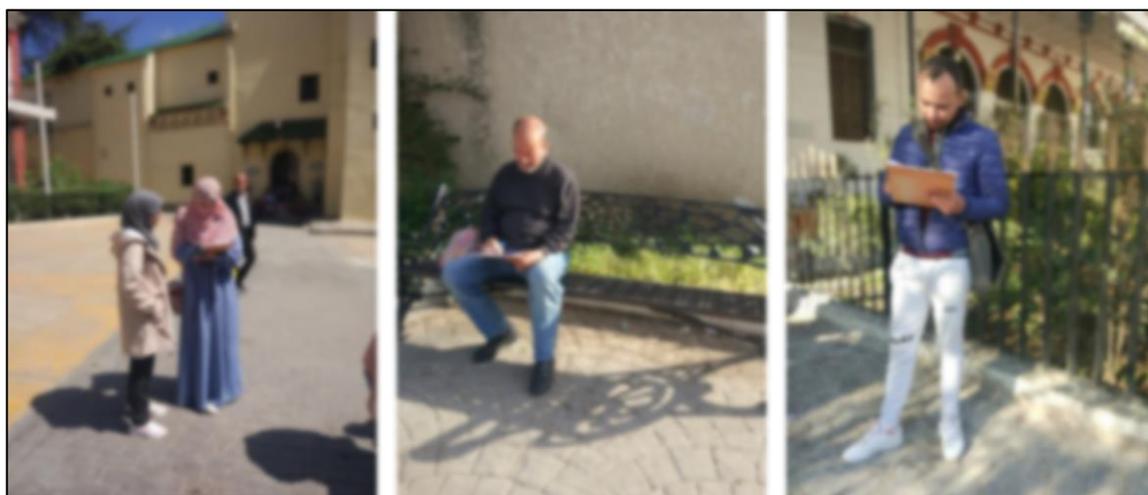
De plus la collecte des données s’est déroulée du matin au soir sans interruptions une journée dédiée à chaque place (**Tableau 4.2**), pour capturer les variations diurnes et la diversité d’expériences au sein de cette population. Une enquête prolongée permet aussi

d'obtenir une image exhaustive des aspects comportementaux et différents phénomènes étudiés en minimisant les biais temporels.

Au total, 528 questionnaires ont été collectés, parmi lesquels 519 ont été retenues pour l'analyse ultérieure. Pendant l'enquête, une attention particulière a été accordée à la parité entre les sexes, en veillant à équilibrer le nombre d'hommes et des femmes, ce qui contribue à rendre l'échantillon plus représentatif assurant l'inclusivité et la diversité du groupe démographique étudié.

#### b) **Processus de collecte de réponses**

Dépend de plusieurs facteurs notamment ; l'objectif de l'étude, la population ciblée, et les ressources disponibles. Pour optimiser le temps durant la collecte des données nécessaires et en prenant compte des contraintes de langue et niveau intellectuel de certains sujets, on a opté pour une approche combinée en utilisant à la fois des questionnaires administrés et auto-administrés pour la collecte des réponses (**Figure 4.18**).



**Figure 4. 18.** Photos représentatives de la collecte des données par questionnaire

Source : (**Auteur, 2022**)

Les questionnaires administrés, remplis par l'enquêteur, facilitaient l'interaction directe avec les répondants en offrant une clarification immédiate des questions ce qui permet de maximiser le taux de réponses. On a déployé cette approche pour les personnes âgées et certaines femmes qui étaient disposées à répondre au questionnaire mais préféraient une assistance directe. Parallèlement, les questionnaires auto-administrés étaient fréquemment employés lors de l'enquête, favorisant une plus grande flexibilité en mettant l'accent sur l'autonomie des enquêtés dans les réponses.

### 4.3.3 Traitement et analyse des données

Une combinaison d'analyses quantitatives et qualitatives a été employée, nous avons utilisé un logiciel de traitement des données statistiques SPSS version 25.0.

#### a) Aperçu sur le logiciel SPSS

Il a été initialement introduit en 1968 par la société SPSS Inc. Ensuite, il a été acheté par IBM en 2009. SPSS offre un environnement de modélisation rapide et visuellement orienté, (**Figure 4.19**), permettant la création et la vérification des modèles prédictifs d'une complexité variable. Les techniques statistiques couramment utilisées dans SPSS :

- Statistique descriptive : englobe l'analyse des fréquences et statistiques descriptives, les tableaux croisés
- Statistique Bi-variée : comprend diverses approches ; notamment les moyennes, les tests non-paramétriques, la corrélation, et l'analyse de variance (ANOVA)
- Prédiction des résultats numériques : telle que dans la régression linéaire et la régression multiples
- Outils d'analyse en cluster et analyse en composante : il s'agit des méthodes efficaces pour regrouper les observations similaires et identifier les tendances dans un ensemble de variables.

#### b) Organisation des variables (data) dans SPSS

Le type de variable dépend directement de type de data collectés, dans SPSS on doit définir préalablement le niveau de mesure (nominale, ordinale, échelle) pour chaque variable afin d'assurer une analyse fiable.

Il faut noter que, nous avons enregistré les variables quantitatives (numériques) comme les paramètres microclimatiques mesurés et les valeurs calculées de l'indice (PET) en tant que 'échelle' dans SPSS. Par ailleurs, les variables nominales (qualitatives) incluent les informations collectées pour lieux de résidence, but et fréquence de visite, accompagnement, et histoire thermique à court terme.

Alors que le Vote de sensation Thermique (TSV) a été défini comme variable 'ordinale' car on peut définir l'ordre des sensations thermiques telles que ; chaud/froid/neutre...etc. En attribuant des valeurs (codes) appropriés varier de (-3) au (3), ou définir l'ordre de (1) jusqu'au (7) par exemple. Une fois que les variables ont été organisés et étiquetés, on a saisi les données de chaque enquêtés avec précision pour éviter les erreurs pendant l'analyse.

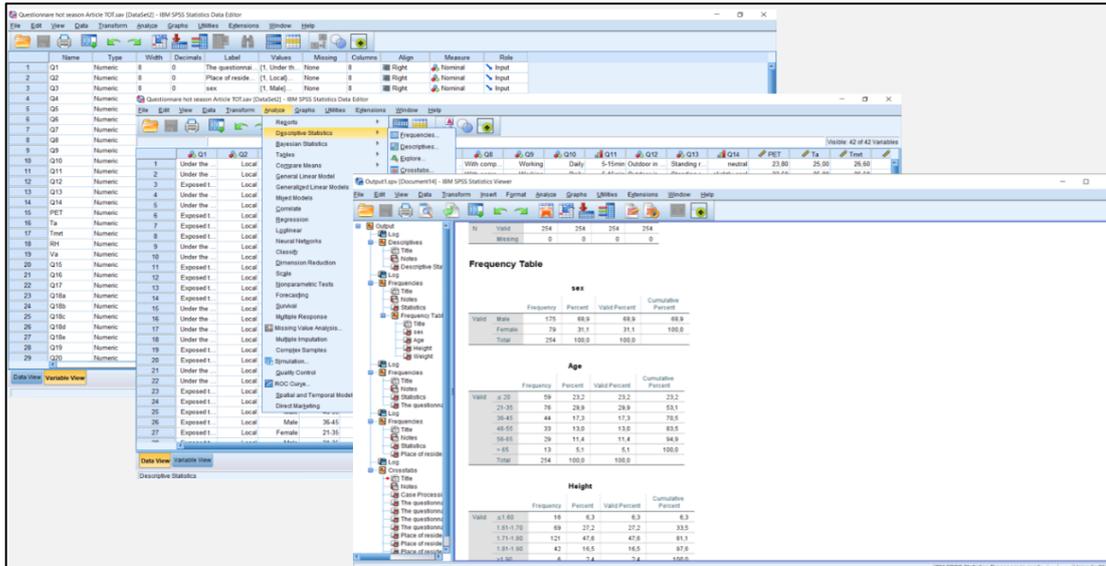


Figure 4.19. Interface du Logiciel SPSS V25.0

Source : (Auteur, 2022)

#### 4.4 Evaluation du confort thermique extérieur par la simulation numérique

##### 4.4.1 Présentation des Logiciels RayMan et ENVI-met

Nous avons employé deux logiciels, le premier est RayMan (Figure 4.20), afin de calculer l'indice thermo-physiologique (PET) pour chaque enquêtés.

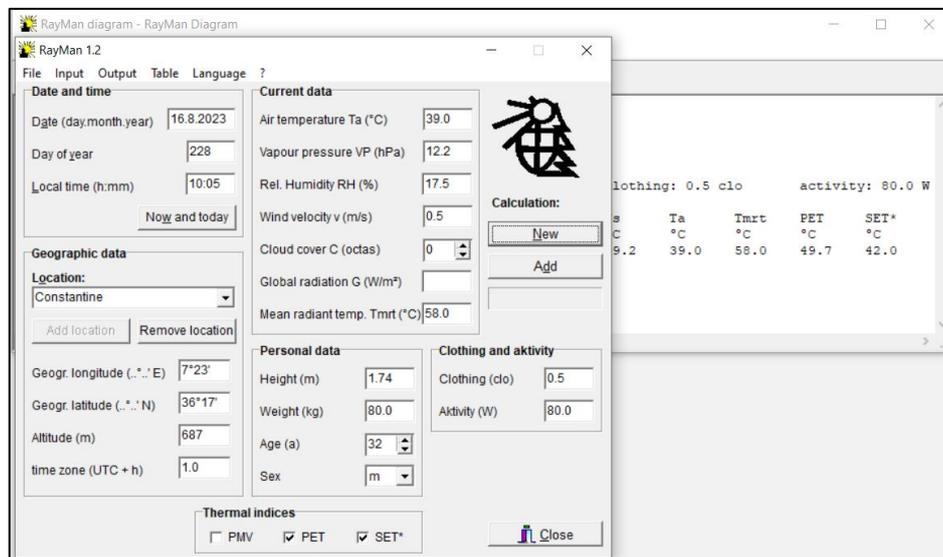
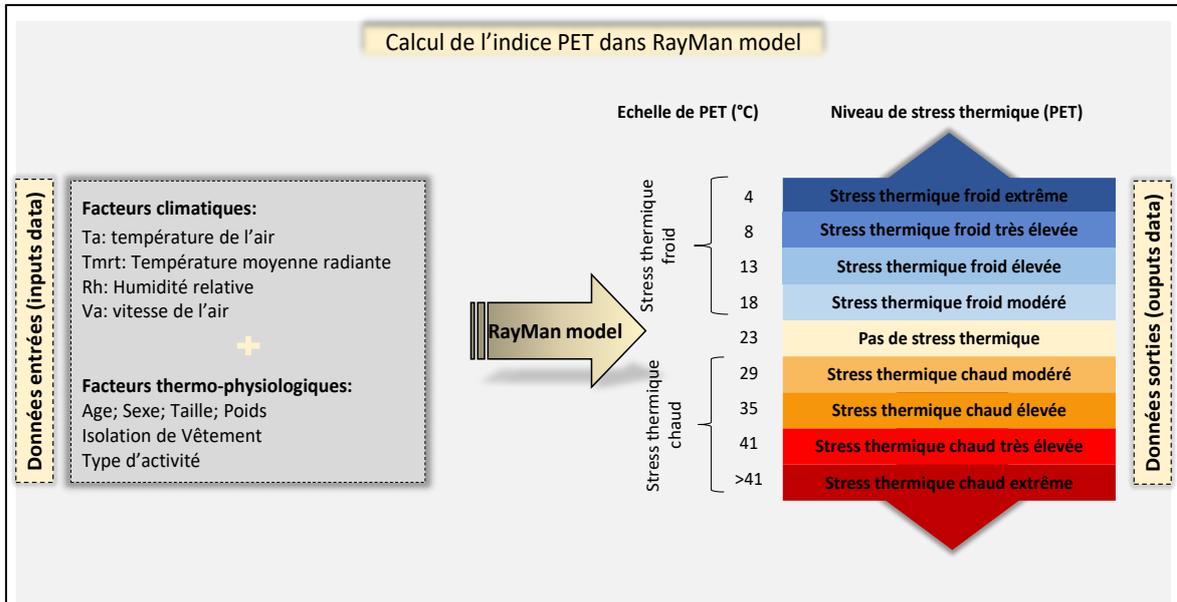


Figure 4.20. Interface de logiciel RayMan lors du calcul de l'indice (PET)

Source : (Auteur, 2022)

Cet indicateur numérique est dérivé de l'équation du bilan thermique humain et amplement utilisé dans divers recherches portant sur l'évaluation du confort thermique en

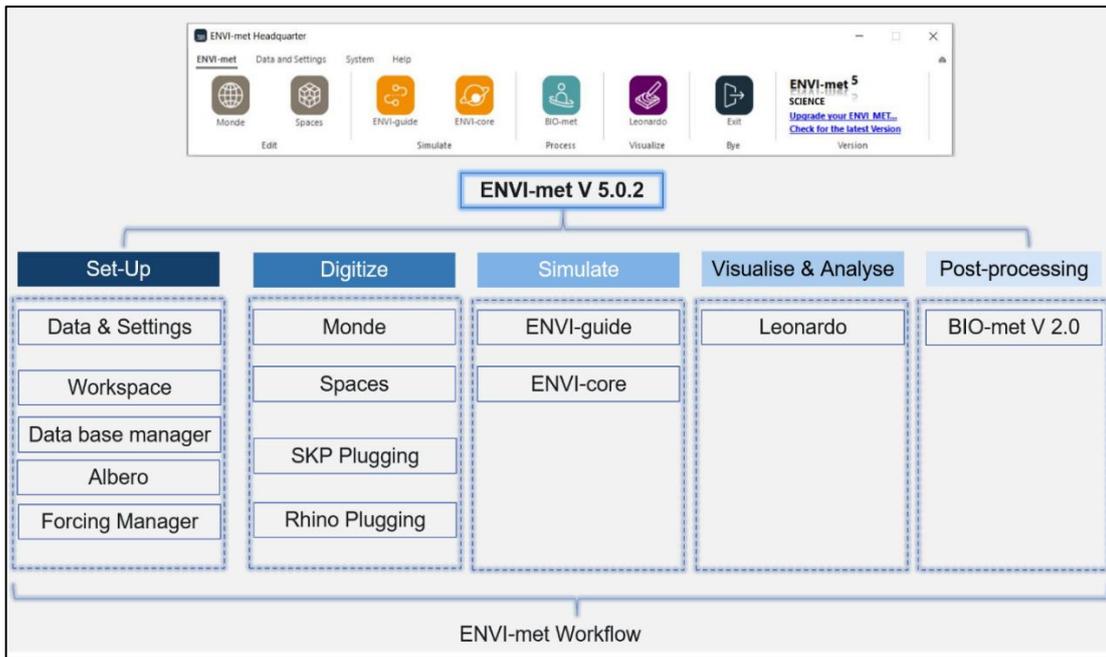
environnements extérieurs (Johansson et al., 2014), la comparaison des résultats avec d'autres recherches antérieures sera facile par la suite.



**Figure 4.21.** Calcul de l'indice PET dans Rayman model et les niveaux de stress thermique du (PET). Source : (Auteur, 2022)

L'indice (PET) est exprimé en degré Celsius (°C) et prend en compte nombreuse données d'entrées pour exécuter le modèle Rayman (**Figure 4.21**), comme les facteurs du microclimat (température de l'air, température moyenne radiante, humidité relative, et vitesse du vent), de même les aspects physiologiques tels que ; le sexe, la taille, et le taux métabolique et l'isolation de vêtement (Matzarakis et Rutz, 2010).

Le deuxième logiciel utilisé était ENVI-met Science version 5.0.2 (**Figure 4.22**), un logiciel de microclimat tridimensionnel fondé sur les concepts fondamentaux de la mécanique des fluides désigné par le terme (CFD) en anglais. ENVI-met peut simuler avec précisions tous les facteurs du microclimat en s'appuyant sur une approche de modélisation intégrale incluant les bâtiments, la végétation, différentes surfaces de sol et matériaux. Ainsi, le logiciel permet d'examiner l'impact des formes urbaines et les espaces verts sur les milieux ambiants et le confort thermique humain (Bruse, 2007).



**Figure 4.22.** Différentes étapes de modélisation et simulation dans ENVI-met V5

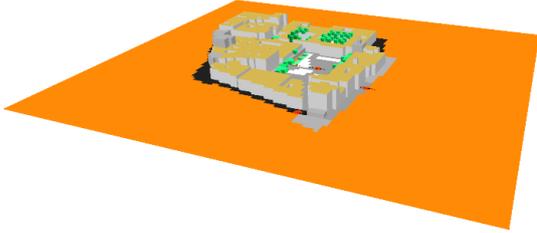
Source : (Auteur, 2022)

#### 4.4.2 Configuration et modélisation dans ENVI-met

Nous avons numérisé les trois places publiques à l'aide d'un outil basé sur une grille appelé 'Spaces' (Figure 4.22), la résolution de la grille horizontale a été fixé à 3\*3 mètres, alors que la grille verticale a dépassé trois fois la hauteur du bâtiment le plus élevé dans notre modèle. Par la suite, afin d'accélérer les simulations et éviter les divergences le mode 'Telescoping' a été activé avec un facteur de 10%. Créant des fichiers d'entrée de zone d'une grille de 110\*100 ; de 120\*120 ; et de 85\*95 pour la place *Si El Haoues* (C1), l'esplanade de la Brèche, et la place de *Hadj Ahmed bey* respectivement (Tableau 4.3).

**Tableau 4.3.** Modèles géométriques des places étudiés dans ENVI-met

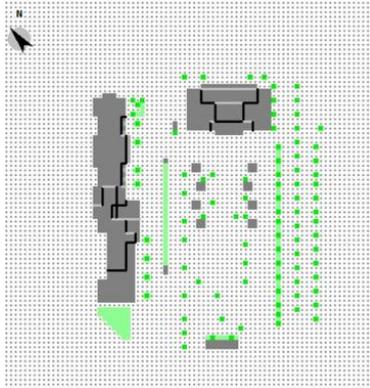
Source : ENVI-met (Auteur, 2021)

Site	Modèle 2D dans ENVI-met	Modèle 3D ENVI-met
<b>Place <i>Si el Haoues</i> (C1)</b>		

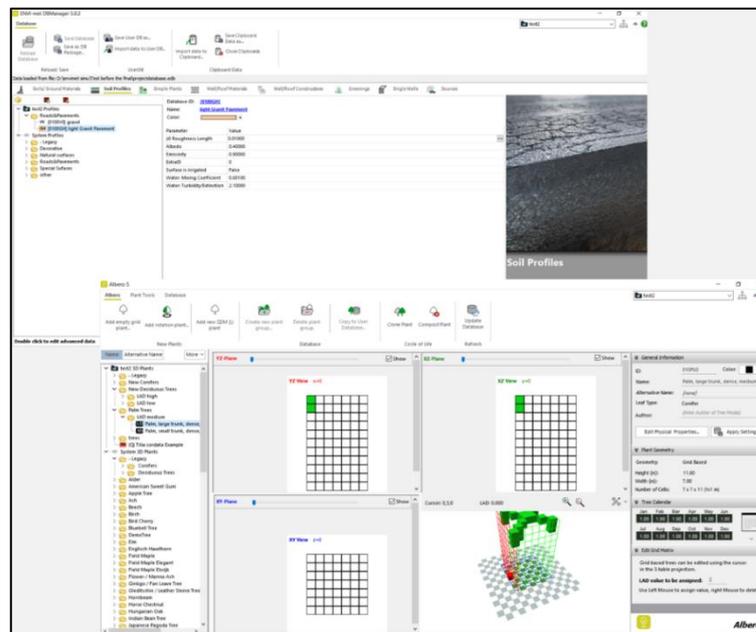
**Esplanad  
e Brèche  
(C2)**



**Place  
Hadj  
Ahmed  
bey  
(C3)**



Par ailleurs, toutes les spécifications concernant les matériaux de construction, les surfaces de sol, et d'autres composantes physiques ont été assemblées dans l'outil '*Data-base manger*', tandis que, l'outil '*Albero*' a été utilisé pour configurer le type et les dimensions de la végétation (**Figure 4.23**).

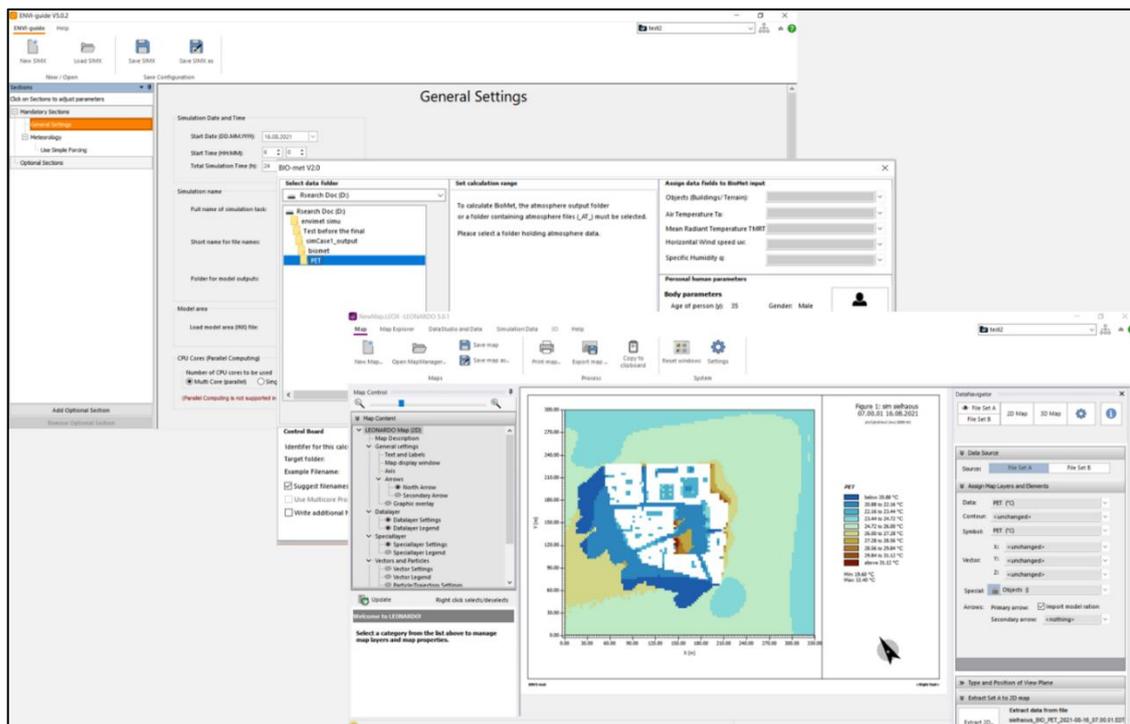


**Figure 4. 23.** Interface des outils d'ENVI-met '*Data-base manger*' et '*Albero*' lors de la configuration. Source : (Auteur, 2022)

### 4.4.3 Simulation et visualisation des résultats dans ENVI-met

Six jours de simulation ont été lancés, répartis en trois jours pour la période estivale (16 ; 22 ; 24 Août 2021) et trois jours pour la période hivernale (18 ; 24 ; 23 Janvier 2022). Ces journées correspondaient aux jours de l'enquête sur terrain dans les places publiques à la vieille ville de Constantine (**Tableau 4.2**).

Dans L'outil 'ENVI-guide' l'ensemble des paramètres générales également la date de la simulation, la durée, et le fichier de terrain, de même le fichier météo nécessaire ont été introduit pour lancer ultérieurement la simulation dans l'outil 'ENVI-core', (**Figure 4.22**). Ensuite, les résultats obtenues (outputs data) ont été intégrées dans l'outil de post-traitement 'BIO-met' pour calculer l'indice du confort thermique humain (PET). Enfin, l'outil 'Leonardo' a été employé pour analyser les données et visualiser des cartes du confort thermique extérieur en 2D en utilisant l'indice (PET) (**Figure 4.24**).



**Figure 4.24.** Interface des outils de simulation et visualisation dans ENVI-met

Source : (Auteur, 2022)

### 4.4.4 Validation des résultats d'ENVI-met

#### a) Indicateurs d'évaluation de la performance des modèles

Diverses méthodes statistiques sont disponibles pour examiner la correspondance entre l'ensemble de données observées (mesurées) et les données prédites (simulées). Les analyses

les plus courantes, le coefficient de corrélation de *Pearson* ; et le coefficient de détermination ( $R^2$ ), sont souvent accompagnés par des tests de significations rigoureux afin d'aider les chercheurs à vérifier la fiabilité de leurs résultats.

- 1) **Indicateur d'erreur le RMSE** : est couramment utilisé pour évaluer la performance des modèles dans la météorologie, l'erreur moyenne générée par un modèle est quantifiée dans l'erreur quadratique moyenne (MSE) ou sa racine carrée (RMSE). Cet indicateur statistique est particulièrement sensible aux divergences entre les variables mesurées et les variables simulées (**Equation, 4.1**), ce qui accentue même les légères déviations (Willmott, 1981). L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est calculée comme suit :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (4.1)$$

$O$  : valeurs observées

$P$  : valeurs simulées

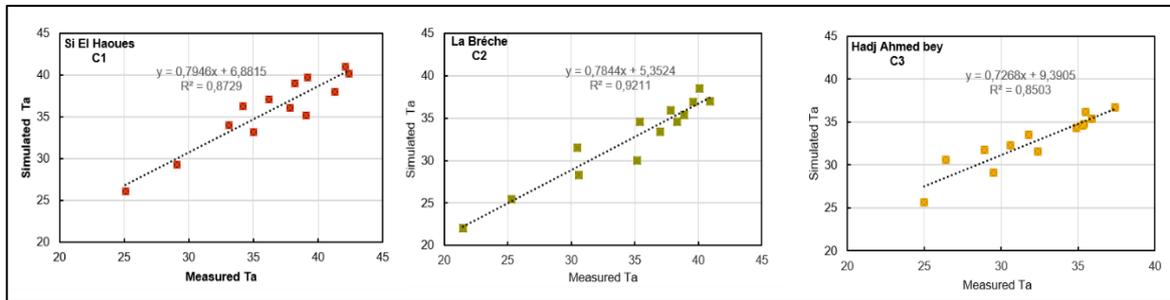
- 2) **Indice d'agrément (d)** : afin de contourner certains problèmes associés à ( $R$ ) et ( $R^2$ ), *Willmott* a introduit une mesure descriptive  $0 \leq d \leq 1$ . Il ne s'agit pas d'un indice pour déterminer l'association ou la corrélation entre les variables observées et les variables simulées, mais plutôt une mesure indiquant l'exactitude des prédictions d'un modèle (Willmott, 1982, 1981). En même temps, l'indice ( $d$ ) est standardisé facilitant l'interprétation et la comparaison des divers modèles indépendamment des unités, (**Equation 4.2**).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|P_i| + |O_i|]^2} \quad (4.2)$$

#### b) Validation de modèles numérique

Pour valider les résultats (outputs) obtenus par ENVI-met, l'approche de la régression linéaire a été souvent utilisée dans les recherches récentes (Morakinyo et al., 2017, 2016; Sun et al., 2017). Afin de justifier ces résultats, les variables microclimatiques collectés telles que, la température de l'air ; l'humidité relative et la température moyenne radiante ont été

confrontées à leurs paramètres simulés correspondants. Egalement, dans cette étude les fluctuations horaires de la température de l'air simulée ont été corrélées à la température de l'air mesurée sur les trois sites, comme illustrés dans la (**Figure 4.25**).



**Figure 4.25.** Régression linéaire entre les variables simulés et mesurés de la température de l'air dans les sites étudiés. Source : **Auteur (2022)**

Les résultats ont mis en évidence une corrélation robuste entre les températures mesurés et simulés dans les trois places examinées, avec un coefficient de détermination  $R^2$  variant de 0.85 à 0.92. Malgré les tendances similaires représentées dans la (**Figure 4.25**), ENVI-met a sous-estimé la température de l'air à midi dans les sites étudiés. De ce fait, deux métriques ont été calculées pour évaluer la performance du modèle, les erreurs quadratiques moyenne (RMSE) et l'indice d'agrément (d).

Les valeurs de (RMSE) calculées pour la validation de la température de l'air variaient de 1.6 °C dans *Hadj Ahmed bey* (C3), 1.8 °C dans *Si El Haoues* (C1), et 2.8°C à l'esplanade de la Brèche (C2), (**Tableau 4.4**) ci-dessous. Ces écarts entre les données simulées et mesurées peuvent être attribués à la température élevée et le rayonnement solaire intense enregistrés dans les sites d'étude par exemple ( $T_a = 42.4$  °C et  $T_g = 51.8$  °C à 13h sur la place *Si El Haoues*), qui a pu entraîner des erreurs dans l'instrument de mesure.

Pour argumenter les valeurs obtenues de l'indicateur d'erreur (RMSE), nous appuyons nos résultats par une approche comparative avec des études précédentes résumée dans le (**Tableau 4.4**). Les valeurs présentées dans cette étude entre 1,65 °C et 2,8 °C et 1,8 °C pour les sites sélectionnés démontrent une précision relativement meilleure par rapport aux valeurs observées de 2,9 °C et 4,8 °C (Hedquist and Brazel, 2014; Song and Park, 2015) .

De plus, dans un article récent de (Nasrollahi et al., 2021), les tests de validation des outputs d'ENVI-met ont donné une valeur de 2,8 °C pour le (RMSE), correspondant au (RMSE) le plus élevé calculé pour l'esplanade de la Brèche (C2), (**Tableau 4.4**). Dans des recherches similaires (Middel et al., 2014), (Heris et al., 2020) , les valeurs 1,4 et 1,2 °C de

RMSE obtenues sont légèrement inférieures à nos valeurs de 1,6 et 1,8 °C, ce qui suggère un niveau de précision comparable.

En outre, l'indice d'agrément (d) pour l'évaluation de la précision des résultats est approximativement parfait avec une valeur de 0.99, (**Tableau 4.4**), indiquant que les outputs d'ENVI-met ont très bien prédit la température de l'air observée. Par conséquent, il est possible d'affirmer que la configuration appropriée des paramètres d'entrée, associée à une modélisation précise des sites étudiés, résulte à des données de sortie étroitement alignées aux valeurs mesurées expérimentalement.

La crédibilité du logiciel ENVI-met dans la simulation du microclimat et l'évaluation confort thermique extérieur a été confirmée sous diverses régions climatiques dans des divers études (Heris et al., 2020; Huang and Li, 2017; Li et al., 2016; Lin and Lin, 2016; Middel et al., 2014; Nasrollahi et al., 2017).

**Tableau 4.4.** Comparaison de diverses métriques pour valider les résultats d'ENVI-met

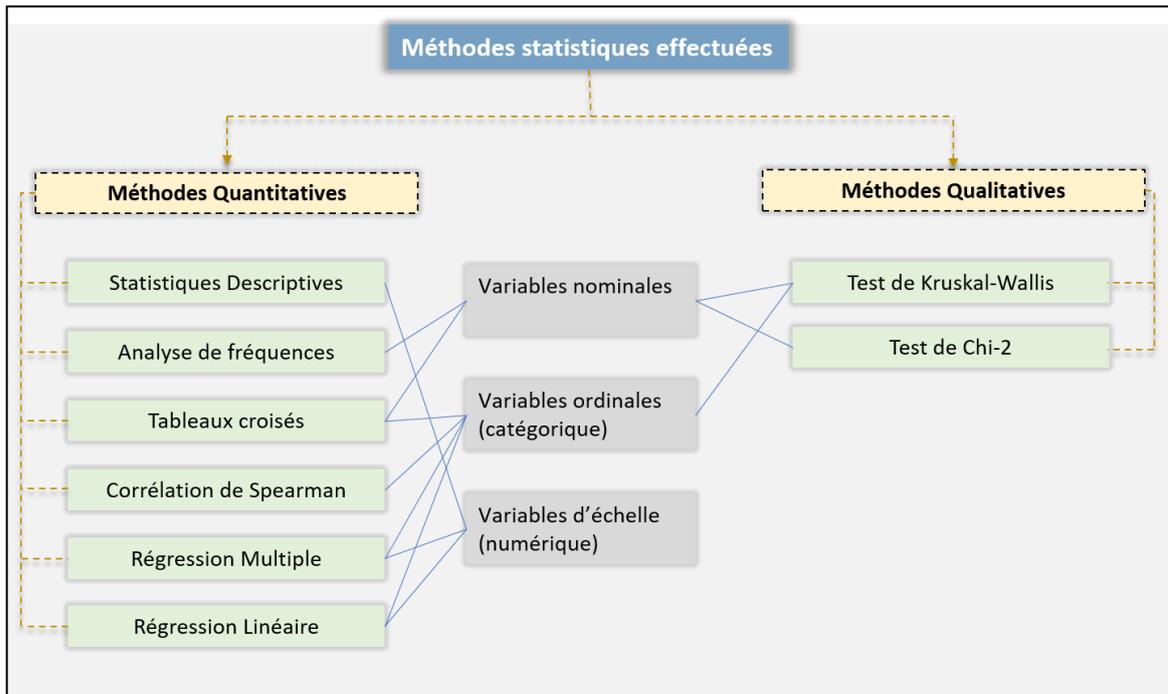
Source : (Auteur, 2022)

Référence	Ville	R <sup>2</sup>	RMSE	d
<b>Présente étude</b>	Constantine	0.87 <sup>a</sup> – 0.92 <sup>b</sup> –0.85 <sup>c</sup>	1.65 <sup>a</sup> –2.8 <sup>b</sup> – 1.8 <sup>c</sup>	0.99
(Qaid and Ossen, 2015)	Putrajaya, Malaisie	0.69	1.82	0.60
(Hedquist and Brazel, 2014)	Phoenix, USA	0.89	2.9	0.79
(Song and Park, 2015)	Changwon, Corée	0.52	4.83	–
(Middel et al., 2014)	Phoenix, USA	–	1.41 <sup>d</sup> –1.81 <sup>e</sup> – 2 <sup>f</sup>	0.99 <sup>d</sup> –0.98 <sup>e</sup> – 0.97 <sup>f</sup>
(Salata et al., 2016)	Rome, Italie	0.88	1.89	0.91
(Heris et al., 2020)	Denver, USA	–	1.2 <sup>g</sup> –2.4 <sup>h</sup>	0.97 <sup>g</sup> –0.98 <sup>h</sup>
(Nasrollahi et al., 2021)	Ahvaz, Iran	0.86	2.8	0.91
<sup>a</sup> place <i>Si El Haoues</i> C1 ; <sup>b</sup> esplanade de la Brèche C2 ; <sup>c</sup> place <i>Hadj Ahmed bey</i> C3 <sup>d</sup> Mesic ; <sup>e</sup> Oasis; <sup>f</sup> Xeric <sup>g</sup> Lakewood; <sup>h</sup> Boulder				

#### 4.5 Triangulation des résultats et méthodes statistiques effectuées

Plusieurs techniques ont été utilisées afin d'analyser et interpréter les données collectées (Figure 4.26). En se basant sur l'analyse des statistiques descriptives, les différents paramètres microclimatiques ont été synthétisés à travers des valeurs (maximales, minimales, moyennes et écarts types) offrant une vision exhaustive sur la variabilité des paramètres mesurés.

Ainsi, l'analyse des fréquences a été employée pour examiner les données sociodémographiques des enquêtés telles que le sexe, le lieu de résidence et l'âge des sujets, apportant des renseignements essentiels sur les caractéristiques et la distribution de la population étudiée. De plus, afin d'analyser la relation entre quelques variables catégoriques, l'application des tableaux croisés a été nécessaire pour identifier les tendances et les interactions entre ces divers facteurs qualitatifs.



**Figure 4.26.** Traitement et analyse des données par les méthodes quantitatives et qualitatives

Source : (Auteur, 2022)

L'analyse des Votes de Sensation Thermique et Satisfaction Thermique a été visualisée par des graphes, offrant une interprétation claire de la distribution des réponses en pourcentage, en conséquence, les perceptions thermiques prédominantes des participants dans les environnements étudiés ont été obtenues.

Puis, on a effectué une mesure non-paramétrique de dépendance par la corrélation de 'Spearman', entre les variables ordinales comme les Votes de : la Sensation Thermique (TSV) ; la Sensation de l'Humidité (HSV) ; la Sensation du Vent (WSV) ; et vote de la satisfaction thermique.

En effet, l'influence des paramètres microclimatiques (facteurs objectifs) sur la perception thermique des enquêtés a été examinée par une analyse de régression multiple. Cependant, un test non-paramétrique de *Kruskal-Wallis H* a été utilisé pour évaluer l'effet des facteurs subjectifs tels que le temps d'exposition ; type d'activités antérieures ; l'histoire thermique à court-terme, et également le comportement adaptatif, sur la sensation thermique des questionnés.

De plus, une analyse de régression linéaire a été effectuée dans le but d'établir la corrélation entre le Vote Moyen de sensation thermique (MTSV) (indice subjective) et la Température Physiologique Equivalente (PET) calculées. L'objectif était d'une part, d'explorer les variations de la sensation thermique reportées par les enquêtés sous différents niveaux de stress thermo-physiologiques.

Et d'autre part, la température neutre définie comme la température de confort à laquelle une personne ressent ni chaud ni froid (Fanger, 1972), a également été estimée en trouvant l'intercepte de la régression linéaire ( $y=0$ ). Dans la même optique (Boussoualim, 2002) suggère que : la neutralité thermique est lorsque le corps humain parvient à maintenir sa température constante sans activer ces mécanismes thermorégulateurs pour lutter contre les variations de la chaleur ou du froid. Par conséquent, la plage du confort thermique 'neutralité thermique' a été déterminée en résolvant l'équation de droite de régression linéaire pour ( $y= \pm 0.5$ ), par la suite l'indice du confort (PET) a été calibré pour le climat semi-aride de Constantine.

Finalement, les données collectées dans la saison estivale (Aout 2021) sur les diverses mesures liées au COVID-19 (port de masque, distanciation sociale, et respect du couvre-feu) ont été examinées par un autre test non-paramétrique, le test de Chi-2. L'objectif était d'identifier s'il existe une influence significative sur la perception thermique des usagers et leurs usages des places publiques pendant la période post-pandémique. A un niveau de signification de ( $p\text{-value}=0.05$ ) tous les tests suivaient l'intervalle de confiance à 95%.

## Conclusion

Notre objectif dans ce chapitre était de présenter de manière précise l'évaluation de la perception thermique en espace public extérieur par la triangulation des différentes approches ; notamment les mesures microclimatiques, la méthode de l'enquête par le questionnaire et la simulation numérique. En combinant à la fois des méthodes qualitatives et quantitatives pour analyser et interpréter les données collectées.

L'inconvénient à noter est le temps de traitement requis pour le codage, cette opération nécessite une durée prolongée et des efforts considérables pour obtenir un ensemble de données subjectives qualifié du 'fiable', en vue de les croiser avec d'autres données objectives.

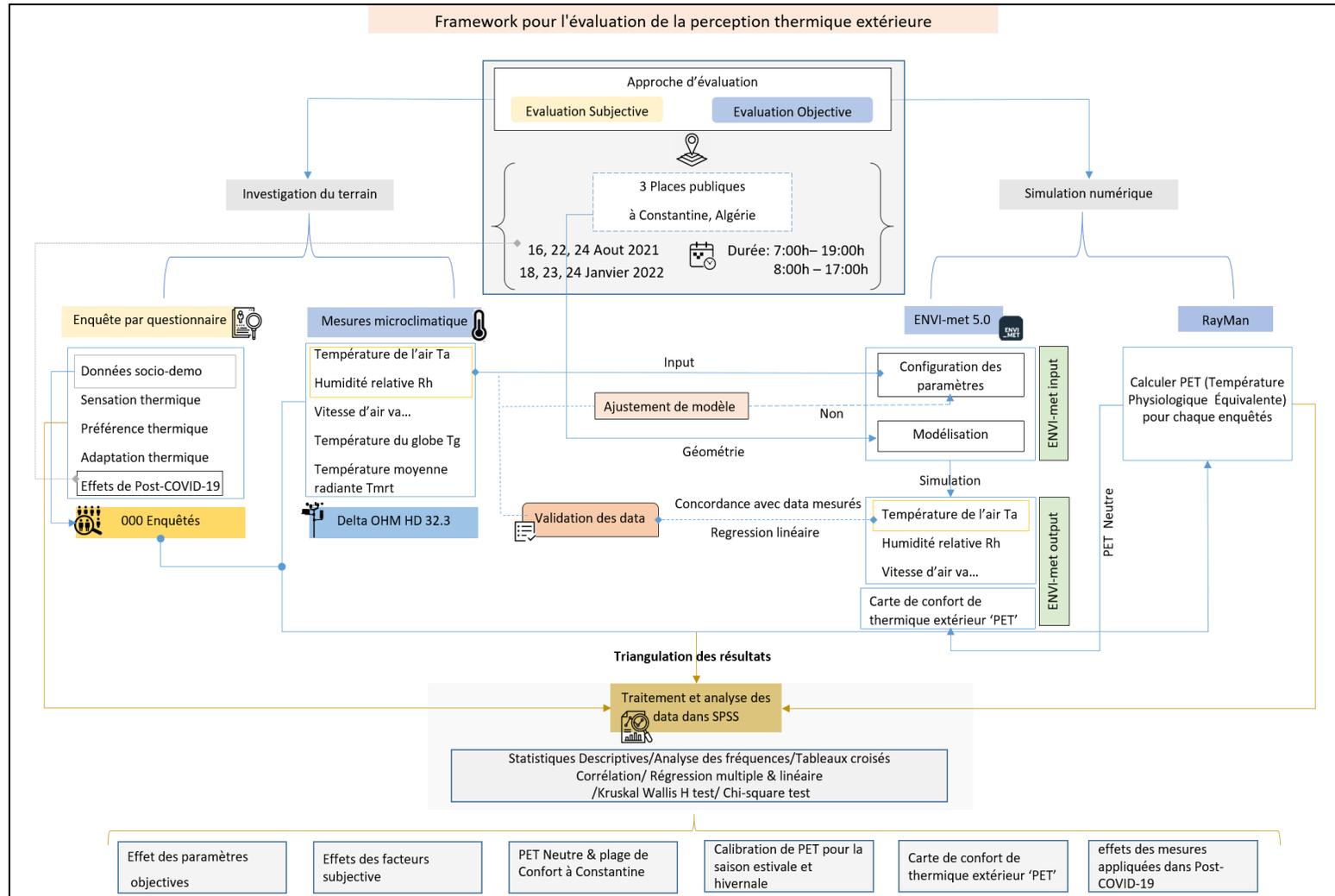
Les trois phases de la méthodologie de la recherche ont été illustrées de manière séquentielle (**Figure 4.27**). La phase initiale implique des mesures simultanées du microclimat et une enquête par questionnaire, afin de capturer les variations diurnes (facteurs objectifs) et collecter les réponses subjective des enquêtés.

Ce travail de terrain a été réalisé dans chaque site d'étude pendant 12 heures d'affilée lors de la saison estivale. Il est important de signaler que l'acquisition des données a été limitée par les règles appliquées dans la période post-COVID-19. Toutefois, pendant la période hivernale, on s'est ajusté aux conditions environnementales de cette saison ou l'investigation s'étalait de 8h à 17h sans interruptions.

La phase suivante comprend des simulations numériques à l'aide du logiciel ENVI-met pour cartographier le confort thermique extérieur en nous appuyons sur l'indice (PET). Tandis que le logiciel RayMan calcule le (PET) pour chaque répondant.

Enfin, la dernière phase aborde les procédures d'analyse et de traitement des données par le logiciel SPSS, offrant ainsi une compréhension complète des méthodes qualitatives et quantitatives employées pour interpréter les résultats obtenus.

Un aspect central de cette recherche est la possibilité de quantifier la perception thermique et d'établir une corrélation avec les données climatiques mesurées et l'indice thermo-physiologique calculé. Notre contribution réside dans la mise en place d'une méthode permettant de lier l'ensemble des données subjectives et objectives pour identifier la température neutre et la plage de confort en climat semi-aride de Constantine, puis calibrer l'indice de confort thermique. Dans les prochains chapitres, l'application de cette méthode à l'étude des trois places publiques sera élaborée.



**Figure 4.27.** Méthodologie de la recherche adoptée pour l'évaluation de la perception thermique extérieure

Source : (Auteur, 2022)

## **CHAPITRE V**

# **ENQUÊTES ET MESURES MICROCLIMATIQUES DANS LES PLACES PUBLIQUES DE CONSTANTINE**

## **CHAPITRE V : ENQUÊTES ET MESURES MICROCLIMATIQUES DANS LES PLACES PUBLIQUES DE CONSTANTINE**

### **5. Introduction**

Dans la littérature sur la perception thermique humaine, divers termes sont utilisés pour décrire différents aspects tel que : sensation thermique, insatisfaction thermique, préférence thermique, confort thermique, et neutralité thermique. Cette reconnaissance met en évidence la complexité et la subjectivité impliquées dans l'évaluation des réponses humaines aux conditions thermiques dans des situations diverses (Schweiker et al., 2018).

Ce chapitre examine la perception thermique en climat semi-aride de Constantine par une évaluation objective (quantitative) basée sur des mesures microclimatiques in situ, menées durant la période chaude (Août 2021) et la période froide (Janvier 2022). L'investigation sur terrain est complétée par une évaluation subjective (qualitative) à l'aide de l'enquête par questionnaire. Des sondages subjectifs sur la perception de l'environnement thermique dans les trois places publiques à la ville de Constantine ont été effectués, en appliquant différentes échelles de jugements perceptif, évaluatif et préférentiel.

Ce chapitre fournisse également un aperçu général sur les caractéristiques démographiques de l'échantillon, en présentant les distributions en fréquence de différents variables (âge, sexe, lieu de résidence). Par ailleurs, les différences individuelles entre les deux sexes ont été traitées en comparant les moyennes calculées de l'isolation thermique des vêtements et le taux métabolique.

En outre, les effets des variables microclimatiques (objective) et subjectives (adaptation thermique) sur la perception thermique extérieure ont été abordés pour les deux saisons distinctes. Ensuite, les effets des mesures imposées par la post-pandémie de COVID-19 dans la saison estivale (Août 2021), à savoir le port du masque ; distanciation sociale ; et couvre-feu sur le confort thermique des piétons et l'usage des espaces publiques, ont été examiné au moyen d'analyses statistiques.

## 5.1 Caractéristiques sociodémographiques de la population ciblée

Cette étude inclut 519 répondants, composée de 333 hommes (64,2%) et 186 femmes (35,8%), indiquant une disparité entre les sexes dans l'échantillon, pour des raisons culturelles et sociales le nombre d'hommes dans les espaces publics extérieurs de Constantine dépasse celui de femmes. Tel qu'illustré au (**Tableau 5.1**), les tranches d'âge sont réparties en sept intervalles la majorité des personnes questionnées étaient des jeunes, la tranche d'âge de 21 à 35 ans ayant la plus grande fréquence de répondants dans cette enquête représentant (32,6 %), suivie par les participants de moins de 20 ans (21 %).

Les pourcentages relativement faibles (7,1 %), (10,6 %), (11,9 %) coïncident aux adultes plus âgés de  $\geq 65$  ans, 56-65 ans, et 46-55 ans. Cela est dû aux deux facteurs ; la volonté des différents groupes d'âge à participer dans l'enquête, et l'accessibilité des lieux d'échantillonnage. Quant à lieu de résidence, la plupart des répondants 433 (83.4 %) résident dans la ville de Constantine, le reste (16.6 %) des individus interrogés habitent en dehors de la ville.

**Tableau 5.1.** Caractéristiques sociodémographiques de la population étudiée

Source : (Auteur, 2022)

VARIABLES		FREQUENCE	POURCENTAGE
<b>Sexe</b>	Homme	333	64,2
	Femme	186	35,8
	Total	519	100
<b>Age</b>	$\leq 20$	109	21,0
	21-35	169	32,6
	36-45	87	16,8
	46-55	62	11,9
	56-65	55	10,6
	$> 65$	37	7,1
	Total	519	100
<b>Lieu de résidence</b>	En Ville	433	83,4
	En dehors de la ville	86	16,6
	Total	519	100

Il est à noter que les impacts liés au sexe et à l'âge sur la sensation thermique extérieure ont été examinés dans différentes études. Certaines investigations de (Shooshtarian & Ridley, 2016) ont révélé des résultats non significatifs concernant l'influence de ces deux variables sur la perception thermique des individus. Alors que dans les études de Krüger et

Rossi (2011), des différences entre les sexes ont été observé, la sensibilité thermique des femmes s'accroît davantage dans les conditions plus froides et chaudes. Par ailleurs, des niveaux de sensation thermique plus élevés ont été observés au sein du sous-groupe féminin. En ce qui concerne l'âge, une diminution de pourcentage de votes en stress thermique a été remarquée pour les classes d'âge croissantes ((Pantavou et al., 2014).

Afin d'estimer l'isolation thermique des vêtements et le taux métabolique des répondants en fonction du sexe et la saison d'investigation, (**Tableau 5.2**). Une liste de contrôle prédéfinie pour le type de vêtement porté a été fournie (**Annexe A, Tableau A.2**), tandis que, le taux métabolique a été estimé en fonction de trois catégories (assis, debout détendu, marche).

**Tableau 5.2.** Valeurs moyennes de ( $I_{cl}$ ) et (MET) en fonction du sexe des répondants

Source : (**Auteur, 2022**)

Saison	Variables	Homme	Femme
<b>Eté</b>	Isolation thermique des vêtements ( $I_{cl}$ ) (CLO)	0,51	0,7
	Activité métabolique (MET)	1,4	1,6
<b>Hiver</b>	Isolation thermique des vêtements ( $I_{cl}$ ) (CLO)	1,26	1,35
	Activité métabolique (MET)	1,4	1,6

Les données moyennes d'isolation des vêtements en été pour les hommes et les femmes interrogés étaient respectivement (0,51 clo) et (0,70 clo), ce qui démontre que les femmes ont tendance à porter plus de vêtement par rapport aux hommes même dans des environnements chauds, en raison de considérations religieuses. En hiver, les hommes et les femmes portent des habits plus résistants, avec une valeur moyenne légèrement plus élevée (1.35 clo) pour les femmes, (**Tableau 5.2**).

Pour le taux métabolique, les valeurs moyennes sont identiques pour la saison froide et chaude avec un taux d'activité plus élevé (1.6 MET) pour les femmes que pour les hommes (1.4 MET). Une analyse de tableau croisé a révélé qu'au cours de (15- 30 min) avant l'enquête les activités dominantes étaient (debout détendu= 1.4) et (assis= 1 MET) pour la majorité d'hommes interrogés, avec des pourcentages notables dans les deux saisons. Cependant l'activité prépondérante chez les femmes était la (marche= 2 MET), dans la saison chaude et froide, avec des proportions importantes de (42 %) dans l'été et (56.5 %) en hiver.

## 5.2 Conditions microclimatiques des jours d'enquête 'évaluation objective'

Le **Tableau 5.3**, présente les statistiques descriptives (moyenne, minimum, maximum et écart type) de divers paramètres microclimatiques ; température de l'air (Ta), humidité relative (Rh), vitesse de l'air (Va), température du globe (Tg), et température radiante moyenne (Tmrt) enregistrées durant l'été. Et la (**Figure 5.1**) illustre les variations microclimatiques diurnes avec un intervalle d'une heure dans les trois places de l'enquête.

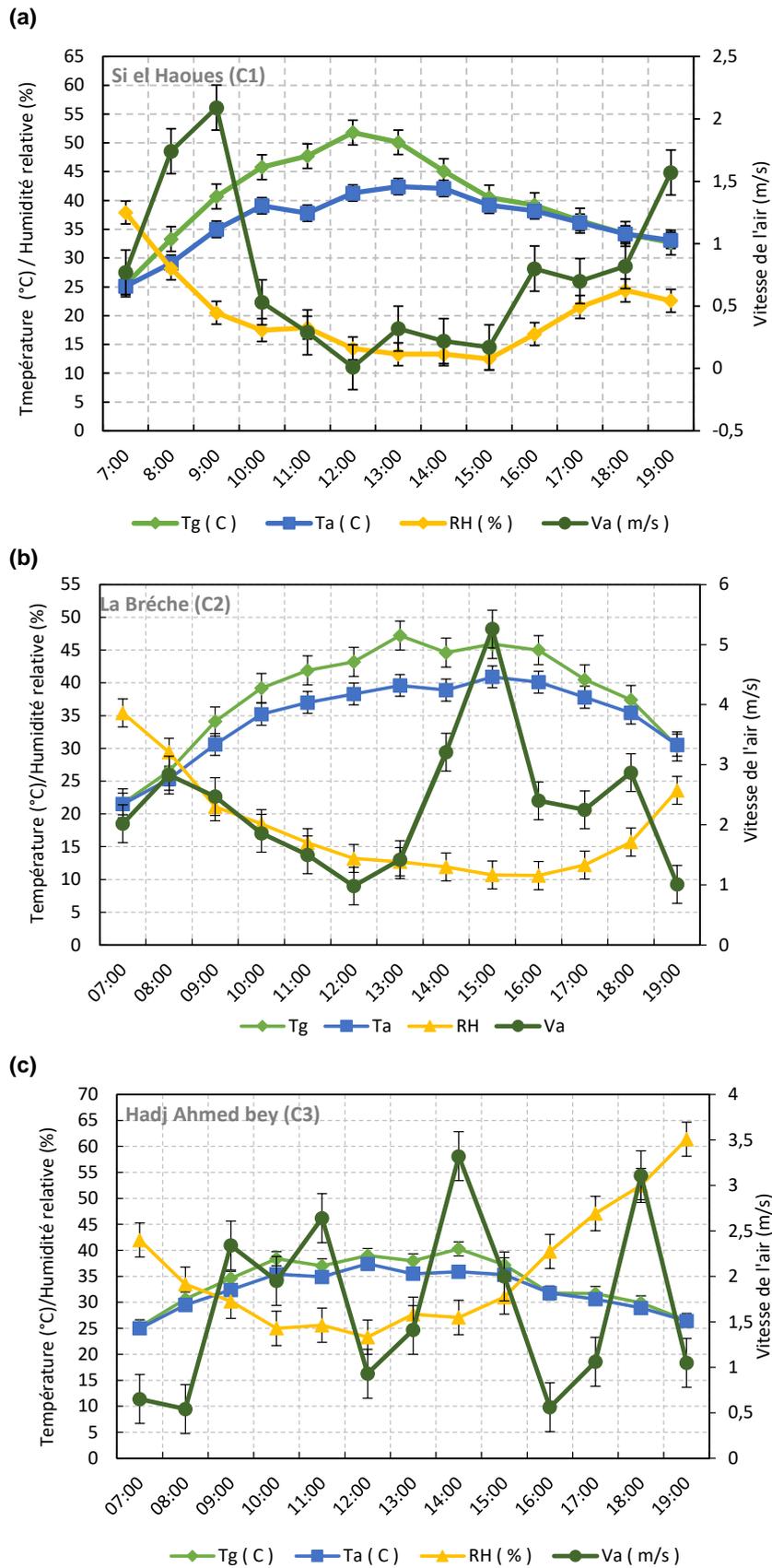
Dans l'ensemble, l'environnement thermique extérieur pendant les mesures était chaud et sec avec une température de l'air élevée, atteignant 42,4 °C (SD = 5,0 °C) à la place de *Si el Haoues* (C1), 40,9 °C (SD= 6,0 °C) à l'esplanade de La Brèche (C2), et 37,4 °C (SD= 3,9 °C) à la place Hadj Ahmed Bey (C3). Pareillement, la température radiante moyenne la plus élevée enregistrée était de 79,2 °C (SD= 17,2 °C) enregistrée à l'esplanade de La Brèche (C2). Alors que l'humidité relative moyenne variaient respectivement de (20,0 %), (17,7 %) et (35,8 %).

Des divergences distinctes entre les sites ont été observées ; les sites ouverts et sans obstacles comme l'esplanade La Brèche (C2) avec un SVF (0,94) et la place Hadj Ahmed (C3) (SVF=0,95) étaient plus venteux, (**Tableau 5.3**). Avec un enregistrement moyen de 2,3 m/s (SD= 1,1 m/s) à l'esplanade de la Brèche et 1,6 m/s (SD=0,9 m/s) à la place *Hadj Ahmed bey* (C3), alors que la vitesse moyenne de l'air détectée à la place *Si el Haoues* (C1) (SVF=0.89) était de 0,7 m/s (SD = 0,6 m/s).

**Tableau 5.3.** Statistiques descriptives des variables microclimatiques (saison chaude)

Source : (Auteur, 2021)

SITE		TA (C°)	RH (%)	VA (M/S)	TG (C°)	TMRT (C°)
<b>Place <i>Si el Haoues</i> (C1)</b>	<b>Moyenne</b>	36.3	20.0	0.7	40.2	47.4
	<b>Minimum</b>	25.1	12.5	0.0	25.4	26.6
	<b>Maximum</b>	42.4	37.9	2.0	51.8	65.0
	<b>Ecart type</b>	5.0	7.1	0.6	7.7	12.8
<b>Esplanade la Brèche (C2)</b>	<b>Moyenne</b>	36.3	17.7	2.3	38.2	54.0
	<b>Minimum</b>	21.5	10.6	0.9	21.6	22.2
	<b>Maximum</b>	40.9	35.4	5.2	47.2	79.2
	<b>Ecart type</b>	6.0	7.7	1.1	7.9	17.2
<b>Place <i>Hadj Ahmed bey</i> (C3)</b>	<b>Moyenne</b>	32.2	35.8	1.6	33.8	41.5
	<b>Minimum</b>	25.0	23.3	0.5	25.3	26.0
	<b>Maximum</b>	37.4	61.4	3.3	40.3	66.1
	<b>Ecart type</b>	3.9	11.8	0.9	4.9	11.2



**Figure 5. 1.** Variation des paramètres microclimatiques mesurés (saison chaude)

Source : Auteur (Août, 2021)

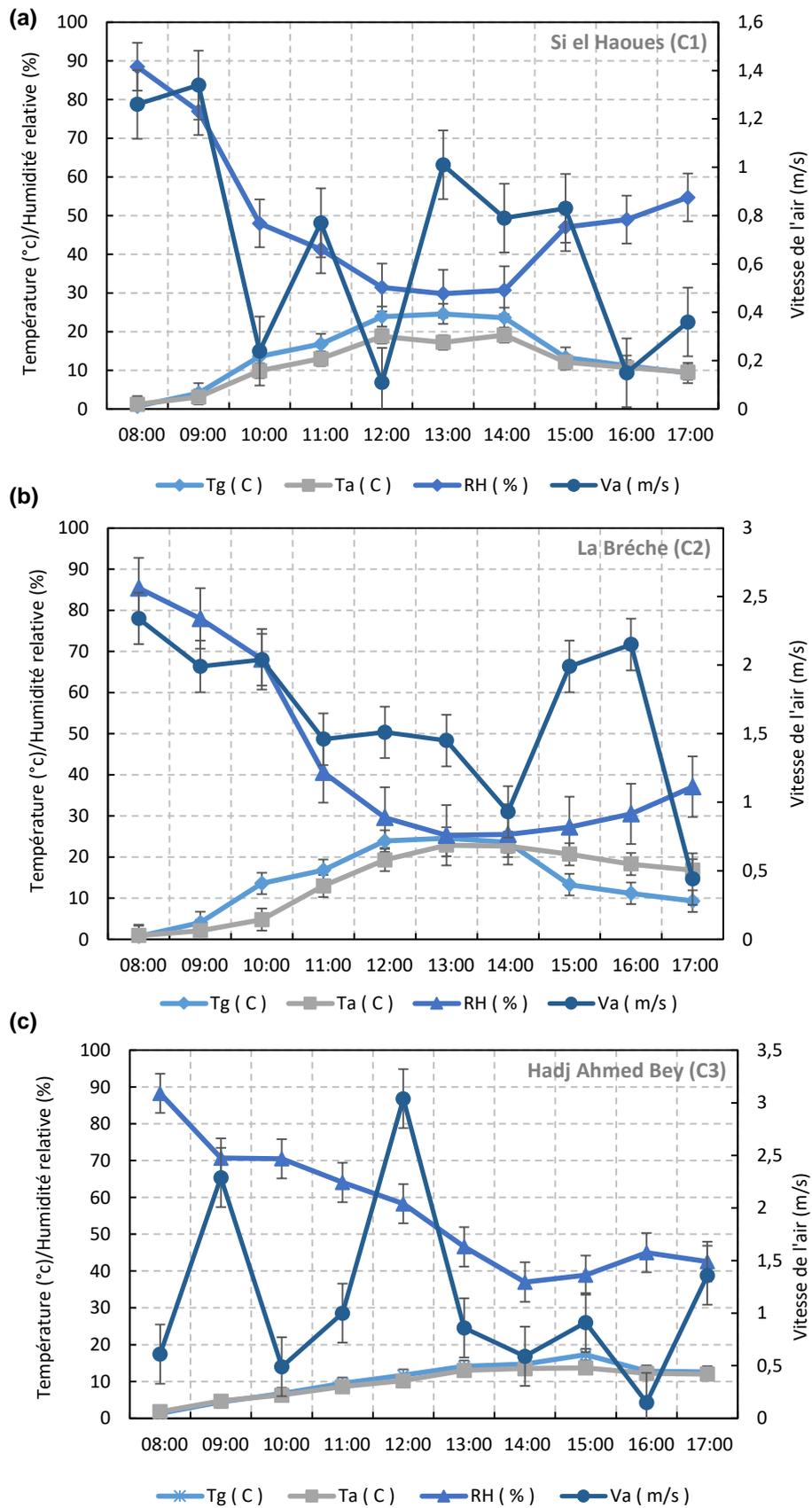
L'analyse des données micro-météorologique recueillies en hiver indique des variations significatives dans l'environnement thermique des places publiques sélectionnées, (**Tableau 5.4**). Les températures moyennes les plus élevés ont été observées à l'esplanade de la Brèche (C2) avec (Ta)= 14.2 °C (SD= 8.5) ; (Tg)= 16.9°C (SD= 10.5) ; et (Tmrt)= 28.5 °C (SD= 19.9), d'autre part les valeurs de l'écart type pour la température du globe (Tg) et la température radiante moyenne (Tmrt) sont considérablement élevées indiquant une dispersion importante dans les valeurs mesurées en regard des valeurs moyennes. Cependant, les températures moyennes minimales ont été enregistrées à la place *Hadj Ahmed bey* (C3), (Ta)= 9.6 °C (SD= 4.1) ; (Tg)= 10.5 °C (SD= 5) ; et (Tmrt)= 14.4 °C (SD= 9.6).

Il est important de noter que, Les températures minimales allant de (0.9 °C) à (1.8 °C) ont été enregistrées à 8:00 du matin, associées ainsi à des vitesses de vent maximales de (2.3 m/s) dans l'esplanade de la Brèche (C2), (1.3 m/s) dans la place *Si el Haoues* (C1), sauf dans la place *Hadj Ahmed bey* (C3) la vitesse maximales a été détecté à midi avec une valeur de (3 m/s), (**Figure 5.2**). De même, les taux maximaux de l'humidité relative ont été observés à cette heures varient de (85.4 %) à (88.5 %).

**Tableau 5.4.** Statistiques descriptives des variables microclimatiques (saison froide)

Source : Auteur (Janvier, 2022)

SITE		TA (C°)	RH (%)	VA (M/S)	TG (C°)	TMRT (C°)
<b>Place <i>Si el Haoues</i> (C1)</b>	<b>Moyenne</b>	11,5	49,7	0,7	14,1	20,7
	<b>Minimum</b>	1,2	29,8	0,1	0,7	-2,1
	<b>Maximum</b>	19,1	88,5	1,3	24,6	48,4
	<b>Ecart type</b>	6,1	19,6	0,5	8,3	15,1
<b>Esplanade la Brèche (C2)</b>	<b>Moyenne</b>	14,2	44,7	1,6	16,9	28,5
	<b>Minimum</b>	0,9	25,3	0,4	0,6	-1,7
	<b>Maximum</b>	22,9	85,4	2,3	27,2	54,0
	<b>Ecart type</b>	8,5	23,2	0,6	10,5	19,9
<b>Place <i>Hadj Ahmed bey</i> (C3)</b>	<b>Moyenne</b>	9,6	56,2	1,1	10,5	14,4
	<b>Minimum</b>	1,8	37,0	0,2	1,3	-0,1
	<b>Maximum</b>	13,7	88,3	3,0	17,3	31,4
	<b>Ecart type</b>	4,1	16,9	0,9	5,0	9,6



**Figure 5. 2.** Variation des paramètres microclimatiques mesurés (saison froide)

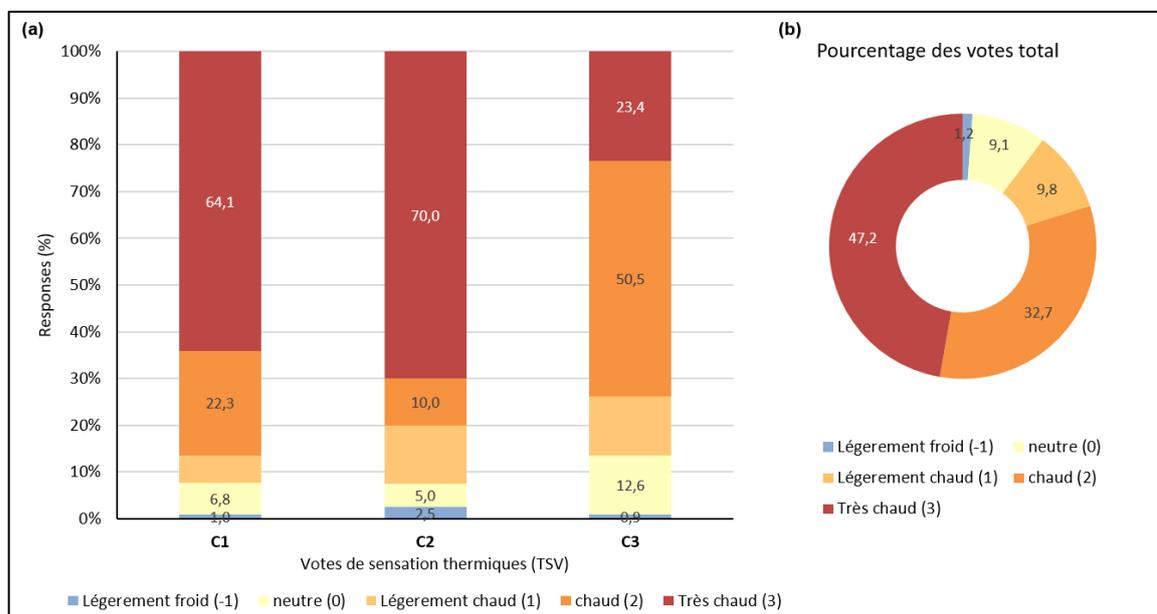
Source : **Auteur (Janvier, 2022)**

## 5.3 Perception du microclimat urbain dans la saison estivale ‘évaluation subjective’

### 5.3.1 Sensation thermique dans les espaces publics extérieurs

Sur les sites d'étude sélectionnés, une certaine similitude a été détectée dans les sensations thermiques des répondants, comme le montre la **Figure 5.3 (a)**. La sensation ‘très chaud’ (TSV=3) était prédominante avec (64 %) à la place *Si el Haoues* (C1), et (70 %) à l'esplanade de La Brèche (C2). Cependant, (50,5 %) des personnes interrogées à la place Hadj Ahmed Bey (C3) ont choisi la sensation ‘chaud’ (TSV= 2). Comme l'illustre la **Figure 5.3 (b)**, seuls (9 %) tombe dans la catégorie ‘neutre’ (TSV=0) et (1,2 %) ont choisi ‘légèrement froid’ (TSV <0), indiquant qu'une proportion faible des participant se sont senti thermiquement aise.

Les participants ont davantage ressenti un inconfort thermique, d'où la sensation thermique ‘très chaud’ (TSV=3) a été la plus élevée avec (47,2 %), suivi par des répondants qui ont signalé des votes de sensation (TSV > 0) ‘chaud’ et ‘légèrement chaud’, représentant respectivement (32,7 %) et (9,8 %), (**Figure 5.3.b**). Étant donné que, l'enquête a été menée dans des journées chaudes et ensoleillées, Comme l'illustre le (**Tableau 5.3**), il a été estimé qu'un pourcentage élevé des votes de sensation thermique sera supérieur à 0 (TSV > 0), indiquant ainsi un stress thermique lié à la chaleur dans les divers sites d'étude.



**Figure 5.3. (a)** Répartition en pourcentage des (TSV) dans les 3 places, **(b)** Votes totaux de la sensation thermique des répondants. Source : (**Auteur, 2022**)

Conformément au (**Tableau 5.5**) qui relie le (TSV) des enquêtés à la température moyenne de l'air ( $T_a$ ) mesurée, on peut constater que dans les trois places quand la

température de l'air augmentait, les sensations d'inconfort thermique (TSV>0) associé à un gêne de chaleur ont été plus fréquemment mentionnées.

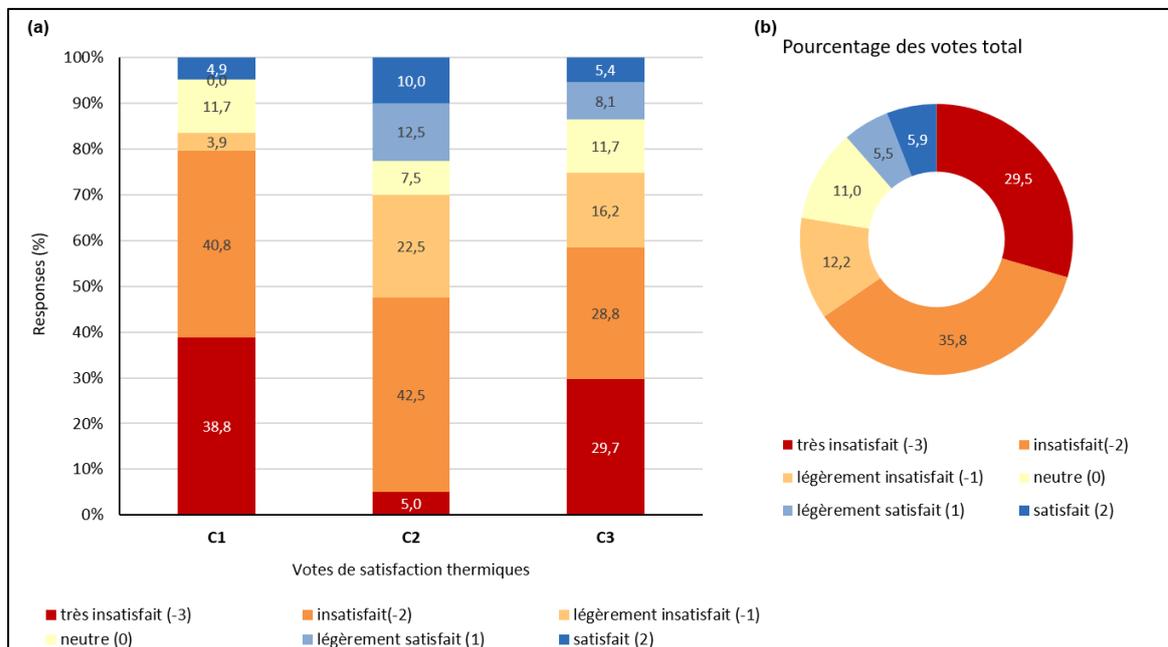
**Tableau 5.5.** Variation de la température moyenne mesurée en fonction de (TSV) des répondants

Source : (Auteur, 2021)

Site	Votes de Sensation thermique (TSV)				
	Légèrement froid (-1)	Neutre (0)	Légèrement chaud (1)	Chaud (2)	Très chaud (3)
Place <i>Si el Haoues</i> (C1)	25,0	26,4	29,1	32,3	38,8
Esplanade la Brèche (C2)	21,5	26,0	27,0	26,7	37,2
Place <i>Hadj Ahmed bey</i> (C3)	25,0	26,1	26,4	31,0	34,2
<b>Total des votes</b>	23,8	26,2	27,5	30,0	36,7

### 5.3.2 Satisfaction thermique dans les espaces publics extérieurs

Afin d'analyser et comparer le niveau de satisfaction thermique de la population interrogée concernant l'environnement thermique. La (Figure 5.4) présente la distribution en pourcentage des votes de satisfaction thermique dans les trois places étudiées.



**Figure 5.4.** (a) Répartition en pourcentage des votes de satisfaction thermique dans les 3 places, (b) Votes totaux de la satisfaction thermique des répondants. Source : (Auteur, 2022)

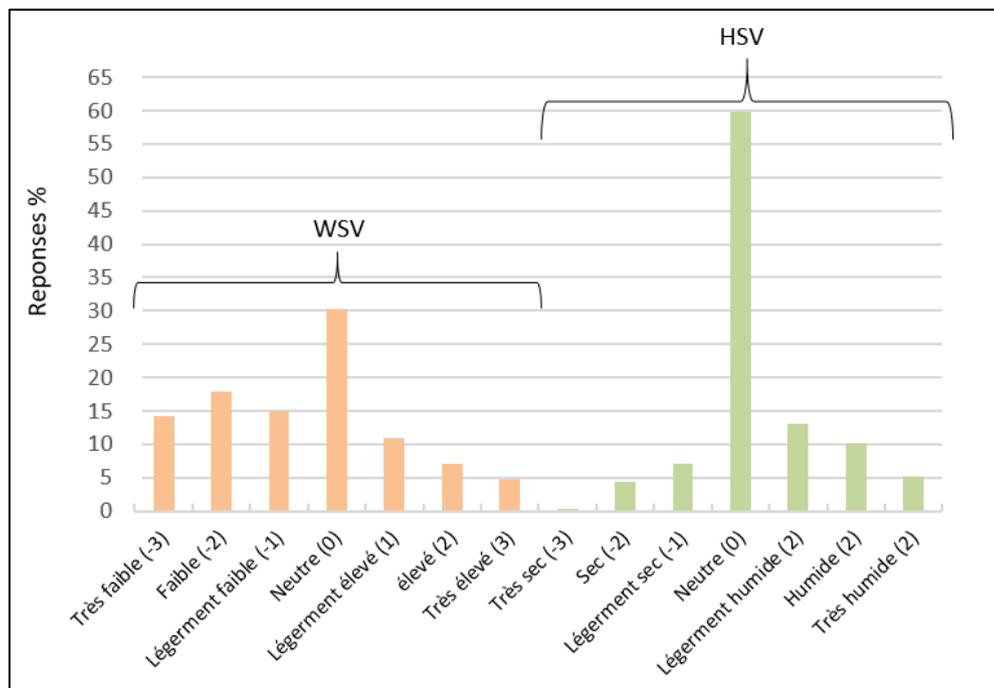
Le niveau d'insatisfaction extrême (-3) était le plus faible (5 %) dans l'esplanade de la Brèche (C2), (Figure 5.4.b), ceci peut-être expliqué par les seuils élevés de la vitesse de

l'air pendant les jours d'investigation qui varient de (0.9 m/s) à (5.2 m/s), (cf. **Tableau 5.3, pp :136**). En outre, le pourcentage le plus élevé (79,6 %) d'insatisfaction thermique comprend les niveaux (légèrement insatisfait à très insatisfait) correspond à la place *Si El Haoues* (C3) (**Figure 5.4.a**), en raison du rayonnement solaire intense ( $T_g= 51.8\text{ }^\circ\text{C}$ ) et une vitesse moyenne de l'air relativement faible ( $V_a=0.7\text{ m/s}$ ).

D'après la (**Figure 5.4.b**), des pourcentages notables (35,8 %), (29.5 %) et (12.2 %) sont observés par les personnes interrogées pour les niveaux d'insatisfaction (-3) très insatisfait à (-1) légèrement insatisfait. Les pourcentages les plus faibles (5,5 %) et (5,9 %) correspondent aux niveaux de satisfactions 'légèrement satisfaits' (-1) et (2) 'satisfaits', la catégorie 'très satisfait' (3) n'a pas été choisie par les répondants lors des journées d'investigation thermique.

### 5.3.3 Corrélation des réponses subjectives liées aux variables microclimatiques

Les enquêtés ont été demandés d'évaluer leur sensation instantanée concernant le vent et l'humidité, (**Figure 5.5**) montre la distribution en pourcentage des votes de sensation de vent (WSV) et votes de sensation d'humidité (HSV) de tous les individus interrogés durant la l'été.



**Figure 5.5.** Attribution en pourcentage de (HSV) et (WSV).

Source : (**Auteur, 2022**)

Les valeurs neutres ( $WSV=0$ ) et ( $HSV=0$ ) exposaient les proportions les plus élevées de (30.3 %) pour le (WSV) et (60 %) concerne (HSV), ce qui implique qu'un nombre

significatif des répondants ont trouvé les niveaux de vent et d'humidité ni trop élevés ni trop bas (**Figure 5.5**).

En outre, les pourcentages des votes de (WSV) ont montré une distribution sur le côté positif avec (22.7 %) pour WSV (+1) à (+3) et (47 %) sur le côté négatif de (-3) à (-1) englobant un niveau de sensation de (très faible à légèrement faible). Ce qui indique, que durant la saison estivale les répondants ont été plus sensible à la chaleur, où la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ) détecté lors de l'investigation estivale était (41.5 °C) à (54 °C), (**cf. Tableau 5.3, pp : 136**). Ce qui pouvait rendre même une brise légère de vent perçu comme rafraichissante.

D'autre part, les observations de l'humidité (HSV) sont majoritairement positives (+1) à (+3) avec un pourcentage de 28.3 % pour les sensations légèrement humides à très humide, contre seulement 11.8 % du côté négatif HSV (-1) à HSV (-3). Pourtant, pendant les journées de mesures microclimatiques, un taux relativement faible de l'humidité relatives a été enregistré allant de (10.6 %) à l'esplanade de la Brèche à (23.3 %) dans la place *Hadj Ahmed bey* (**cf. Figure 5.1, pp : 137**). Ces résultats sont en accord avec les résultats de (Nikolopoulou et Lykoudis, 2006), dans lequel la capacité des êtres humains à percevoir l'humidité était douteuse.

Le (**Tableau 5.6**), présente les résultats du test non paramétrique de Spearman entre les divers variables ordinal (TSV, WSV, HSV, et TS) dans le but d'évaluer la force et la direction de la corrélation qui existe entre les réponses subjectives. On peut déduire qu'une association négative prononcée entre le vote de sensation thermique (TSV) et le vote de satisfaction thermique (TS) est significative à un niveau de 0.01, avec un coefficient de corrélation de  $r_s = -0.622$  ( $p = 0.000$ ).

Ce qui indique, une relation linéaire inverse entre ces deux variables (TSV-TS), parallèlement quand la sensation de chaleur a tendance à augmenter la satisfaction thermique diminue considérablement. Cela résulte du stress thermique élevé, la majorité des personnes interrogées étaient insatisfaites par rapport à l'environnement thermique (77.5 %), alors que seuls 11.4 % étaient satisfaits et 11% ont voté pour neutre, (**Figure 5.5**).

De plus, la satisfaction thermique (TS) a une relation positive faible  $r_s = 0.265$  ( $p = 0.000$ ) avec la sensation au vent (WSV). De même, la sensation thermique (TSV) a une faible association négative (-0.283) avec la sensation au vent (WSV) à un niveau de signification de 0.01, (**Tableau 5.6**). Ces résultats vont à l'encontre de l'étude précédente (Krüger & Rossi, 2011) qui a signalé que l'augmentation de (WSV) a diminué significativement la

sensation à la chaleur (TSV) avec un coefficient de corrélation de (-0.78). Ce qui suggère que d'autres variables microclimatiques pourraient avoir un effet plus important sur la perception thermique que le vent, bien que la corrélation soit négative.

**Tableau 5.6.** Test de corrélation 'Spearman' entre les divers votes de sensations

Source : (Auteur, 2022)

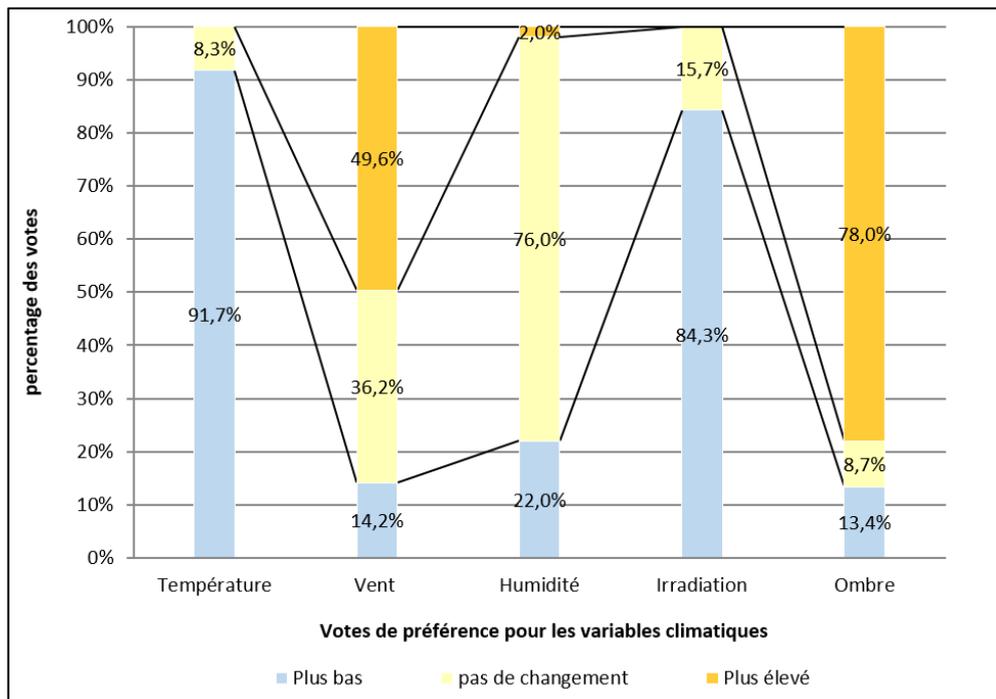
Corrélations						
			TSV	TS	WSV	HSV
Rho de Spearman	TSV	Coefficient de corrélation	1,000	<u>-0,622**</u>	<u>-0,283**</u>	<u>-0,426**</u>
		Sig. (bilatéral)		0,000	0,000	0,000
		N	254	254	254	254
	TS	Coefficient de corrélation	-0,622**	1,000	<u>0,265**</u>	<u>0,450**</u>
		Sig. (bilatéral)	0,000		0,000	0,000
		N	254	254	254	254
	WSV	Coefficient de corrélation	-0,283**	0,265**	1,000	0,319**
		Sig. (bilatéral)	0,000	0,000		0,000
		N	254	254	254	254
	HSV	Coefficient de corrélation	-0,426**	0,450**	0,319**	1,000
		Sig. (bilatéral)	0,000	0,000	0,000	
		N	254	254	254	254
** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).						
* . La corrélation est significative au niveau 0.05 (bilatéral).						

Par ailleurs, au niveau de signification de (0.01), le test de corrélation de Spearman a présenté une relation négative modéré entre (TSV) et (HSV) avec un coefficient de  $r_s = -0,426$  (valeur  $p=0,000$ ). Ce qui indique que lorsque la sensation à la chaleur augmente l'humidité perçue a tendance à diminuer et vice versa, (**Tableau 5.6**).

### 5.3.4 Aspirations liées aux variables microclimatiques

La distribution en pourcentage est basée sur l'échelle de trois points de McIntyre (1980), allant de (-1) plus bas, (0) aucun changement et (+1) plus élevé. Il a été demandé aux enquêtés de donner leur avis sur les préférences liées aux conditions microclimatiques pour les cinq variables (Ta, Rh, Va, radiation solaire et ombre) pendant la saison estivale comme illustrée dans la (**Figure 5.6**).

Les préférences dominantes ont été une température plus basse (91.7 %), moins de radiations solaires (84.3 %), et plus d'ombre (78 %), pour atténuer le stress thermique et améliorer le confort thermique extérieur durant un été chaud. Pour les autres variables, la majorité (76 %) n'a pas exprimé de changement pour l'humidité, sauf une proportion de (22 %) ont désiré une humidité plus basse pourtant les valeurs moyennes mesurées lors de l'investigation ont été basses variant de (18 % à 36 %).



**Figure 5.6.** Variation des votes de préférences liées aux variables microclimatique

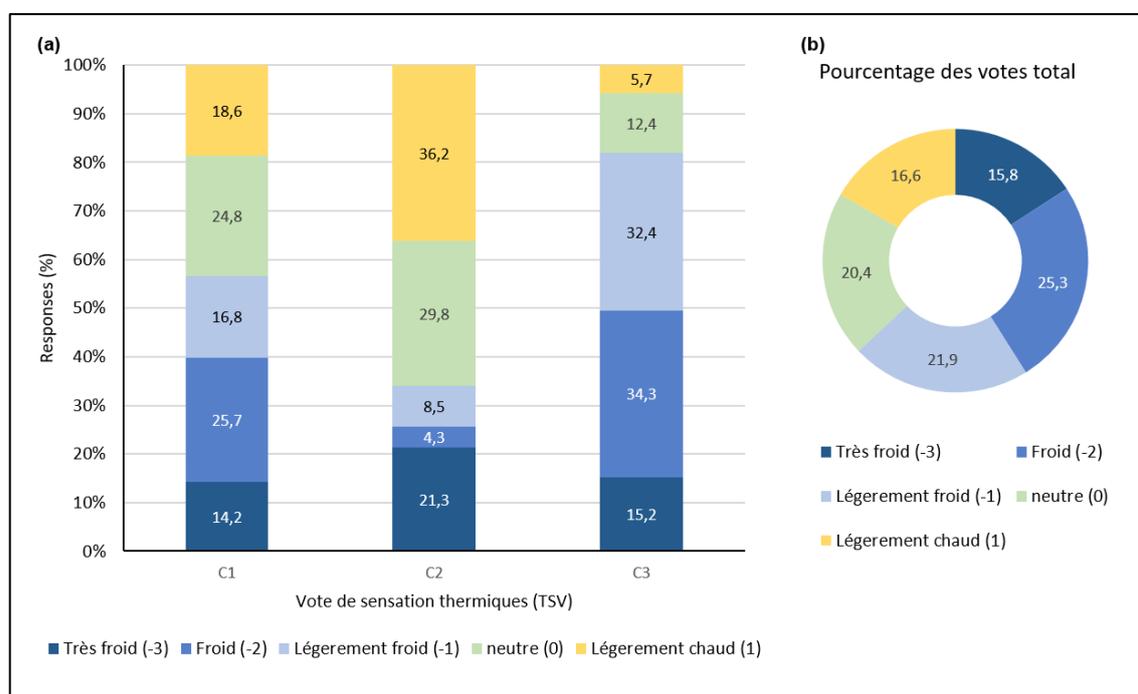
Source : (Auteur, 2022)

Ce qui suggère que la perception subjective des répondants concernant l'humidité pourrait être influencée par des attentes basées sur des expériences antérieures, où d'autres facteurs comme les températures élevées qui peuvent conduire à une préférence pour une humidité plus basse afin de compenser l'effet d'inconfort thermique. Il est important de noter que pendant l'étude in situ, la température radiante ( $T_{mrt}$ ) maximale détectée était ( $79.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) à l'esplanade de la Brèche, (cf. **Tableau 5.3, pp : 136**). En ce qui concerne la vitesse de vent (49.6 %) ont préféré un vent plus élevé, afin d'apporter plus de fraîcheur et augmenter l'effet de la ventilation naturelle.

## 5.4 Perception du microclimat urbain dans Saison hivernale ‘évaluation subjective’

### 5.4.1 Sensation thermique dans les espaces publics extérieurs

En se référant à l'échelle d'évaluation de 7 points de l'ASHRAE (55), qui s'étendant de (-3) « très froid » à (+3) « très chaud », où le point médian (TSV = 0) se rapporte à la sensation neutre. La **(Figure 5.7)** montre la distribution en pourcentage des votes de sensation thermique (TSV) pour la saison hivernale. La majorité des votes 25.3 % tombe dans la catégorie froide (-2) comme l'illustre-la **(Figure 5.7.b)**, le pourcentage diminue en se déplaçant vers l'extrémité la plus froide de l'échelle (TSV), avec environ 16 % des interrogés déclarent une sensation thermique très froide.



**Figure 5.7.** (a) Classification en pourcentage de (TSV) dans les 3 places, (b) Votes totaux de la sensation thermique des enquêtés. Source : (Auteur, 2022)

Le pourcentage de votes neutres (TSV=0) et légèrement froid (TSV=-1) dans les trois places était (20.4 %), et (21.9 %), ce qui suggère qu'une grande partie des participants se sentis thermiquement confortable durant la saison froide de l'étude **(Figure 5.7.b)**. En accord avec les recherches menées dans des climats où les fluctuations moyenne annuelle de la température de l'air sont inférieures à 20 °C (comme à Tianjin ou à Athènes), les répondants pourraient être mieux adaptés aux conditions légèrement froides ou chaudes (Lai et al., 2014; Tseliou et al., 2017). En effet pendant la saison froide dans ces climats des taux élevés de votes de neutralité ont été observés.

D'après la **(Figure 5.7.a)**, le nombre cumulé de votes pour la sensation allant de (-1) « légèrement froid » à (-3) « très froid » dans la place *Hadj Ahmed bey* (C3) indique un stress thermique élevé de (81.9 %) dû au froid. Une proportion relativement faible de (5.7 %) des questionnés a eu légèrement chaud dans cette place. Tandis que, du côté chaud de l'échelle, la grande partie des participants (36.2 %) dans l'esplanade de la Brèche (C2) ont choisi la catégorie légèrement chaude (1), suivie par la place *Si el Haoues* (C1) avec un pourcentage de (18.6 %). Ceci est attribuable aux données de la température moyenne ( $T_a$ ), étant donné que la valeur la plus basse (9.6 °C) était enregistrée dans la place *Hadj Ahmed bey* (C3). Aussi la moyenne de la température radiante ( $T_{mrt}$ ) était la plus basse (14.4 °C) dans cette place par rapport à (28.5 °C), et (20.7 %) pour l'esplanade de la Brèche (C2) et la place *Si el Haoues* (C1) respectivement, (cf. **Tableau 5.4, pp : 138**) qui présente les mesures microclimatiques dans les trois places.

Comme il ressort du **(Tableau 5.7)** qui illustre la fluctuation de la température de l'air moyenne enregistrée lors de l'enquête en fonction de la perception thermique (TSV), On peut distinguer que les répondants évoquent plus fréquemment une sensation thermique négatifs (TSV<0) face à des températures ressenties plus froide par exemple pour une température moyenne de 9.9 °C et 4.8 °C le vote moyen de sensation thermique est de l'ordre de (-2) et (-3).

**Tableau 5.7.** Variation de ( $T_a$ ) moyenne mesurée en fonction de (TSV)

Source : **(Auteur, 2023)**

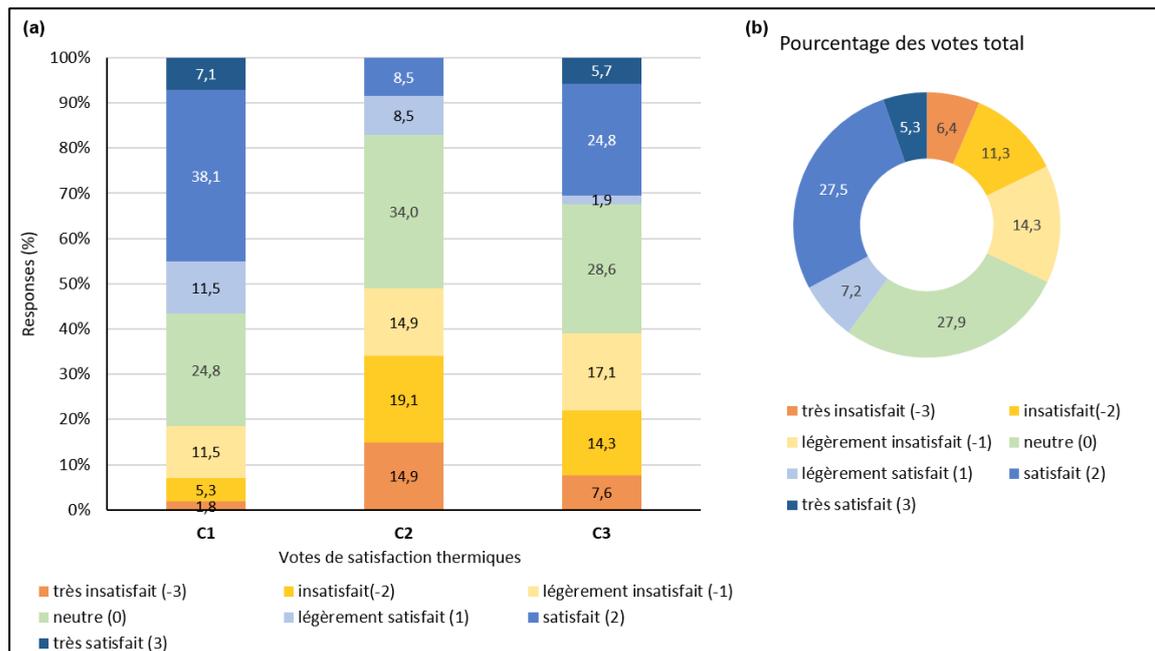
Site	Votes de Sensation thermique (TSV)				
	Très froid (-3)	Froid (-2)	Légèrement froid (-1)	Neutre (0)	Légèrement chaud (1)
<b>Place Si el Haoues (C1)</b>	6,3	13,0	15,1	16,1	17,8
<b>Esplanade la Brèche (C2)</b>	2,8	4,8	14,9	17,4	20,3
<b>Place Hadj Ahmed bey (C3)</b>	5,6	12,0	10,6	10,6	12,4
<b>Total des votes</b>	4,9	9,9	13,5	14,7	16,8

#### 5.4.2 Satisfaction thermique dans les espaces publics extérieurs

En se référant à la **(Figure 5.8.a)**, le plus grand pourcentage de satisfaction thermique (56.6 %) a été enregistré dans la place *Si el Haoues* (C1) englobant des votes qui variaient de légèrement satisfait (+1) à très satisfait (+3), suivi par (32.4 %) dans la place *Hadj Ahmed bey* (C2). Les niveaux de satisfaction thermiques (+2 à +1) ont de pourcentage faible de (17

%) dans l'esplanade de Brèche (C3) toutefois, des proportions notables d'insatisfaction thermique (48.9 %) sont observés pour les catégories : (-1) « légèrement insatisfait » à (-3) « très insatisfait ».

Dans l'ensemble, durant la période hivernale place *Si el Haoues* (C1) présente l'endroit thermiquement le plus confortable avec un haut niveau de satisfaction thermique et peu de votes d'insatisfaction thermique. En raison des basses températures ambiantes enregistrées dans la place *Hadj Ahmed bey* (C3) elle est thermiquement moins satisfaisante que la place *Si el Haoues* (C1).



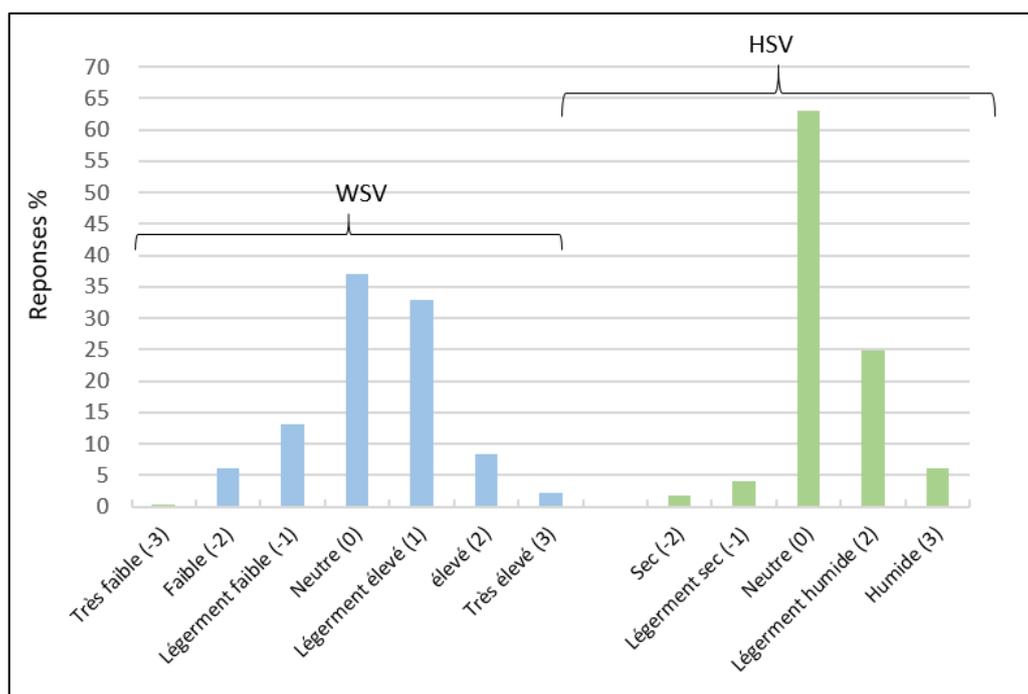
**Figure 5.8.** (a) Répartition en pourcentage des votes de (TSV) dans les 3 places, (b) Votes totaux de la satisfaction thermique des enquêtés. Source : (Auteur, 2022)

En ce qui concerne, les votes totaux de satisfaction thermique (**Figure 5.8.b**), les pourcentages les plus élevés correspondaient aux catégories neutres avec (27.9 %) et satisfait par (27.5 %). Indiquant ainsi qu'un grand nombre de répondants étaient plutôt satisfait des conditions thermiques au cours de l'investigation hivernale. Par contre, des proportions faibles de (6.4 %) et (11.3 %) ont exprimé une insatisfaction thermique. En somme, bien qu'un pourcentage substantiel des votes soit neutre, c'est-à-dire un nombre significatif de personnes n'étaient ni satisfait ni insatisfait de l'environnement thermique. On observe une tendance générale vers la satisfaction thermique combinant des votes positifs allant de (+1) légèrement satisfait à (+3) très satisfait.

### 5.4.3 Corrélation des réponses subjectives liées aux variables microclimatiques

La (Figure 5.9) expose la variabilité des votes de sensation du vent (WSV) et de l'humidité (HSV) sur une échelle de 7 points pendant la saison hivernale. Les valeurs neutres (WSV=0) et (HSV=0) étalent les pourcentages les plus élevés des votes de sensation de vent (37 %) et d'humidité (63 %), ce qui implique qu'un nombre significatif des répondants ont trouvé les niveaux de vent et d'humidité ni trop élevés ni trop bas.

De plus, les observations de l'humidité (HSV) sont majoritairement positives, légèrement humides (+1) et humide (+2) avec un total de 31 % pour les deux sensations, contre seulement 6 % du côté négatif légèrement sec (-1) et sec (-2). Ce qui est peut-être dû aux conditions microclimatiques durant la période hivernale où la valeur moyenne maximale de l'humidité relative (Rh= 56 %) a été mesurée à la place *Hadj Ahmed bey* (C3), (cf. **Tableau 5.4, pp : 138**).



**Figure 5.9.** Distribution en pourcentage des votes de (HSV) et (WSV).

Source : (Auteur, 2022)

Néanmoins, la répartition des votes de sensation du vent (WSV) s'étalait sur les catégories négatives avec 19.6 % pour WSV= (-1 à -3) et 43.4 % combinant les échelles positives légèrement élevé (+1) à très élevé (+3), indiquant une sensibilité accrue au froid même les vitesses de vent relativement faibles détectées durant l'investigation hivernale peuvent entraîner une gêne.

Les résultats de corrélation de Spearman présentés dans le (**Tableau 5.8**) soulignent l'association positive entre (TSV) et la satisfaction thermique (TS), tout en montrant également les relations négatives entre les différentes réponses subjectives perçus (TSV, WSV, HSV), avec des coefficients de corrélation allant de -0.248 à 0.393.

À un niveau de signification de 1 % une corrélation modérée de  $r_s = 0.393$  ( $p=0,000$ ) entre (TSV) et (TS), indiquant qu'à mesure que la sensation thermique augmente la satisfaction thermique évolue ainsi dans la même direction et vice versa. Ceci peut être expliqué par le niveau de satisfaction élevé dans la période hivernale, vu que (40 %) des répondants sans compter ceux qui ont choisi subjectivement la neutralité (28 %) étaient thermiquement confortable, (**Figure 5.8**). Ou potentiellement influencé par l'habitude qui intervient dans la formation des perceptions subjective des individus (Nikolopoulou & Steemers, 2003), et dans lequel les répondants peuvent s'adapter aux conditions thermiques auxquelles sont exposés.

**Tableau 5.8.** Test de corrélation 'Spearman' entre les divers votes de sensations

Source : (**Auteur, 2022**)

			<b>Corrélations</b>			
			<b>TSV</b>	<b>TS</b>	<b>WSV</b>	<b>HSV</b>
<b>Rho de Spearman</b>	<b>TSV</b>	Coefficient de corrélation	1,000	<b><u>0,393**</u></b>	<b><u>-0,248**</u></b>	<b><u>-0,281**</u></b>
		Sig. (bilatéral)		0,000	0,000	0,000
		N	265	265	265	265
	<b>TS</b>	Coefficient de corrélation	0,393**	1,000	<b><u>-0,307**</u></b>	-0,136*
		Sig. (bilatéral)	0,000		0,000	0,026
		N	265	265	265	265
	<b>WSV</b>	Coefficient de corrélation	-0,248**	-0,307**	1,000	0,199**
		Sig. (bilatéral)	0,000	0,000		0,001
		N	265	265	265	265
	<b>HSV</b>	Coefficient de corrélation	-0,281**	-0,136*	0,199**	1,000
		Sig. (bilatéral)	0,000	0,026	0,001	
		N	265	265	265	265

**\*\*.** La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

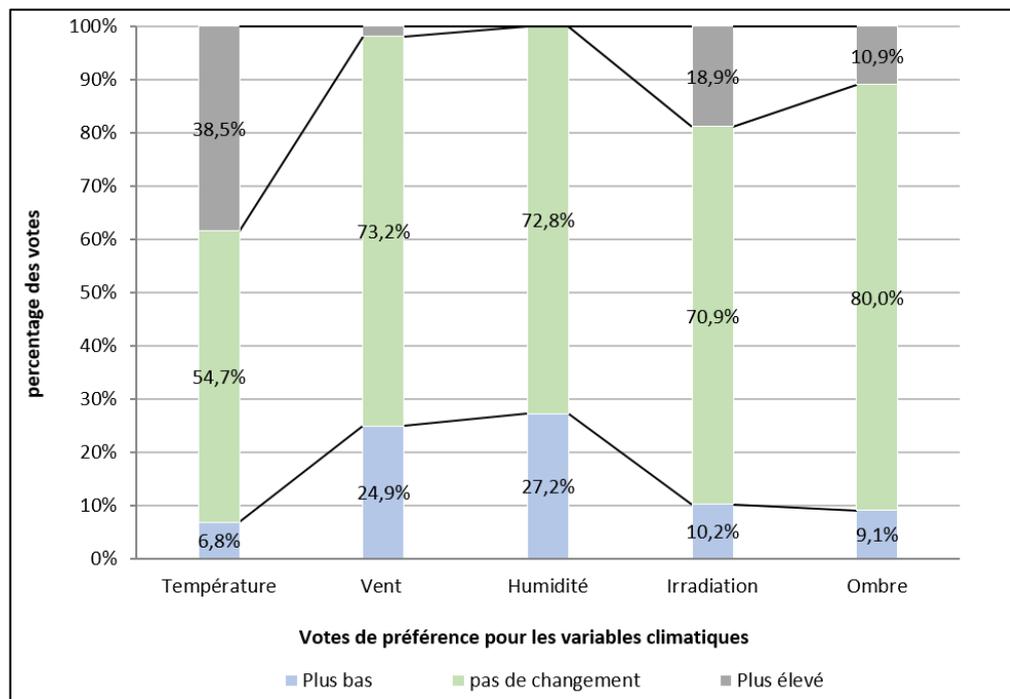
La sensation thermique a une corrélation négative faible avec (WSV)  $r_s = -0.248$  ( $p=0,000$ ) et (HSV)  $r_s = -0,281$  ( $p=0,000$ ), (**Tableau 5.8**). Ce qui signifie, une relation

linéaire inversée, cela résulte des proportions élevées (63 %) et (37%) des valeurs neutres (HSV=0) et (WSV=0) présentées dans la section précédente. Ces résultats sont en accord avec l'étude précédente de (Yang et al, 2013) qui montrait que le (HSV) avait une influence faible sur le (TSV) (avec un coefficient de corrélation de (-0.09). En fait, l'effet de l'humidité sur la perception thermique est susceptible d'être différent selon la plage et la valeur de l'humidité.

En outre, le vote de satisfaction thermique (TS) a une corrélation négative modérée de (-0,307) avec le vote de sensation du vent (WSV), statistiquement significative au niveau de 1%. Ce qui révèle que, lorsque la sensation au vent augmente, la satisfaction thermique diminuait, ce qui est attendu dans des ambiances thermiques froides.

#### 5.4.4 Aspiration (Préférences) liés aux variables microclimatiques

En examinant la (Figure 5.10) qui expose les préférences des répondants par rapport aux variables microclimatiques, la majorité des participants ont voté pour aucun changement, soit (54.7 %) pour la température de l'air ; (73%) pour la vitesse des vents ; (73 %) pour l'humidité ; (71 %) pour l'ensoleillement ; et (80 %) pour l'ombre, ce qui révèle une nette préférence pour les conditions climatiques investigués dans la période hivernale.



**Figure 5. 10.** Variation des votes de préférences liées aux variables microclimatique

Source : (Auteur, 2022)

Toutefois, il est intéressant de noter qu'un pourcentage non négligeable (38.5 %) préférerait une température plus chaude et (18.9 %) souhaiteraient une radiation solaire plus importante. Des pourcentages faibles de (6.8 %) et (10.2 %) ont désiré une température plus basse et moins d'ensoleillement, avec (11 %) qui ont souhaité une ombre plus abondante dans les places publiques en hiver (**Figure 5.10**), afin d'apporter plus de fraîcheur et un confort thermique accru. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une partie des participants ayant ressenti une sensation de chaleur modérée (TSV= +1), représente 16.6 % des total de votes pour la sensation thermique (**cf. Figure 5.7, pp : 146**).

Pour la vitesse de l'air seulement (25 %) des participant ont souhaité un environnement moins venteux, car la vitesse moyenne enregistré lors des journées d'investigation était relativement faible (0.7 m/s) dans la place *Si el Haoues*, (1.6 m/s) dans l'esplanade de la Brèche, et (1.1 %) dans la place *Hadj Ahmed bey*, (**cf. Tableau 5.4, pp : 138**).

## **5.5 Effets des variables objectives et subjectives sur la perception thermique extérieure**

### **5.5.1 Paramètres microclimatiques**

Cette analyse vise à quantifier la variation et l'influence de chaque paramètre microclimatique sur la perception thermique subjective dans la saison estivale et hivernale. Dans un modèle de régression linéaire, le vote de sensation thermique (TSV) était la variable dépendante (prédite) et les variables indépendantes (explicatives) incluent quatre paramètres du microclimat : la température de l'air ( $T_a$ ), la température radiante moyenne ( $T_{mrt}$ ), l'humidité relative (Rh), et la vitesse de l'air ( $V_a$ ), tel que démontré dans des recherches précédentes de (Yang et al., 2013; Zhao et al., 2016; Hadianpour et al., 2018). D'autres travaux de (Nikolopoulou, 2004) et (Cheng et al., 2012), ont impliqué dans l'évaluation de la perception thermique par les variables microclimatiques le rayonnement solaire plutôt que la température radiante moyenne.

Le vote de sensation thermique (TSV) dans la saison estivale était significativement liés aux variables microclimatiques,  $F(-4\ 249) = 180,953$  ( $p < 0,0005$ ), avec un coefficient de détermination de  $R^2 = 0,74$ , (**Annexe C, Tableau C.1**). La valeur de  $R^2$  suggère qu'environ 26 % de la variation du (TSV) ne peut pas être expliqué par ce modèle, il peut avoir d'autres variables non incluses qui peuvent contribuer également à la variation de la perception thermique extérieure.

Cette forte relation positive entre les paramètres microclimatiques combinés ( $T_a$ ,  $T_{mrt}$ ,  $R_h$ ,  $V_a$ ) et la sensation thermique des répondants a également été confirmée par le coefficient de régression  $R= 0,863$ . D'après le tableau des Significations partielles (**Annexe C, Tableau C.3**), l'équation (5.1) de prédiction de la sensation thermique pendant l'été à Constantine peut être développé comme suit :

$$TSV= -4.946 + 0.153T_a + 0.027T_{mrt} + 0.012R_h + 0.143V_a \quad (R^2= 0.74) \quad (5.1)$$

L'analyse a montré que toutes les variables indépendantes contribuaient de manière significative au modèle, l'ampleur des coefficients (0.153 ; 0.143 ; 0.027 ; 0.012) indique la contribution et l'importance respective de chaque variable ( $T_a$ ,  $V_a$ ,  $T_{mrt}$ ,  $R_h$ ) au (TSV) prédit. Par conséquent, il a été révélé que la température de l'air ( $T_a$ ) était le paramètre le plus significatif qui influença considérablement les sensations thermiques des répondants. Ces résultats sont généralement conformes aux recherches précédentes menées dans un climat méditerranéen (Nikolopoulou & Lykoudis, 2007), où la température de l'air et l'irradiation solaire étaient les paramètres les plus importants affectant la sensation thermique des piétons et l'usage des espaces urbains extérieurs.

Dans la saison hivernale, l'équation (5.2) a été dérivée d'une analyse de régression multiple en poursuivant la même approche précédente, (**Annexe C, Tableau C.4/C.6**). Les coefficients positifs indiquent que l'augmentation des variables indépendantes tels que : la température de l'air ( $T_a$ ) ; la température radiante moyenne ( $T_{mrt}$ ), et l'humidité relative ( $R_h$ ) induisent une augmentation du variable dépendant (TSV).

$$TSV= -7.079 + 0.263T_a + 0.028T_{mrt} + 0.048R_h - 0.120V_a \quad (R^2= 0.57) \quad (5.2)$$

Cependant, le coefficient négatif (-0.120) de ( $V_a$ ) suggère une corrélation inverse, l'élévation de la vitesse de l'air en hiver implique une sensation thermique plus froide. De plus, les coefficients  $T_a$  (0.263) ;  $V_a$  (-0.12) ;  $R_h$  (0.048) ; et  $T_{mrt}$  (0.028) indiquent respectivement l'effet significatif de chaque paramètre microclimatique sur la perception thermique des enquêtés.

Par suite, la température de l'air ( $T_a$ ) est la variable le plus influent sur (TSV) parmi les variables prises en compte. Ainsi, la valeur de coefficient de détermination ( $R^2 = 0,57$ ) indique approximativement que (57 %) de la variation dans la sensation thermique (TSV) des répondant en hiver peut s'expliquer par la combinaison linéaire de ces quatre variables microclimatiques ( $T_a$ ,  $V_a$ ,  $R_h$ ,  $T_{mrt}$ ).

En résumé, les équations linéaires (5.1) et (5.2) quantifient les relations entre les différents paramètres microclimatiques (indépendantes) et la sensation thermique subjective (variable prédite) en été et en hiver, permettant ainsi une compréhension plus approfondie des changements dans ces facteurs environnementaux qui pourraient influencer la perception thermique extérieure.

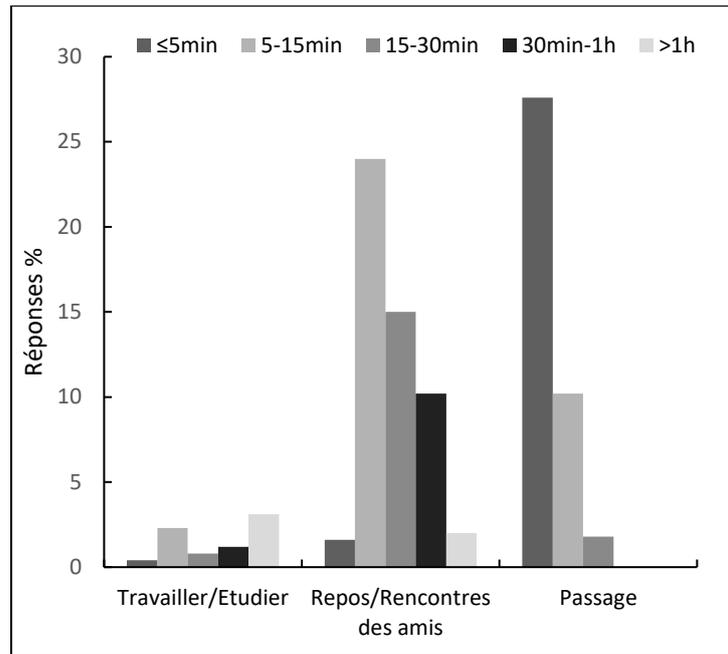
### 5.5.2 Adaptation thermique et comportements adaptatifs

Pour examiner l'effet de l'adaptation thermique y compris (l'adaptation comportementale et psychologique), nous avons étudié l'impact de (TSV) sur la base des réponses à cinq questions sur les facteurs subjectifs (**Annexe B, Figure B.1**) : le motif de la visite de la place, le temps d'exposition, la fréquence des visites, activité précédentes et histoire thermique à court-terme, et également le comportement adaptatif. Un test non-paramétrique de *Kruskal-Wallis H* a été appliqué pour évaluer la différence entre les variables et comparer plus de deux groupes indépendants. Toutes les données ont été exposées sur la base d'un intervalle de confiance de 95 % avec un niveau de signification de 0,05.

#### a) Saison chaude

**Raison de visite** : les réponses sur les raisons de la visite des places publiques ont été classées en trois catégories : 1) travailler, 2) repos/rencontre des amis et 3) passage. La majorité (52,8 %) fréquentait les places publiques étudiées pour se reposer et se réunir, avec une durée d'exposition variant de ( $\leq 5$  min) à ( $> 1$ h), le pourcentage le plus élevé (24 %) correspond à un temps de (5-15 min), suivi par (15 %) pour une durée de (15-30 min), et enfin (10.2 %) pour une durée plus prolongée de (15-30 min), seulement (2 %) des répondants ont choisi de rester dans les places publiques pour une durée plus longue ( $> 1$ h), (**Figure 5.11**).

Alors que le motif principal 'de passage' appartenait à une proportion notable de (39.6 %) dont (27.6 %) ont resté pour une courte durée de ( $\leq 5$  min). Ainsi, quelques personnes (7,9 %) sont venues pour travailler dans les petits cafés et les stands de restauration rapide. Ce qui suggère qu'au fur et à mesure que le temps d'exposition (en été) augmente, les motifs de visite se déplaçaient vers des activités plus intentionnelles (repos/socialisation) et (travail).



**Figure 5.11.** Variation de la raison de visite en fonction du temps d'exposition des enquêtés  
 Source : (Auteur, 2023)

Par ailleurs, le test *Kruskal-Wallis H* a révélé une différence significative avec ( $H=24.761$ ) et ( $p < 0,05$ ) pour les différentes raisons de visite, (Annexe D, Tableau D.1), indiquant que la raison de la visite affectait les sensations thermiques des enquêtés. Des résultats similaires ont été trouvés par (Johansson et al., 2018) à Guayaquil, en Équateur, où les personnes qui se trouvaient sur le lieu de l'entretien pour des rencontres et socialisation ont accepté un SET\* plus élevé (31 °C) que ceux qui ne faisaient que passer par là (28 °C).

- **Temps d'exposition :** bien que la plupart des personnes interrogées (52,8 %) ont visité les places publiques pour le repos/rencontre des amis, il convient de noter qu'elles y restaient en moyenne 5 à 30 minutes (39 %) ; suivies de (10,2 %) se reposent pendant plus de 30 minutes et seulement (2 %) restaient plus d'une heure, (Figure 5.11).

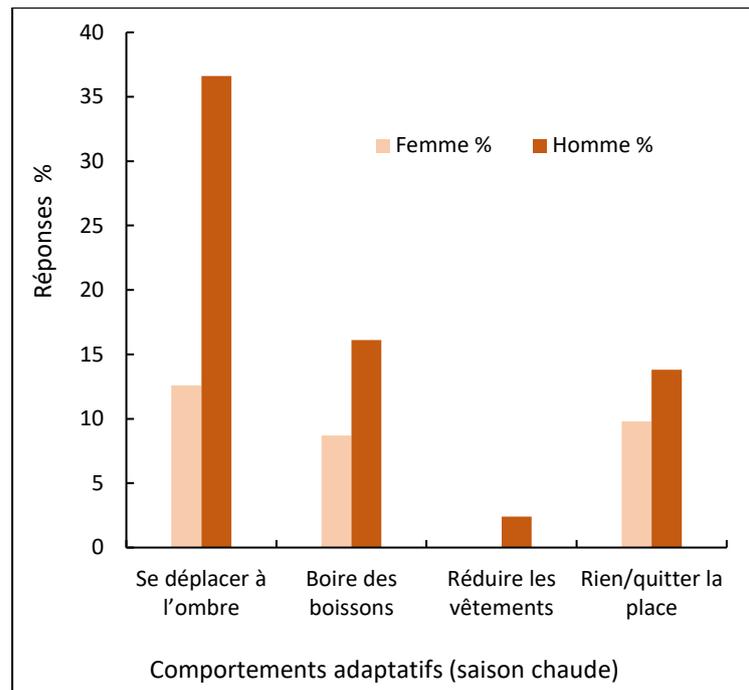
Le test H de *Kruskal-Wallis* a révélé que, statistiquement, le temps d'exposition des personnes interrogées n'entraîne aucune disparité significative dans la sensation thermique des répondants avec ( $H=6,552$ ) et ( $p = 0,119$ ), (Annexe D, Tableau D.2). Cela est peut-être expliqué par la variabilité de temps d'exposition entre les répondants ce qui rendrait moins probable la détection des différences entre les différents groupes de temps d'exposition. En accord avec les résultats de (Yang et al, 2013), où la sensation thermique des piétons ne dépendait pas des différents temps d'exposition.

- **Activités antérieures et historique thermique à court terme** : en accord avec les résultats d'une enquête saisonnière menée dans le climat très chaud et sec de l'Arizona, aux États-Unis (Middle), les activités précédentes (assis, debout, marche) réalisées par les intervenants n'ont pas affecté leur sensation thermique. Le test *Kruskal-Wallis H* a indiqué que même si la sensation thermique des participants n'était pas statistiquement différente pour les activités précédentes avec ( $H= 4,799$ ) et ( $p = 0,187$ ) (**Annexe D, Tableau D. 3**), elle était statistiquement significative pour l'histoire thermiques à court-terme avec ( $H= 29,251$ ) et ( $p < 0,05$ ), (**Annexe D, Tableau D. 4**).

Plus de 24 % des personnes interrogées sont passées d'un environnement intérieur à un environnement extérieur au cours des 15 à 30 minutes précédant l'enquête, le reste (76 %) est resté à l'extérieur, indiquant que les attentes des personnes interrogées en matière de conditions thermiques dans les sites d'étude ont été affectée par l'histoire thermique à court-terme.

- **Comportement adaptatif** : les personnes interrogées ont répondu à la question suivante : « si vous ressentez une chaleur excessive dans cette place, quelles mesures envisageriez-vous ? » Quatre types de mesures ont été proposés dans l'enquête. L'analyse croisée du comportement adaptatif en fonction du sexe des participants est illustrée dans la (**Figure 5.12**). Les résultats indiquent que les hommes et les femmes (49,2 %) préféraient la mesure de 'se déplacer vers l'ombre des arbres/abris' afin de réduire leur inconfort thermique.

Cependant, des différences sont observées dans leur deuxième choix de mesure : les hommes (16,1 %) ont opté pour 'boire des boissons', tandis que le choix des femmes (9,8 %) était 'Rien/quitter la place'. Une proportion faible d'hommes (2,4 %) a envisagé la réponse adaptative 'réduire les vêtements', aucune femme n'ayant choisi cette dernière réponse (**Figure 5.12**), ce qui peut être attribué au fait que le degré de vêtements a déjà été diminué en raison des températures élevées et ne peut être minimisé davantage pour des raisons culturelles.



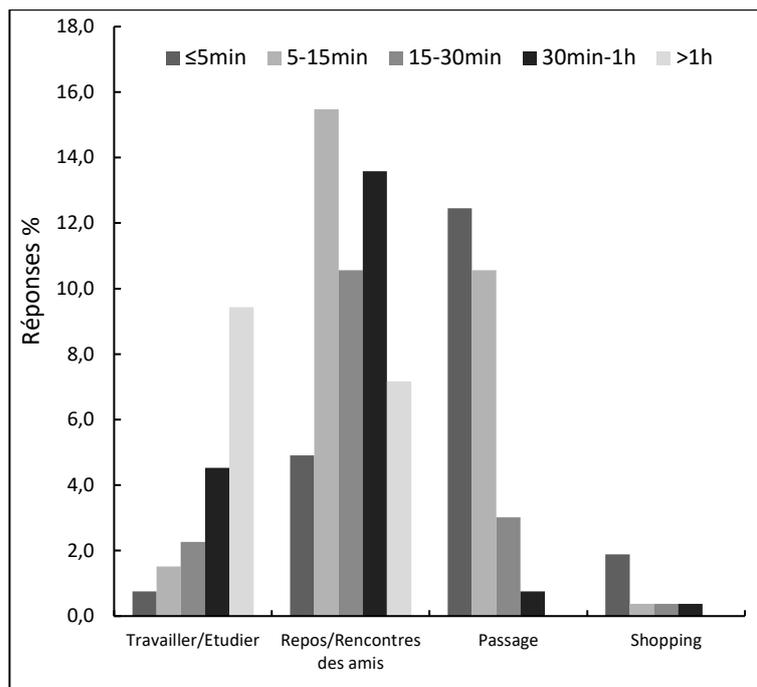
**Figure 5.12.** Répartition du comportement adaptatif selon le sexe des répondants

Source : (Auteur, 2023)

Sur la base de l'analyse du *Kruskal-Wallis*, il existe une différence significative dans la sensation thermique des répondants avec ( $H=23,698$ ) et ( $p < 0,05$ ), (**Annexe D, Tableau D.5**). Ce résultat souligne l'importance d'ajustement comportemental, qui représente une action immédiate et corrective pour réduire l'inconfort thermique humain, incluant toutes les modifications (personnelles, environnementales ou culturelles) qu'un individu peut entreprendre (Brager & de Dear, 1998).

#### b) Saison froide

- **Raison de visite** : la (**Figure 5.13**) présente la répartition des raisons (motifs) de visite des places pendant l'hiver selon le temps d'exposition des enquêtés aux conditions environnementales. Le motif principal était le 'repos/rencontre des amis' avec un pourcentage de (51.7 %) avec une durée d'exposition prolongée allant de (5min) à (>1h), un faible pourcentage de (5 %) présente les personnes interrogées qui ont été de passage.



**Figure 5.13.** Variation de la raison de visite en fonction du temps d'exposition des répondants

Source : (Auteur, 2023)

Environ (18.5 %) des interrogés ont venue aux diverses places pour ‘travailler/étudier’, ce qui explique le pourcentage élevé (9.4 %) pour la durée de (>1h), toutefois, le pourcentage relativement faible de (3 %) correspond au motif ‘Shopping’. A savoir que, le test de *Kruskal-Wallis H* a montré que la sensation thermique (TSV) n’était pas significativement différente ( $H=,958$ ) et ( $p = 0,811$ ) entre les différents objectifs de visite (**Annexe D, Tableau D.6**), ce qui indique que la raison de la visite ne peut pas affecter de manière significative la sensation thermique en hiver.

- **Temps d’exposition** : d’après la **Figure 5.13**, le temps d’exposition le plus court ( $\leq 5$  min) correspond au motif ‘Passage’, cependant, à mesure que la durée d’exposition s’allonge (5-15 min) à (>1h), les raisons de visite changeaient vers des activités plus prolongées comme (travailler/étudier).

Ainsi, les résultats du test H de *Kruskal-Wallis* ont indiqué que la sensation thermique (TSV) diffère pour les répondants ayant de temps d'exposition différents ( $H= 18,034$ ) et ( $p=0.01$ ), (**Annexe D, Tableau D.7**). Ce qui rejette l’hypothèse nulle qui suppose l’absence de différence dans la perception thermique subjective entre les divers temps d’exposition en hiver. Ce résultat conforme avec l’analyse de (Wang et al., 2017).

- **Activités antérieures et histoire thermique à court terme** : les résultats de test H de *Kruskal-Wallis* ( $H= 4,430$ ) et ( $p= 0.219$ ) indiquent statistiquement qu’il n’y a pas une

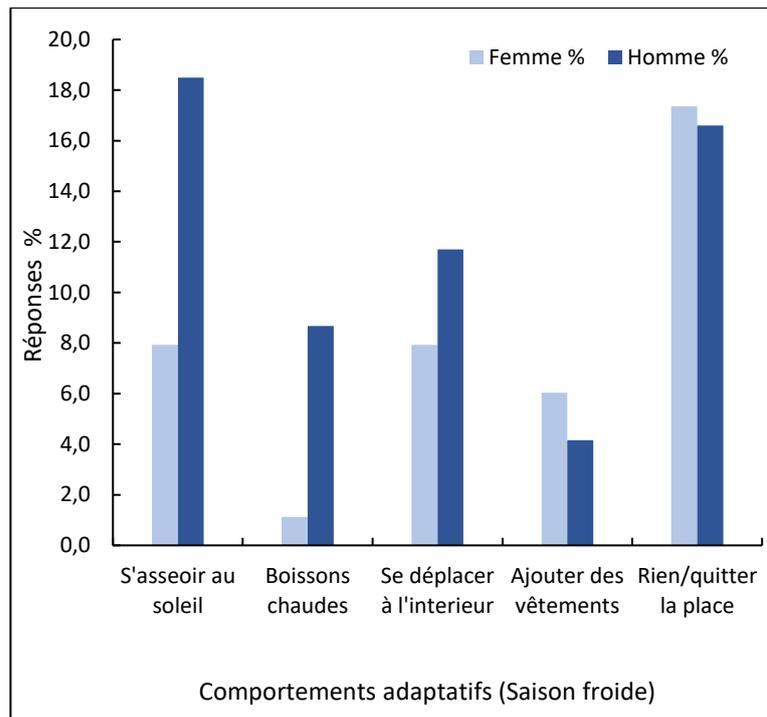
différence significative dans la sensation thermique des répondants entre les divers groupes d'activité précédente (assis, debout, marche) (**Annexe D, Tableau D.8**). Ce qui suggère que dans le contexte de l'étude hivernale ce type d'activité n'a pas un effet substantiel sur les votes de sensation thermique.

Également, certaines recherches (Hwang & Lin, 2007; Nikolopoulou & Lykoudis, 2006) révèlent que la perception thermique dans les espaces extérieurs est plus influencée par l'environnement thermique immédiat que par les activités précédentes. En ce qui concerne les expériences thermiques récentes dans (15-30 min) des répondants, notamment (à l'extérieur au soleil, à l'extérieur sous l'ombre, à l'intérieur avec chauffage, à l'intérieur sans chauffage). Le test de *Kruskal-Wallis H* a montré une différence significative dans la sensation thermique (TSV) entre les différents groupes de l'histoire thermique à court-terme avec ( $H=19.341$ ) et ( $p=0.0002$ ), (**Annexe D, Tableau D.9**).

- **Comportements adaptatifs** : les résultats du test de *Kruskal-Wallis* indique que les différences observées dans les comportements adaptatifs (s'asseoir au soleil, boisson chaude, se déplacer à l'intérieur, ajouter des vêtements, et rien/quitter la place) et la sensation thermique des répondants ne sont pas statistiquement significatives avec ( $p=0.887$ ), (**Annexe D, Tableau D.10**).

Ce qui est peut-être expliqué par la variabilité individuelle (isolation thermique des vêtements, niveaux d'activité) et environnementale dans la saison hivernale, dans lesquels l'individu perçoit le seuil de confort thermique de manière distincte et réagit en réponse au stimulus thermiques. Sur la base de données disponible, on peut conclure que le stress thermique dû au froid ne peut pas être atténué par des actions comportementales immédiates.

En outre, la (**Figure 5.14**) compare les comportements adaptatifs envisagés par les deux sexes en réponse aux conditions extérieures froides, la mesure 'rien/quitter la place' était le comportement adaptatif le plus fréquent chez les deux sexes avec un pourcentage de (17.4 %) pour les femmes et (16.6 %) chez les hommes.



**Figure 5.14.** Répartition du comportement adaptatif selon le sexe des répondants

Source : (Auteur, 2023)

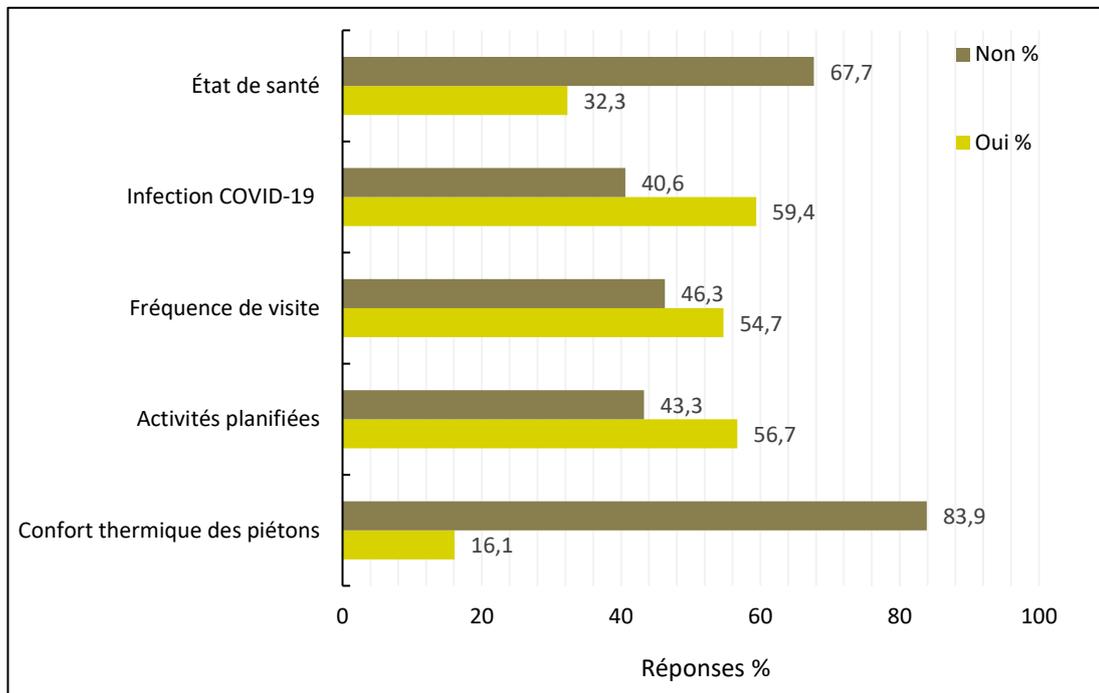
Cependant, le comportement adaptatif le plus répondu chez les hommes était ‘s’asseoir au soleil’ avec un pourcentage élevé de (18.5 %), une proportion de (8 %) des femmes ont opté pour cette mesure, cette attitude visible des femmes envers la protection solaire sont fréquemment observés dans les espaces extérieurs, ce mécanisme comportemental liés au sexe a été confirmé dans l’étude de (Lin et al, 2009). Ainsi, les femmes ont envisagé ‘d’ajouter plus de vêtement’ avec une proportion de (6 %) contre (4.2 %) pour les hommes. En somme, cette analyse souligne l’influence du sexe sur le comportement adaptatif et indique les potentielles variations dans la perception thermique et les stratégies d’atténuation individuelles.

### 5.5.3 Effets des mesures liées au post-COVID 19

L'apparition soudaine du COVID-19 a posé des problèmes et des défis sans précédent à l'étude des espaces publics extérieurs, où de nouvelles mesures ont été imposées pour prévenir la propagation du virus et faire face aux menaces pour la santé publique.

Plus précisément, (1) la distanciation sociale, appelée également « distanciation physique », impliquant un espace d'au moins six pieds entre les individus à l'extérieur (Sun & Zhai, 2020). (2) le port de masque facial obligatoire, car le masque facial a été considéré comme la mesure principale et la plus rentable pour contrôler et atténuer la transmission du

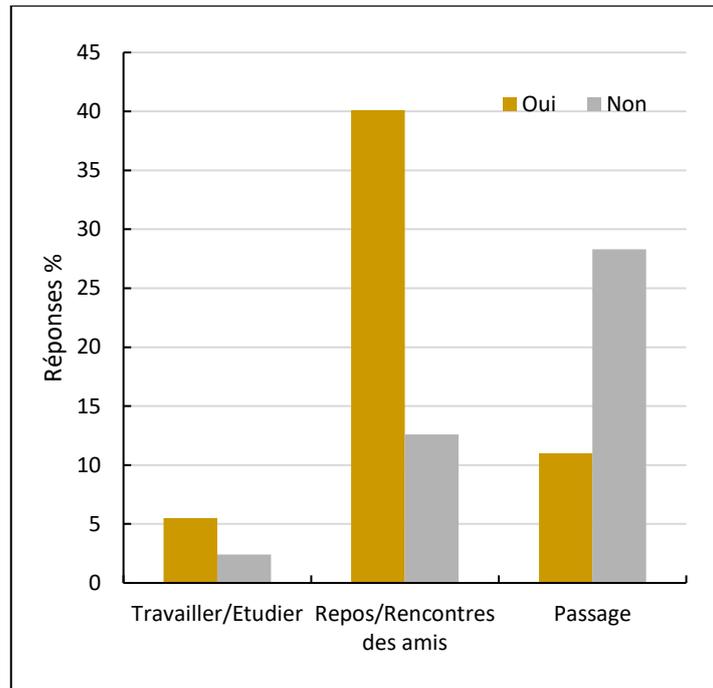
COVID-19 entre les personnes (Tang et al., 2022). (3) Les restrictions de confinement et de couvre-feu ont affecté l'usage des espaces extérieurs et les activités en plein air des individus (Rice et al., 2020).



**Figure 5.15.** Effets des mesures liées COVID-19 (couvre-feu, distanciation sociale, masque facial).  
Source : (Auteur, 2022)

La plupart des visiteurs des trois places publiques étudiées (67,7 %) étaient en bonne santé et ne présentaient aucune maladie chronique. Même pendant l'été 2021, (59,4 %) des participants ont déclaré qu'ils avaient déjà eu le COVID-19, (Figure 5.15). Ainsi, plus de la moitié (54,7 %) des personnes interrogées ont déclaré que le couvre-feu et les restrictions sociales ont entraîné un changement dans la fréquence de visites des sites étudiés.

De plus, (56,7 %) des individus questionnés ont exprimé que la distanciation physique pendant la période post-pandémique avait affecté leurs activités planifiées dans les places publiques, environ (40 %) des participants qui se rendent aux places pour le repos et d'autres activités sociales ont révélé qu'ils ont été influencés par les mesures imposées, (Figure 5.16).



**Figure 5.16.** Analyse de la tabulation croisée des ajustements des activités planifiées

Source : (Auteur, 2022)

Cependant, (28 %) des personnes qui ont seulement une activité transitoire (passage) ont indiqué que la distance sociale ne les avait pas influencées, puisqu'elles restaient en général moins de cinq minutes (Figure 16). Ensuite, la majorité des participants (84 %) ont estimé que le port d'un masque facial à l'extérieur diminuait leur confort thermique, seulement (16 %) des porteurs de masques faciaux se sentaient thermiquement à l'aise (**Figure 5.16**). Comme l'expliquaient (Roberge et al., 2012), le port d'un masque facial de protection à une charge de travail faible à modérée a un impact sur la thermorégulation humaine et par conséquent, la fréquence cardiaque, la température centrale et la sensation thermique étaient légèrement élevées.

Par ailleurs, un test du Chi-2 a été utilisé pour vérifier s'il existe statistiquement une différence significative dans les proportions de réponses précédentes, (**Annexe E, Tableau E.1**). De ce fait, deux hypothèses ont été proposées : l'hypothèse nulle supposait que les proportions étaient identiques (si la valeur  $p > 0,05$ ), et l'hypothèse alternative suggérait que les proportions étaient différentes (si la valeur  $p < 0,05$ ). À partir des résultats listés dans le (**Tableau 5.9**), les proportions de réponses sont significativement différentes avec une valeur Chi-2 de 4.551 ( $p = 0,03$ ) pour les activités planifiées et Chi-2 de 116.472 ( $p < 0,05$ ) pour la perception thermique des répondants.

En revanche, la valeur statistique de Chi-2 pour la fréquence de visite était 2.268 (valeur  $p = 0.12$ ) indiquant l'absence de différence significative, ce qui suggère que la fréquence de visite des places publiques par les répondants n'était pas associée aux effets de la post-pandémie. Dans l'ensemble, la pandémie de COVID-19 a affecté deux variables, et a une influence très probable sur la perception thermique des piétons.

**Tableau 5.9.** Résultats du Test Chi-2 pour les mesures appliquées durant post-COVID 19  
Source : (Auteur, 2022)

<b>Test Statistiques</b>			
	<b>Fréquence de visite</b>	<b>Perception thermique des piétons</b>	<b>Activités planifiées</b>
<b>Chi-2</b>	2,268 <sup>a</sup>	116,472 <sup>a</sup>	4,551 <sup>a</sup>
<b>dl</b>	1	1	1
<b>Sig. Asymp</b>	0,132	0,000	0,033
<b>a.0 cellules (,0 %) ont des fréquences attendues inférieures à 5. La fréquence minimale attendue pour une cellule est de 127,0</b>			

Dans ce contexte, une étude récente (Zhou & Dong, 2023) a mené une série d'expériences sur l'effet des masques chirurgicaux (fréquemment utilisé) sur le confort thermique extérieur incluant 42 sujets dans différentes saisons. Les résultats ont mis en évidence que, dans un environnement chaud le port de masques faciaux réduit le confort thermique des sujets et que l'inconfort associé au masque s'est aggravé pour les sujets qui marchaient que pour ceux qui étaient assis. En outre, l'inconfort lié au port du masque augmentait lorsque le climat devenait plus chaud, affectant considérablement le visage et certaines parties du thorax.

## **Conclusion**

D'après les variations microclimatiques diurnes enregistrées, la saison estivale est caractérisée par un environnement thermique chaud et sec avec des températures moyennes de l'air culminantes s'étant de (32.2 °C) à (36.3 °C), un taux d'humidité faible variant de (17.7 %) à (35.8 %), et avec des variations significatives pour la vitesse d'air moyenne de (0.7 m/s) à (2.3 m/s). Cependant, dans la saison hivernale une variation significative dans les conditions thermique des places publiques a été observée, où les moyennes minimales de la température de l'air (9.6 °C) et de la température radiante (14.4 °C) ont été mesurés à la place *Hadj Ahmed bey*, et les valeurs maximales (14.2 °C) et (28.5 °C) ont été détecté à l'esplanade de la Brèche.

À Constantine en été la température de l'air peut atteindre 42 °C dans les places publiques, la sensation de très chaud TSV (+3) était prédominante avec (47,2%) ; la majorité des personnes interrogées (77,5%) étaient insatisfaites de leur environnement thermique. Alors que, des pourcentages notables de satisfaction thermique dans la période hivernale ont été soulignés, car durant les jours d'enquête une tendance vers les niveaux de sensation thermique neutre (22 %) et légèrement froid (20.4 %) a été observé par rapport à la sensation froide.

Pour les votes de sensation de vent (WSV) et de l'humidité (HSV), les pourcentages les plus élevés dans les deux saisons appartenaient à des valeurs neutres. De plus, le test non paramétrique de *Spearman* entre les réponses subjectives liées aux variables microclimatiques a révélé une forte corrélation négative entre la sensation thermique et la satisfaction thermique dans la saison chaude. Tandis qu'en hiver une corrélation positive modérée entre la sensation thermique et la satisfaction thermique, révélant que la sensation thermique et la satisfaction thermique évoluait dans la même direction.

C'est pourquoi, la majorité des participants ont opté pour aucun changement dans les aspirations liées aux variables microclimatiques, ce qui a révélé une nette préférence pour les conditions climatiques investiguées dans la période hivernale.

L'analyse de la régression multiple entre la perception thermique (variable dépendante) et les paramètres microclimatiques (variables indépendantes) a démontré que dans la saison estivale la perception thermique était significativement liée aux variables microclimatiques ( $T_a$ ,  $R_h$ ,  $T_{mrt}$ ,  $V_a$ ) avec un coefficient de détermination de ( $R^2=0.76$ ). Et pour la saison froide un coefficient de détermination de ( $R^2=0.57$ ) a été trouvé. Il est à noter que la température de l'air était le facteur le plus influent sur la perception thermique subjective durant l'investigation estivale et hivernale.

Les résultats du test H de *Kruskal-Wallis* pour l'adaptation thermique ont indiqué que la sensation thermique (TSV) diffère pour les répondants ayant de temps d'exposition distincts en hiver, mais en été le temps d'exposition n'entraînait aucune disparité significative dans la perception thermique des répondants. Néanmoins, l'histoire thermique à court terme a une influence significative sur la perception thermique subjective durant les deux saisons (été et hiver). Les activités précédentes (15- 30 min avant l'enquête) n'avaient statistiquement pas d'effet significatif sur leurs sensations thermiques dans les deux saisons.

Et en termes de comportement adaptatif, « se déplacer à l'ombre » était la mesure privilégiée par les hommes et les femmes pour réduire l'inconfort thermique dû à la chaleur.

L'analyse du Kruskal-Wallis a indiqué une différence significative dans la sensation thermique des répondants avec ( $p < 0,05$ ). Cependant, en hiver malgré les variations observées dans les comportements adaptatifs adoptés par les enquêtés le test H de Kruskal-Wallis n'a révélé aucune différence significative avec ( $p > 0,05$ ).

En outre, une attention particulière a été accordée aux effets des restrictions liées au COVID-19 sur l'usage des espaces publics et la perception thermique des piétons pendant la période post-pandémique (Août 2021). Les résultats du test non paramétrique du Chi-2 ont démontré que les protocoles de distanciation sociale influençaient les activités planifiées et que le port de masque facial diminuait le confort thermique perçu des répondants. Mais, la fréquence des visites des places publiques étudiées n'a pas été affectée par les mesures mises en place dans la post-pandémie.

## **CHAPITRE VI**

# **NEUTRALITÉ THERMIQUE ET CALIBRATION DE L'INDICE DU CONFORT EN CLIMAT SEMI-ARIDE**

## CHAPITRES VI : NEUTRALITÉ THERMIQUE ET CALIBRATION DE L'INDICE DU CONFORT EN CLIMAT SEMI-ARIDE

### 6. Introduction

Étudier et comprendre la perception des individus afin de soutenir la conception et l'exploitation d'environnements bâtis confortables est un défi théorique et pratique permanent, en raison de la complexité et du caractère multidimensionnel du confort thermique (Schweiker et al., 2020).

Après avoir discuté les résultats issus de l'investigation microclimatique et l'enquête par questionnaire dans le chapitre précédent, nous allons aborder dans ce chapitre les différences de la perception thermique reportées par les enquêtés (TSV) sous différents niveaux de stress thermo-physiologiques (PET), en adoptant la méthode de la régression linéaire.

Par ailleurs, la température neutre pour la saison chaude (Août 2021) et la saison froide (Janvier 2022) a été déterminée, puis la plage de neutralité thermique pour le climat semi-aride de Constantine a été identifiée, les résultats sont comparés et contextualisés par rapport à d'autres études similaires effectuées dans divers climats.

Ce chapitre abordera aussi la calibration de l'indice du confort thermique (PET), où les différentes échelles de sensation thermique ont été modifiées pour le climat semi-aride de Constantine.

En suivant une approche comparative les résultats ont été analysés en prenant en compte des recherches antérieures sur la calibration de l'indice (PET). Ensuite les cartes du confort thermique extérieur générées à l'aide du logiciel de simulation numérique ENVI-met, ont été analysées pour les trois sites d'étude sur la base de l'indice (PET) calibré et pour la période estivale et hivernale.

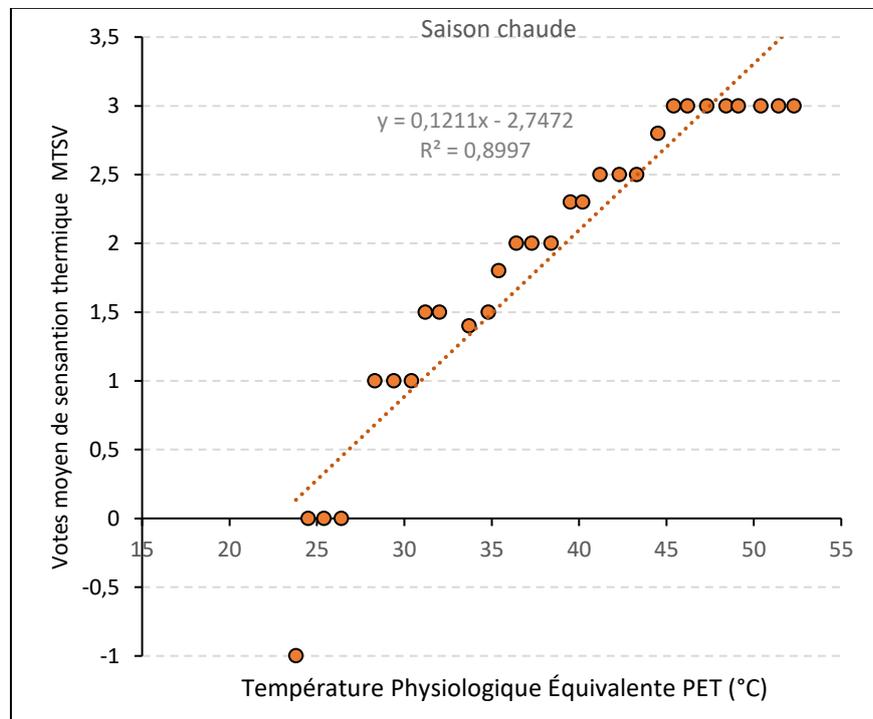
## 6.1. Confort thermique en climat semi-aride de Constantine

### 6.1.1 Sensibilité thermique et température neutre de la saison estivale

Il s'agit d'établir une relation entre les réponses subjectives de la perception thermique des enquêtés (TSV) assemblées au cours de l'enquête et les valeurs des températures physiologiques (PET) calculées pour chaque répondant. La méthode consiste à moyenniser les (TSV) par un intervalle d'un degré (1°C) de (PET), ensuite le vote moyen de sensation thermique (MTSV) a été classé dans l'intervalle correspond de la température (PET).

Cette méthode d'agrégation de données permet d'atténuer l'impact des votes de sensation thermique extrêmes (réponse incohérentes) afin d'obtenir une représentation claire des tendances générales de la perception thermique pour chaque intervalle de température (PET). Puis, une analyse de régression linéaire a déterminé l'association entre le (MTSV) dérivé de l'enquête et le (PET) calculé, et elle a permis ainsi d'identifier la température neutre pour la saison estivale, (**Figure 6.1**). L'équation de la corrélation linéaire est exprimée comme suit :

$$\text{MTSV} = 0,1211\text{PET} - 2,7472 \quad (R^2 = 0,8997) \quad (6.1)$$



**Figure 6.1.** Analyse de régression linéaire entre le (MTSV) et le (PET) dans la saison estivale.

Source : (Auteur, 2022)

La régression linéaire (**Figure 6.1**) a révélé une forte relation entre (MTSV) et (PET) avec un coefficient de détermination de ( $R^2 = 0,8997$ ), cela signifie que la perception thermique des répondants est conforme au confort thermique calculé, et que l'indice (PET) prédit la variation de la perception thermique subjective avec précision. De plus, le coefficient de la pente de la droite (**équation 6.1**) indique la sensibilité thermique des enquêtés aux variations de l'indice (PET). La valeur (0,1211) correspond à une température (PET) de 8.2 °C par unité de sensation thermique, autrement dit pour chaque changement d'unité dans le vote de sensation thermique moyenne (MTSV), l'indice du confort (PET) change de 8.3 °C durant la saison estivale.

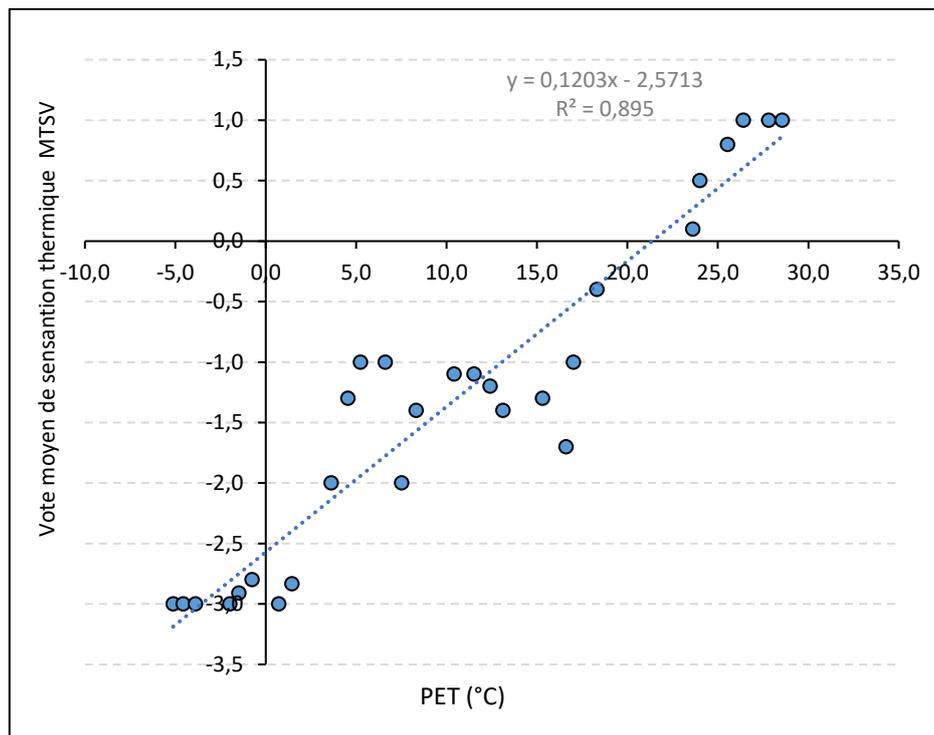
Par ailleurs, la température neutre à laquelle les individus se sentent thermiquement confortable (ni froids ni chauds) peut être obtenue en substituant le vote moyen de la sensation thermique par (MTSV = 0) dans **l'équation (6.1)**, la température neutre dans la saison estivale à Constantine est de 22.7 °C de (PET). Toutefois, dans les climats chauds et arides les températures neutres de (PET) en été ont tendance à être supérieure à 22.7 °C, par exemple (26.4 °C) à Ispahan, Iran (Nasrollahi et al., 2017); et (29.5 °C) au Caire, Égypte (Elnabawi et al., 2016).

De même, dans les climats chauds et humides en été les valeurs neutre de (PET) ont été élevés par rapport au climat semi-aride de Constantine, avec (25.6 °C) en Taichung, Taiwan (Lin, 2009); et (26.9 °C) à Guayaquil, en Équateur (Johansson et al., 2018). Cette différence dans la température neutre entre les différentes régions climatiques peut être expliquée par la combinaison de facteurs climatiques (radiation solaire intense, humidité relative élevée) et de facteurs d'adaptation thermique tel que l'acclimatation qui peut entraîner des températures neutres plus élevées.

### 6.1.2 Sensibilité thermique et température neutre de la saison hivernale

En hiver, la droite de régression est représentée par **l'équation (6.2)**, le coefficient de détermination ( $R^2= 0.895$ ) suggère une forte relation linéaire entre le (MTSV) et l'indice du confort (PET). De plus, le coefficient de pente (0,1203) de la droite de régression ajustée indique la sensibilité thermique des répondants aux changements du (PET), qui peut être interprétée comme chaque niveau de sensation thermique correspondant à 8.3°C du (PET). Sur le graphe représentant le (MTSV) en fonction du (PET), (**Figure 6.2**), la température neutre pour laquelle (MTSV=0) est calculé comme étant de 21.4 °C (PET) pour la saison hivernale.

$$\text{MTSV} = 0,1203\text{PET} - 2,5713 \quad (R^2 = 0.895) \quad (6.2)$$



**Figure 6.2.** Analyse de régression linéaire entre le (MTSV) et le PET dans la saison hivernale.

Source : (Auteur, 2023)

En climat semi-aride de Constantine et de Konya en Turquie (Canan et al, 2020), les températures neutres obtenues en hiver (21.4 °C) et (21.9 °C) dans l'ordre, présentent des valeurs comparables. Bien que séparées géographiquement, les deux populations interrogées exprimaient en saison hivernale des perceptions thermiques analogues. Ce qui peut être expliqué par l'adaptation psychologique notamment ; l'habitude et les attentes ou les individus dans les espaces extérieurs en hiver s'attendent à des environnements thermiques froides, de même après une après une longue exposition à des conditions thermiques similaires (hiver froid) ces deux population ont pu développer des adaptations physiologiques proches (Nikolopoulou et al., 2001).

Tandis que, durant l'hiver les valeurs de la température neutre de (PET) sont plus élevées généralement dans les climats chauds et arides avec (24.3 °C) au Caire, en Egypte (Elnabawi et al, 2016), ainsi que dans les climats chauds et humides avec (23.7 °C) à Taichung en Taiwan (Lin, 2009). A l'inverse en climat continental avec des hivers extrêmement froids à Harbin en Chine (Chen et al, 2018), la température neutre était (18 °C) pour la période hivernale relativement plus basse par rapport au climat semi-aride.

D'après les résultats analytiques de la sensibilité thermique et la température neutre, une similarité en matière de sensibilité thermique (8.2 °C) pour l'été et (8.3 °C) en hiver a été observée, ainsi, une faible différence de (1.3 °C) des températures neutres entre l'été et l'hiver a été détecté. Ce qui suggère que le niveau d'adaptation thermique de la population étudié est beaucoup plus centré sur les conditions thermiques générales en climat semi-aride, plutôt qu'une adaptation thermique saisonnière (physiologique et psychologique) spécifique pour faire face aux variations des conditions microclimatiques. Cette observation nécessite une comparaison avec d'autres recherches dans divers contextes climatique pour mieux comprendre les variations potentielles dans la sensibilité thermique.

Dans l'étude menée par (Elnabawi et al, 2016) au Caire, en Egypte, caractérisée par un climat désertique chaud, les résultats comparatifs de la sensibilité thermique (10 °C) de PET en été, et (11,5 °C) PET en hiver, indiquent que la sensation thermique des répondants en été est plus sensible qu'en hiver. Pareillement la température neutre en été était très élevée avec (29.6 °C) de (PET) contre (24.3 °C) de (PET) en hiver, ce qui indique que les individus en climat chaud et aride toléraient des températures plus élevées en été qu'en hiver et ils ajustent ainsi leurs perceptions thermiques au cours de ces deux saisons.

En revanche, dans un climat continental avec des hivers extrêmement froid à Harbin en Chine (Chen et al., 2018), les températures neutres étaient plus faibles avec (18 °C) de (PET) en hiver et (21.9 °C) de (PET) en été. Étant donné que l'hiver à Harbin dure environ six mois, les habitants de cette ville se sont mieux adaptés aux conditions froides extérieures et ils sont moins sensibles aux conditions hivernales. Par conséquent, la sensibilité thermique était plus élevée en été qu'en hiver soit respectivement (13.7 °C) et (15.4 °C). Cela résulte de l'acclimatation physiologique, où l'exposition continue ou répétée à un stimulus de stress thermique entraîne une réduction progressive de la réponse humaine induite par une telle exposition (de Dear et al., 1998; Knez and Thorsson, 2006).

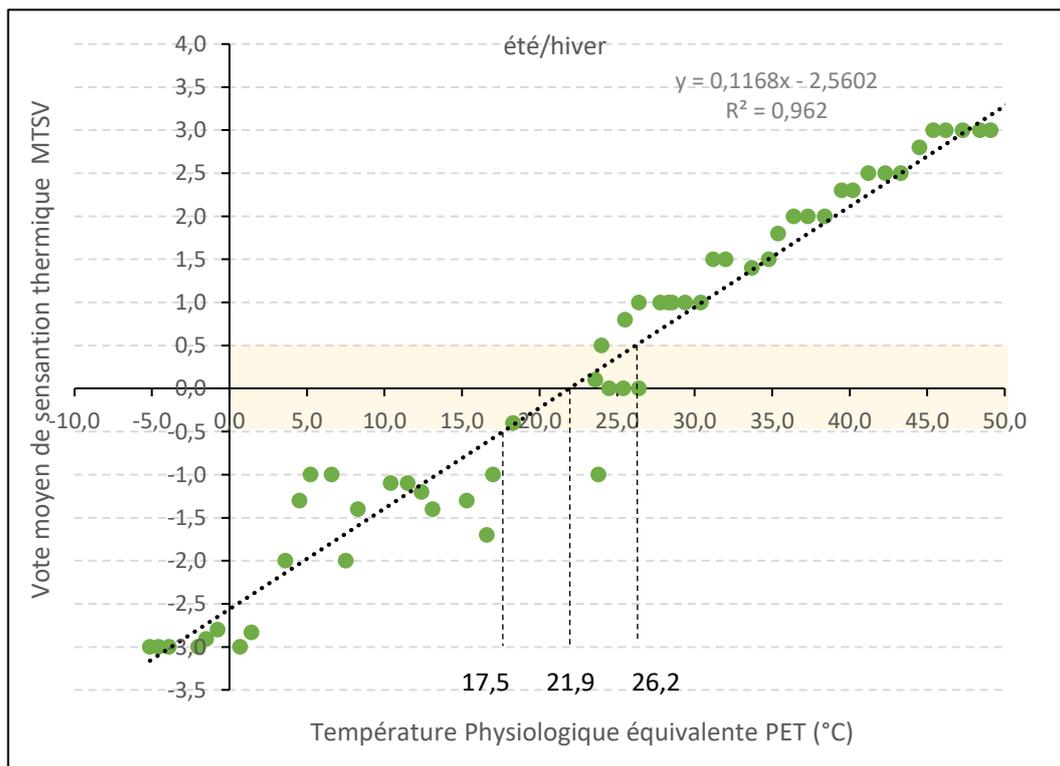
Alors que, dans le climat chaud et humide de Taichung en Taiwan (Lin, 2009), l'analyse de la sensibilité thermique des répondants aux variations du PET a révélé que la sensation thermique des répondants pendant la saison froide (5 °C) était plus sensible que celle durant la saison chaude (8.4 °C). Les températures neutres pour la saison froide et chaude sont respectivement (23,7 °C) et (25,6 °C) PET. Comme la saison chaude à Taiwan est plus longue (de mars à novembre) que la saison froide, les habitants sont généralement adaptés aux conditions chaudes. Cela peut expliquer pourquoi la sensibilité thermique est plus faible pendant la saison chaude que pendant la saison froide.

### 6.1.3 Plage de neutralité thermique (zone de confort thermique)

La plage de température neutre est associée à une sensation thermique neutre, Matzarakis et Mayer (1996) ont défini la plage PMV entre -0,5 et + 0,5 comme plage neutre à côtés des valeurs PET. La plage comprise dans  $\pm 0,5$  sur l'échelle à 7 points d'ASHRAE est conforme à la plage de neutralité thermique (Lai et al., 2014). En fait, les sensations subjectives appartenant aux trois plages centrales de l'échelle de perception thermique (-1 ; 0 ; +1) ont été considérées comme acceptables cependant les sensations supérieurs et inférieurs ( $\pm 2$ ) et ( $\pm 3$ ) sont inacceptables (Fanger, 1972; Spagnolo and de Dear, 2003).

L'analyse de régression linéaire entre le (MTSV) englobant les deux saisons (été/hiver) et l'indice de confort (PET) calculé pour l'échantillon complet a conduit à la détermination de la plage neutre de (PET), (**Figure 6.3**). L'équation de la corrélation linéaire est exprimée comme suit :

$$\text{MTSV} = 0,1168\text{PET} - 2,5602 \quad (R^2 = 0.962) \quad (6.3)$$



**Figure 6.3.** Corrélation entre MTSV et PET durant les deux saisons (échantillons complet) et identification de la zone de neutralité thermique. Source: (Auteur, 2023)

Bien que les points de données suivent une tendance linéaire avec un coefficient de détermination de ( $R^2= 0.962$ ), il existe encore une certaine variabilité autour de la ligne de

régression (**Figure 6.3**), qui pourrait être attribuée aux différences individuelles en matière de perception thermique, d'habillement, de niveaux d'activité et d'autres facteurs. La neutralité thermique a été estimée entre  $17,5\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 26,2\text{ °C}$  pour le climat semi-aride de Constantine.

## 6.2 Etude comparative du confort thermique dans différents climats

La relation entre les plages neutres de (PET) et les conditions de l'environnement thermique extérieur local dans différentes zones climatiques a été examinée. Pour comparer selon la classification climatique de Köppen-Geiger les plages de neutralité thermique dans divers climats, de la zone A à la zone D (du chaud au froid). Ainsi, on a divisé la comparaison en deux catégories, l'une pour les climats chauds englobant : (Af, Aw, BWh, Bwk, Bsk, Cwa, Csa, Cfa) avec 12 études de cas, et l'autre pour les climats tempérés et froids (Cfb, Dwa, Dfb) avec 4 études de cas, voir le Tableau ci-dessous.

La neutralité thermique de (PET) pour les climats chauds se situe entre  $17\text{ °C}$  et  $38\text{ °C}$ , la zone de confort thermique la plus étendue ( $19.1\text{--}38.1\text{ °C}$ ) a été trouvée à Tempe, Arizona caractérisé par un climat désertique (Middel et al., 2016). Alors que, dans un climat tempéré avec des été chauds (Csa) la plage de confort thermique de (PET) se situe généralement entre  $20\text{ °C}$  et  $25\text{ °C}$  en Crète, Grèce (Tsitoura et al., 2014), reste également entre  $20\text{ °C}$  et  $26\text{ °C}$  pour une étude estivale à Annaba en Algérie (Labdaoui et al., 2021). Dans une autre recherche saisonnière à Rome en Italie, la plage neutre de (PET) est plus importante ( $21.1\text{--}29.2\text{ °C}$ ) pour le même climat méditerranéen chaud (Csa).

Les résultats des différents types de climats tempérés et froids montrent que la plage de neutralité thermique est comprise entre  $6\text{ °C}$  et  $25\text{ °C}$ , avec une large plage de (PET) neutre ( $15\text{ °C}$ ) pour le climat continental froid de Varsovie en Pologne (Lindner-Cendrowska and Błażejczyk, 2018), et Harbin en Chine (Chen et al., 2020). En outre, dans un climat continental froid (Dwa) même lorsque l'étude se limitait à la période estivale et automnale la plage neutre de (PET) reste relativement étendue ( $9.9\text{--}20.7\text{ °C}$ ) à Séoul en Corée du sud, (Jeong et al., 2016).

La comparaison (**Tableau 6.1**) montre clairement que la plage « neutre » évolue vers un seuil d'adéquation plus bas avec la baisse des températures extérieures. La plage « neutre » du PET est plus étendue lorsque les conditions thermiques extérieures diminuent ou lorsque l'amplitude entre l'été et l'hiver augmente.

**Tableau 6.1.** Comparaison des plages neutres de (PET) des villes situées dans différente

Source : (Auteur, 2023)

Ville/pays	**Zone Climatique	Saison (période de l'étude in situ)	Ta (°C) max/min mesurées sur site	Plage de confort (0.5<TSV<0.5)
Constantine, Algérie	BSk	Été/hiver	42.4/0.9	17.5–26.2
Damas, Syrie	BSk	Été/hiver	37/5.6*	22.8– 28.5
Konya, Turquie	BSk	Toutes les saisons	36.9/-2.7	17.9–29.7
Téhéran, Iran	Bwk	Toutes les saisons	37.5/2.8	17.5–26.4
Tempe, États-Unis	BWh	Toutes les saisons	43/10.8	19.1–38.1
Caire, Egypte	BWh	Été/hiver	-	24.5–34.5
Changsha, Chine	Cfa	Toutes les saisons	39.8/1.9	15– 22
Glasgow, Royaume-Uni	Cfb	Mars/juillet	21.9/7.9	9–18
Varsovie, Pologne	Dfb	Toutes les saisons	30/-6.7	6.3–21.8
Harbin, Chine	Dwa	Toutes les saisons	30/-17.6	10.3–25.3
Séoul, Corée du sud	Dwa	Été/automne	-	9.9–20.7
Hong Kong, Chine	Cwa	Été/hiver	31.3/13.1	19–30
Dar es Salaam, Tanzanie	Aw	Chaude/froide	33.2/20	23–31
Vitória, Brésil	Af	Hiver/printemps /été	-	22–30
Rome, Italie	Csa	Toutes les saisons	35.9/3.2	21.1–29.2
Crète, Grèce	Csa	Été/hiver	31.2/13.6*	20–25
Annaba, Algérie	Csa	Été (26-28 Août)	35/20	20–26

\*\*Signification des symboles climatique de Köppen-Geiger (Peel et al, 2007) : (i) climats principaux : A –Tropical, B – Aride, C –Tempéré, D – Continental ; (ii) précipitations : S– Steppe, w – Hiver sec, W – Désert, s – Été sec, f – Entièrement humide ; (iii) température : k – Aride froid, h – Aride chaud, a – Été très chaud, b– Été chaud  
\* valeurs moyennes de la température de l'air mesurée in situ

D'après les résultats du **Tableau 6.1**, les plages de neutralité thermique, représentées par la zone (-0,5 <MTSV< +0,5), mettent en évidence les variations significatives entre les différentes villes et les divers contextes climatiques. les climats chauds et humides tropicaux

(Af) et (Aw) ainsi que, le climat subtropical (Cwa) présentait des plages neutres de (PET) avec des seuils inférieurs et supérieurs nettement plus élevés que le climat semi-aride de Constantine (17.5 – 26.2) °C, par exemple, (19– 30) °C et (22– 30) °C ont été trouvées à Hong Kong en Chine (Cheng et al., 2012), et Vitória, Brésil (da Silva and de Alvarez, 2015) respectivement. En revanche, les seuils de la plage de neutralité thermique des climats tempérés et froids (Cfb, Dfb, Dwa) sont inférieurs à ceux obtenus pour les climats semi-arides, tel que la fourchette (9–18) °C déterminé pour la ville de Glasgow, Royaume-Uni (Krüger et al., 2013).

La comparaison entre les études menées dans un climat semi-aride (Bsk) a révélé que, les seuils inférieurs de la zone de neutralité thermique de (PET) pour la ville de Constantine (17.5 °C) et la ville de Konya en Turquie (17.9°C) sont similaires. Tandis que, la limite supérieure de la plage de confort était plus élevée pour la ville de Konya (29.7) °C par rapport à la ville de Constantine (26.2 °C), probablement en raison du phénomène d'acclimatation influencé par la situation géographique. De plus, une étude menée sur deux saisons (été et hiver) à Damas en Syrie caractérisé par un climat similaire (Bsk) (Yahia and Johansson, 2013), a identifié une plage de confort thermique (22.8– 28.5) °C avec un seuil inférieur et supérieur plus élevés que ceux de Constantine (17.5 – 26.2) °C.

Il est à souligner que, la plage de neutralité thermique de la ville de Constantine est quasiment identique à celle identifiée à la ville de Téhéran en Iran (17.5 – 26.4) °C (Hadianpour et al., 2018), caractérisée par un climat aride froid (Bwk) avec des étés chauds et secs et des hivers froids avec faibles précipitations.

### **6.2.1 Calibration de l'indice du confort (PET)**

Comme l'expliquent Chen et al, (2020), pour calibrer l'échelle des indices de confort thermique en utilisant la perception thermique subjective, deux méthodes sont généralement utilisées : la régression linéaire et l'analyse de régression probit. Les avantages et les inconvénients des méthodes utilisées pour modifier les échelles de (PET) ont été discutés pour la première fois par (Cheung and Jim, 2017).

Dans cette étude, la méthode de régression linéaire a été utilisée pour modifier les échelles de l'indice du confort (PET), puisque les catégories de sensation thermique rapportées dans l'enquête allaient de « très froid » à « très chaud », une calibration complète de diverses catégories de stress thermique du (PET) a été possible. Le **Tableau 6.2** présente

la modification des échelles de perception thermique du (PET) acquis grâce à l'équation de régression linéaire (6.3) mentionnée ci-dessus.

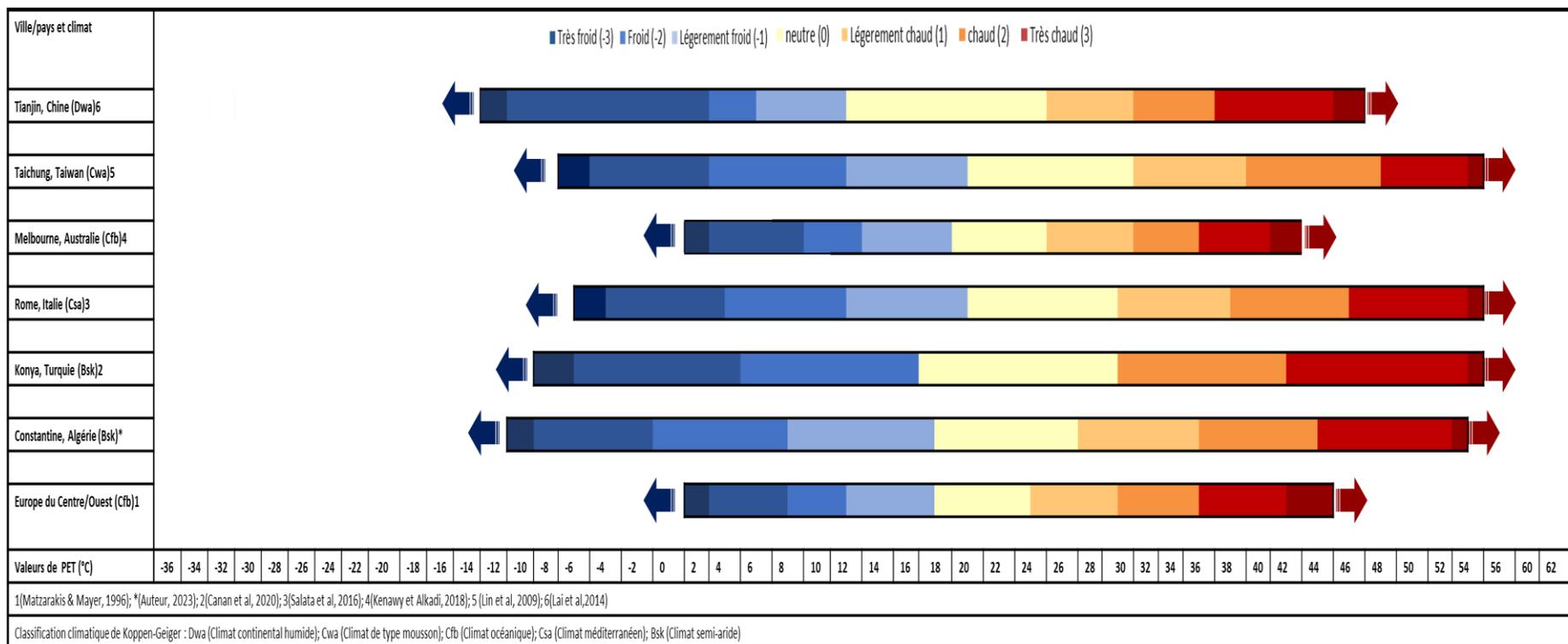
**Tableau 6.2.** Échelles de l'indice PET calibrées obtenue par la régression linéaire

Source : (Auteur, 2023)

Perception thermique	Catégories de TSV	Echelle de PET calibrée (°C)	Echelle de stress physiologique
Extrêmement froid	< (-3.5)	< -8.0	Stress thermique froid extrême
Très froid	(-2.5 à -3.5)	0.5 – -8.0	Stress thermique froid très élevé
Froid	(-1.5 à -2.5)	9.1 – 0.5	Stress thermique froid élevé
Légèrement froid	(-0.5 à -1.5)	17.5 – 9.1	Stress thermique froid modéré
Neutre	(-0.5 à +0.5)	17.5 – 26.2	Pas de stress thermique
Légèrement chaud	(+0.5 à 1.5)	26.2 – 34.8	Stress thermique chaud modéré
Chaud	(1.5 à 2.5)	34.8 – 43.3	Stress thermique chaud élevé
Très chaud	(2.5 à 3.5)	43.3 – 51.9	Stress thermique chaud très élevé
Extrêmement chaud	> (+3.5)	>51.9	Stress thermique chaud extrême

### 6.2.2 Synthèse des résultats de calibration dans différentes régions climatiques

La **Figure 6.4** présente une comparaison des différentes plages de l'indice du confort (PET) calibrées dans diverses études menées dans différents contextes climatiques. Il est évident que, l'amplitude des niveaux de perceptions thermique allant de 'très chaud' à 'très froid' modifiées pour les cinq villes (Constantine, Konya, Rome, Melbourne, Taichung, et Tianjin) varié selon les divers études et elle est plus importante que celle de l'indice original (PET) développée pour l'Europe centrale et occidentale (Matzarakis et al., 1999). Ce qui suggère, que la perception thermique et ses différentes échelles associées différent en fonction des conditions climatiques et l'adaptation thermique de la population étudiée.



**Figure 6.4.** Comparaison des échelles calibrées de l'indice PET dans différentes zones climatiques

Source : (Auteur, 2023)

On observe aussi dans les études menées en climat chauds tels que ; (Bsk, Csa, Cwa) ont généralement des niveaux de perception thermique plus élevées pour les catégories chaudes en comparaison avec des études provenant de climats plus froids (Cfb, Dwa), indiquant ainsi une grande tolérance aux températures plus élevées chez les populations dans les régions plus chaudes (**Figure 6.4**). Par contre, les plages de (PET) pour les classes de sensation froide sont plus étendues dans les études portant sur des climats froids.

Bien que les plages de perception thermique de (PET) varient selon les climats dans les classes de sensation chaudes et froides, l'intersection (chevauchement) entre les plages de neutralité thermique des diverses études souligne l'existence d'une plage générale de température (PET) perçue comme confortable indépendamment des spécificités du climat.

Il est à noter que les auteurs (Canan et al, 2020) ont exclus les sensations thermiques « légèrement froids » et « légèrement chaud » dans la calibration de l'indice du confort (PET) pour la ville de Konya en Turquie (Bsk), pour acquérir des résultats plus conformes à l'expression de la perception thermique par le groupe étudiés. L'examen comparatif entre les plages de (PET) ajustées pour le climat semi-aride de la ville de Konya et de Constantine, et le climat méditerranéen chaud de la ville de Rome en Italie a révélé que :

Pour la catégorie « très froid », la ville de Konya présente la plage de (PET) la plus étendue comprise entre (-5.6 – 6.2) °C, cependant la ville de Constantine et la ville de Rome ont des intervalles de (PET) équivalents pour cette classe de stress thermique (**Figure 6.4**). Pareillement, pour la sensation thermique « froid » sur l'échelle de (PET) les deux villes (Constantine et Rome) ont des plages de (PET) courtes, de (0.5–9.1) °C à Constantine et de (5–12) °C à Rome par rapport à Konya où la plage de (PET) pour cette sensation froide est plus ample (6.2 –17.9) °C.

En ce qui concerne la sensation thermique « légèrement froids », la ville de Constantine se situe entre (9.1– 17.5) °C présentant une plage plus étendue en comparaison avec Rome, qui se situe entre (13.1–21.1) °C, pour la ville de Konya cette plage a été exclue. Cette analyse des classes froides des échelles de (PET) montre une plus grande sensibilité aux températures basses par le groupe de population étudié de la ville de Konya par rapport à la population interrogée de Constantine et Rome, probablement dû aux conditions thermiques hivernales froides, où les températures moyennes mesurées lors de l'enquête étaient entre (1.2 °C) et (7.7 °C).

La plage de neutralité thermique de (PET) déterminée à Constantine est la plus restreinte (17,5–26,2) °C avec un seuil supérieur plus bas (26.2 °C) de (PET) en comparaison à (29.7 °C) et (29.2 °C) pour Konya et Rome respectivement. En revanche, La plage de

neutralité la plus étendue est (17,9–29,7) °C de (PET) pour la ville de Konya. Ce qui révèle que la population de Constantine à une tolérance inférieure aux températures plus élevées, les distinguant comme chaudes à des seuils neutres pour la population de Konya et Rome.

Par ailleurs, concernant les classes de sensation thermique « chaude » et « très chaude », la ville de Constantine à les fourchettes les plus basses de (34.8– 43.3) °C et (43.3 – 51.9) °C. Tandis que, Konya dispose des fourchettes les plus étendues avec (29.7– 41.5) °C pour « chaud » et (41.5–53.3) °C pour « très chaud », ce qui confirme l'observation précédente et met en évidence l'effet de l'adaptation thermique sur la perception thermique subjective.

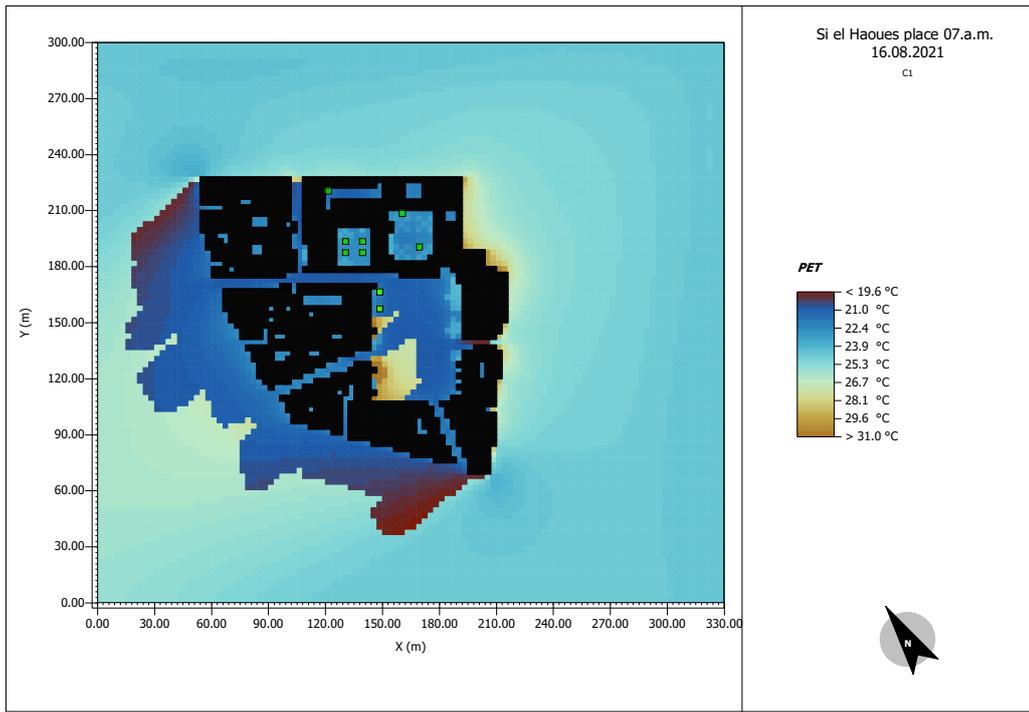
### 6.3 Cartes du confort thermique extérieur basées sur l'indice PET calibré

Les résultats générés par le logiciel ENVI-met visent à obtenir des cartes 2D détaillées de haute résolution de l'indice du confort (PET) pour les trois places publiques sélectionnées pour l'étude. L'analyse de différentes cartes est répartie en multiples points temporels, notamment ; tôt le matin, en après-midi, et le soir, comme illustré dans les figures suivantes. Chaque carte du confort thermique est accompagnée d'une légende indiquant les valeurs de (PET), et l'interprétation de ces cartes est basée sur l'indice du confort (PET) calibré défini dans la section précédente.

#### 6.3.1 Analyse des cartes du confort thermique dans la période estivale

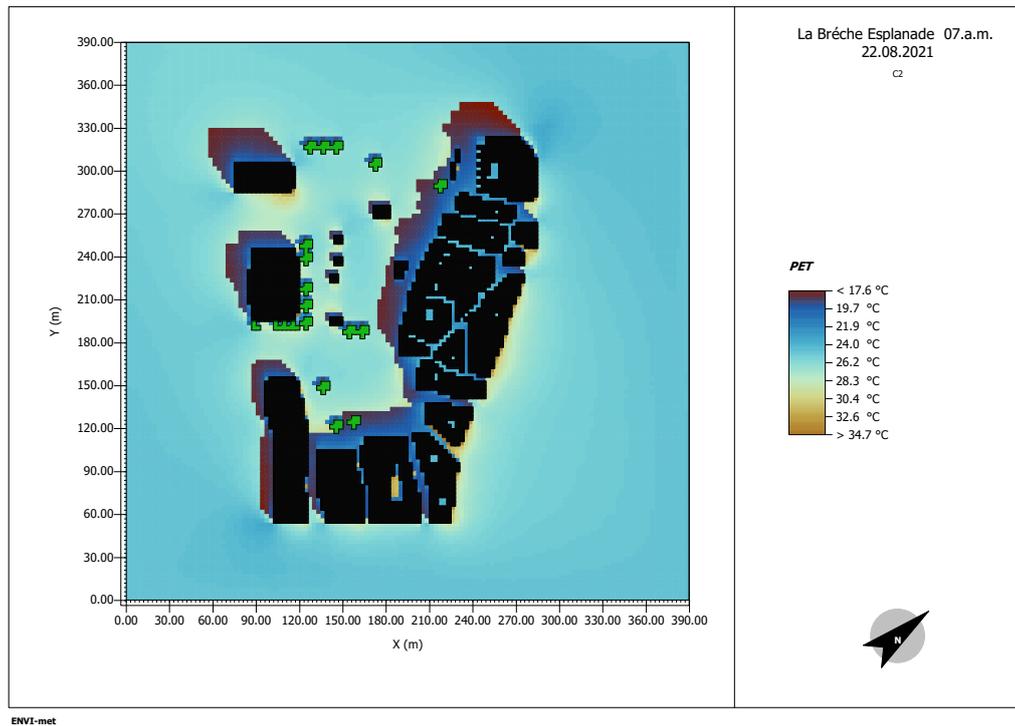
A 7 :00 heure du matin (**Figure 6.5**), la carte du (PET) indique que plus de 75 % de la superficie de la place *Si el Haoues* (C1) ne présente « aucun stress thermique », avec des valeurs de (PET) comprise entre 19.6 °C et 22,4 °C. Ceci est attribué à la configuration urbaine et l'orientation de la place du palais, qui offrait un ombrage abondant à cette heure de la journée. Cependant, la surface restante exposée au soleil direct a enregistré un « stress thermique modéré », avec des valeurs (PET) supérieures à 26,2 °C.

En revanche, les cartes du confort thermique dans l'esplanade de La Brèche (C2) et la place *Hadj Ahmed Bey* (C3) ont révélé des valeurs de (PET) comparables (**Figure 6.6**) et (**Figure 6.7**). Les degrés de stress thermique observés varient de 17.6 à 26,2 °C représentant ainsi « aucun stress thermique », ce qui coïncide avec les zones ombragées par les bâtiments environnants ou la présence d'arbres. En somme, à cette heure matinale les trois places publiques présentaient un niveau élevé de confort thermique pour les usagers, ce qui est agréable pour les activités en plein air.



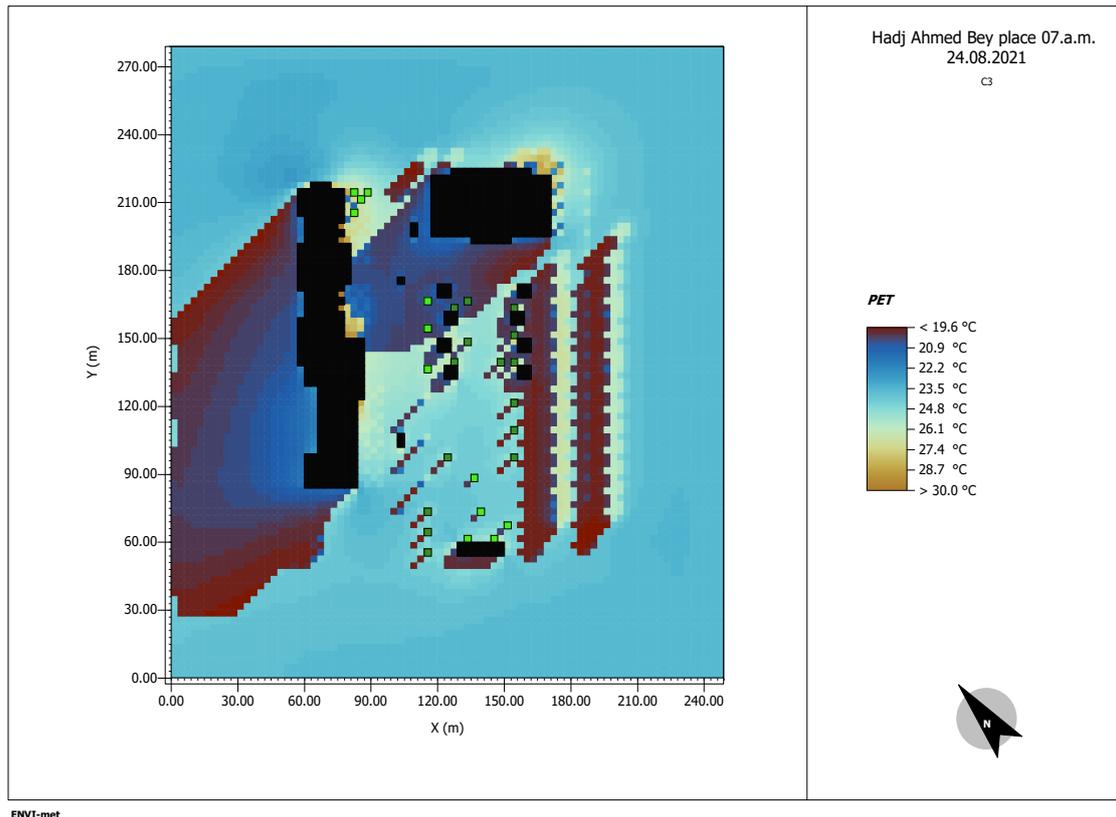
**Figure 6.5.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (7 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



**Figure 6.6.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (7 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)

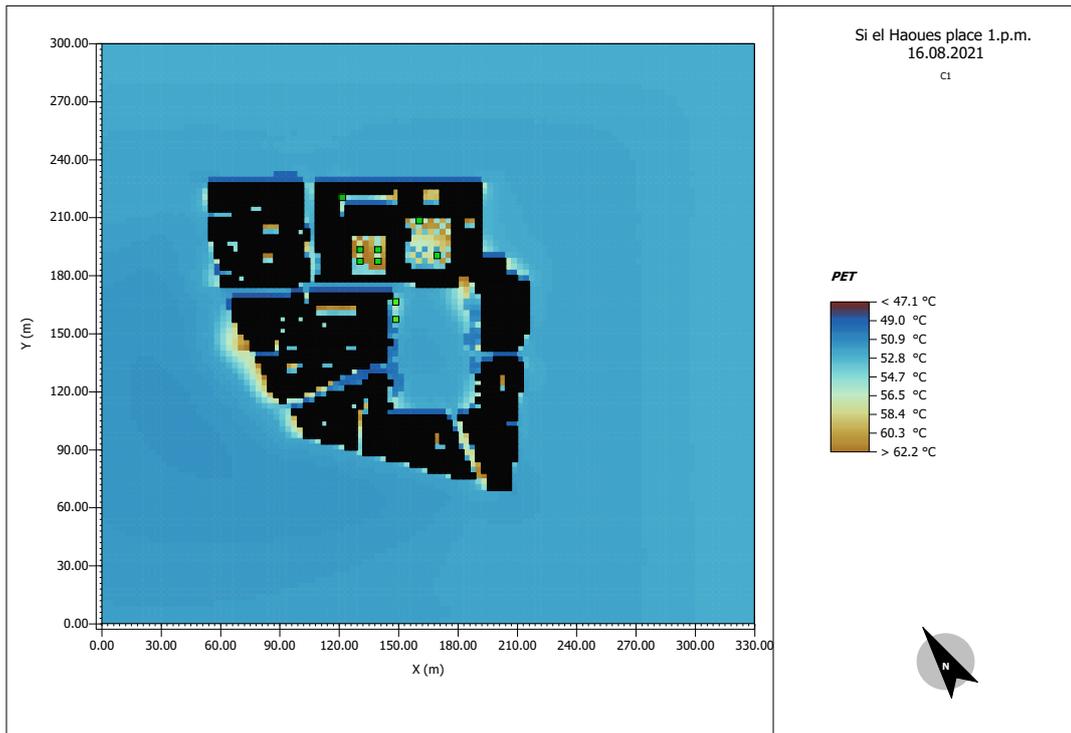


**Figure 6.7.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (7 :00h)

Source: **ENVI-met (Auteur, 2022)**

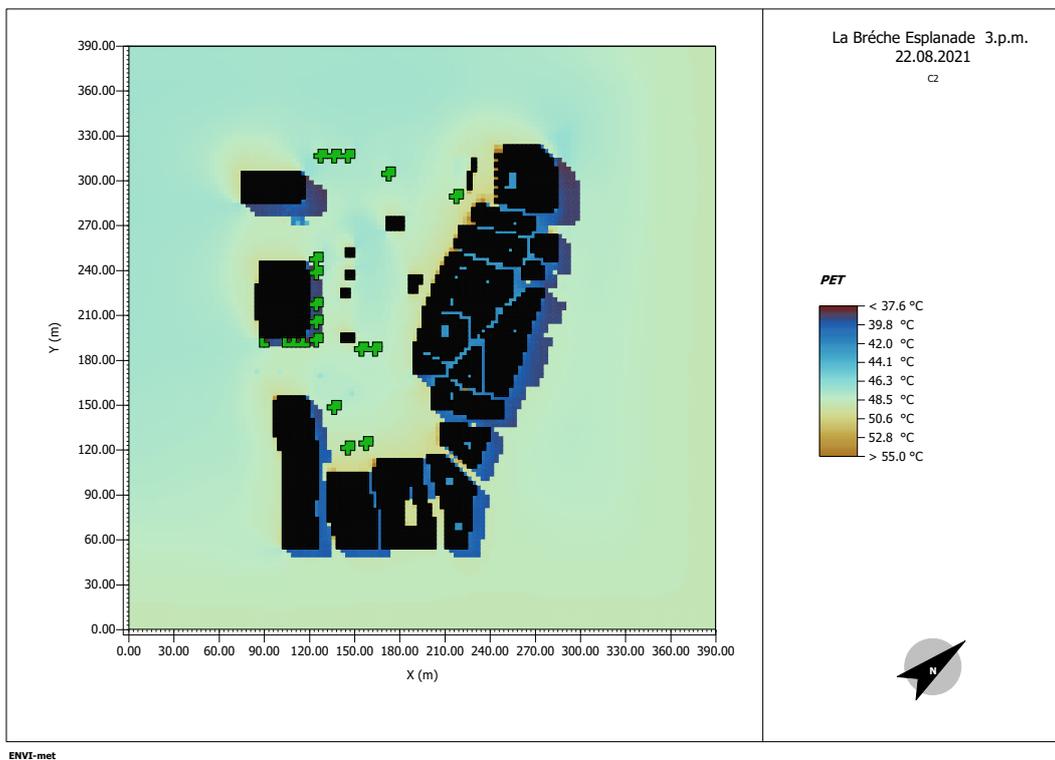
D'après les plages de valeur de l'indice (PET) dans la (**Figure 6.8**), les heures de l'après-midi qui correspondent à la température diurne maximale, ont montré un état de « Stress thermique chaud extrême » à la place du palais (C1), ces zones ont un indice de (PET > 52 °C) ce qui signifie qu'elles sont très inconfortables sur le plan thermique. Quelques zones à l'extrémité de la place sont ombrées par les arbres présentant un niveau de « Stress thermique chaud très élevé » avec un indice de (PET) se situe entre 49 °C et 50 °C.

Pour l'esplanade de la Brèche (C2) et la place *Hadj Ahmed bey* (C3) un « Stress thermique chaud très élevé » a été détecté sur toutes les surfaces de places précitées (**Figure 6.9**) et (**Figure 6.10**), avec des valeurs PET allant de 44 à 48 °C, en raison de l'exposition prolongée à des radiations solaire intense. Notamment, la température radiante moyenne (Tmrt) a culminé à 65 °C dans la place *Si el Haoues* (C1) à 13 heures, 79 °C à 15 heures dans l'esplanade de la Brèche (C2), et 66,1 °C à 14h dans la dernière place (C3), concordant aux valeurs les plus élevées dans ces espaces extérieurs (cf. **Tableau 5.3, pp : 136**).



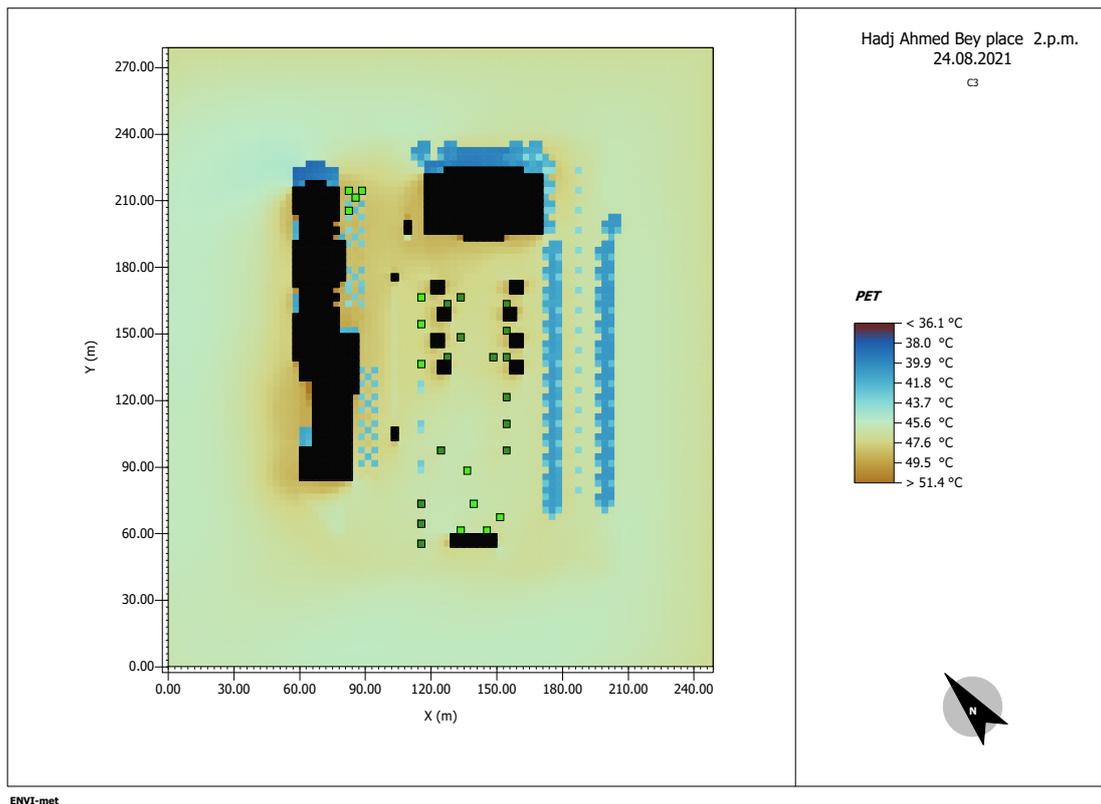
**Figure 6.8.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (13 :00h)

Source : **ENVI-met (Auteur, 2022)**



**Figure 6.9.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice PET calibré à (15 :00h)

Source : **ENVI-met (Auteur, 2022)**

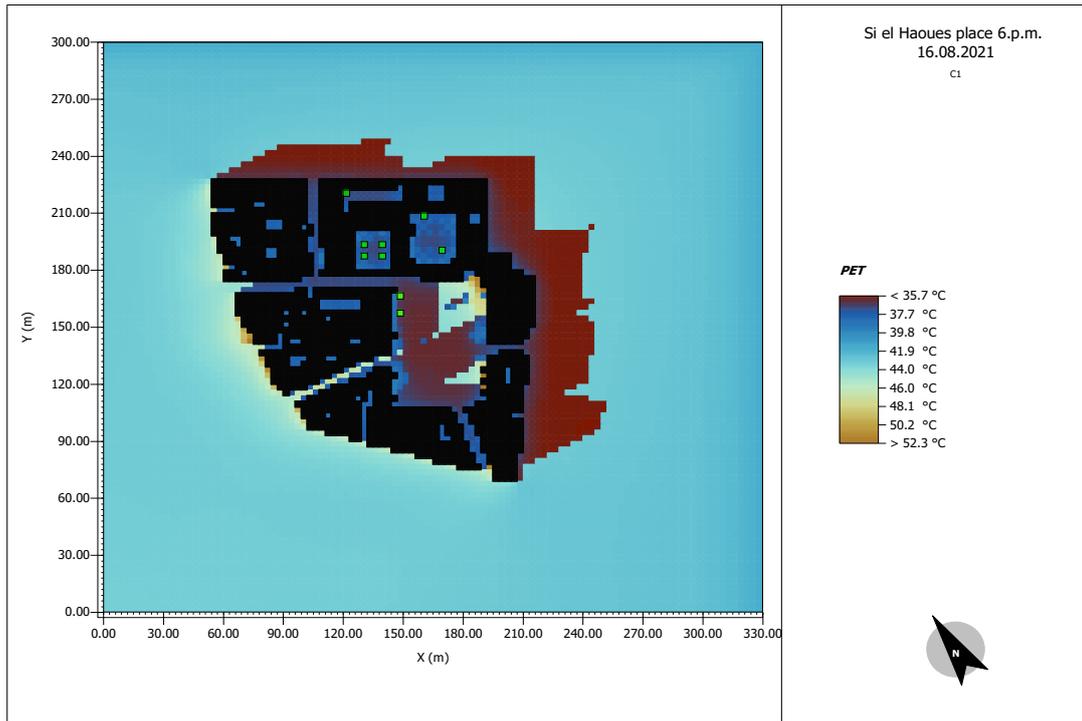


**Figure 6. 10.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (14 :00h)

Source : **ENVI-met (Auteur, 2022)**

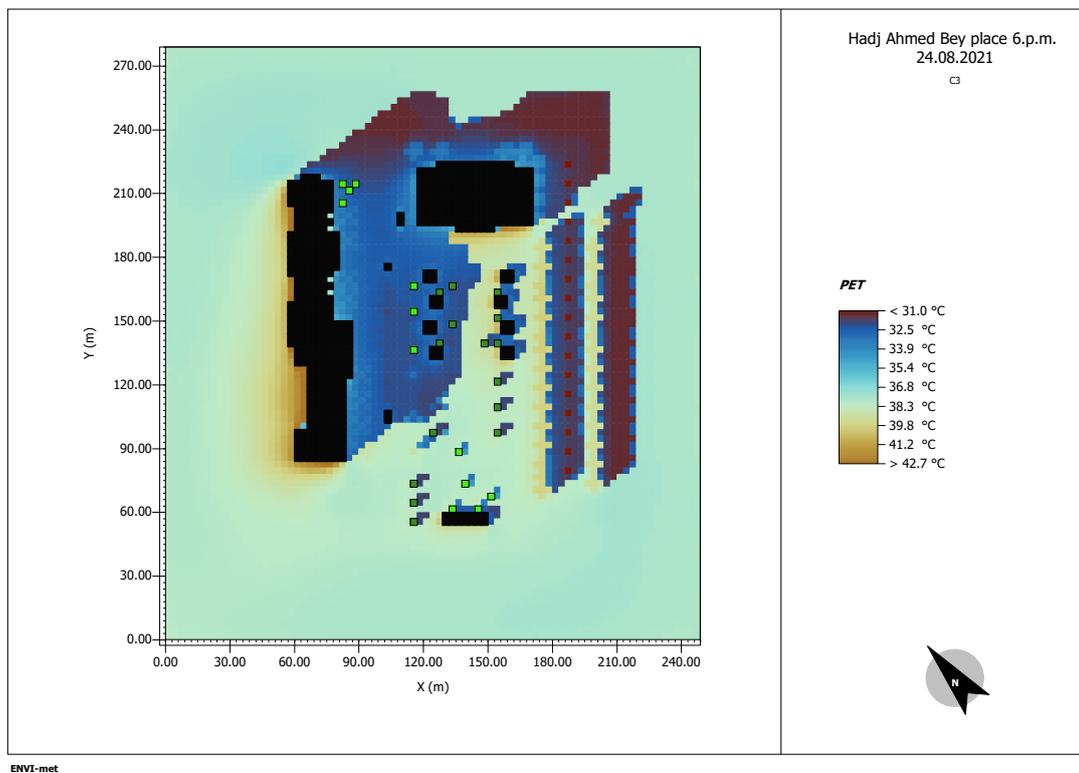
Le soir à 18h (**Figure 6.11**), la place *Si el Haoues* (C1) est partiellement ombragée par les bâtiments environnants, indiquant un « stress thermique chaud modéré » avec une plage de valeur moins 35,7 °C (PET). À cause de l'accumulation de la chaleur pendant les heures du matin, les zones exposées au soleil à la fin de journée sont moins favorables entraînant un niveau de stress thermique plus élevé désigné par « Stress thermique chaud très élevé » dont les valeurs de l'indice (PET) sont comprises entre 42 °C et 46 °C.

Un « stress thermique chaud modéré » et un « stress thermique chaud élevé » ont été détectés à la place *Hadj Ahmed bey* (C3) couvrant une température physiologique équivalente (PET) de 31-35 °C et 36–40 °C (**Figure 6.12**). Alors que les valeurs de l'indice (PET) les plus faibles (29–30.8 °C) ont été observées dans l'esplanade de La Brèche (**Figure 6.13**). En raison de l'effet de refroidissement par convection provoqué par l'accélération de la vitesse de l'air sur cet espace ouvert (SVF= 0.94), ce qui entraîne une température perçue plus faible et une sensation de refroidissement plus importante.



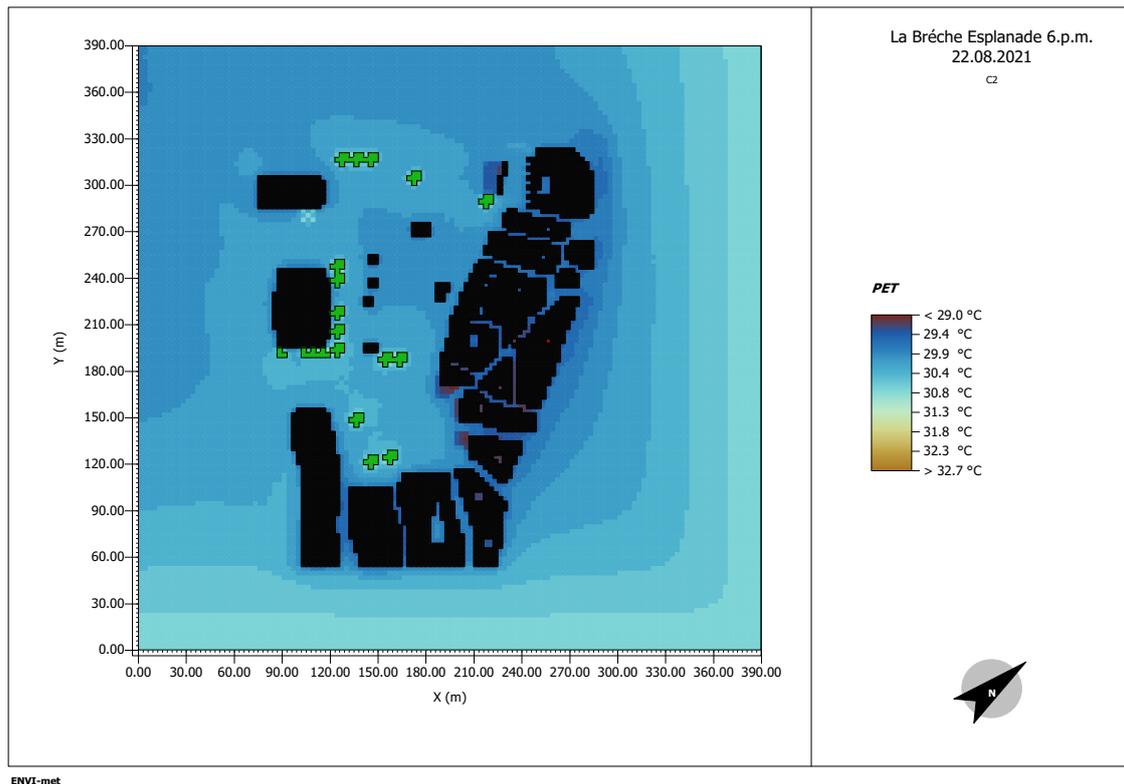
**Figure 6.11.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (18 :00h)

Source: ENVI-met (Auteur, 2022)



**Figure 6.12.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (18 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)

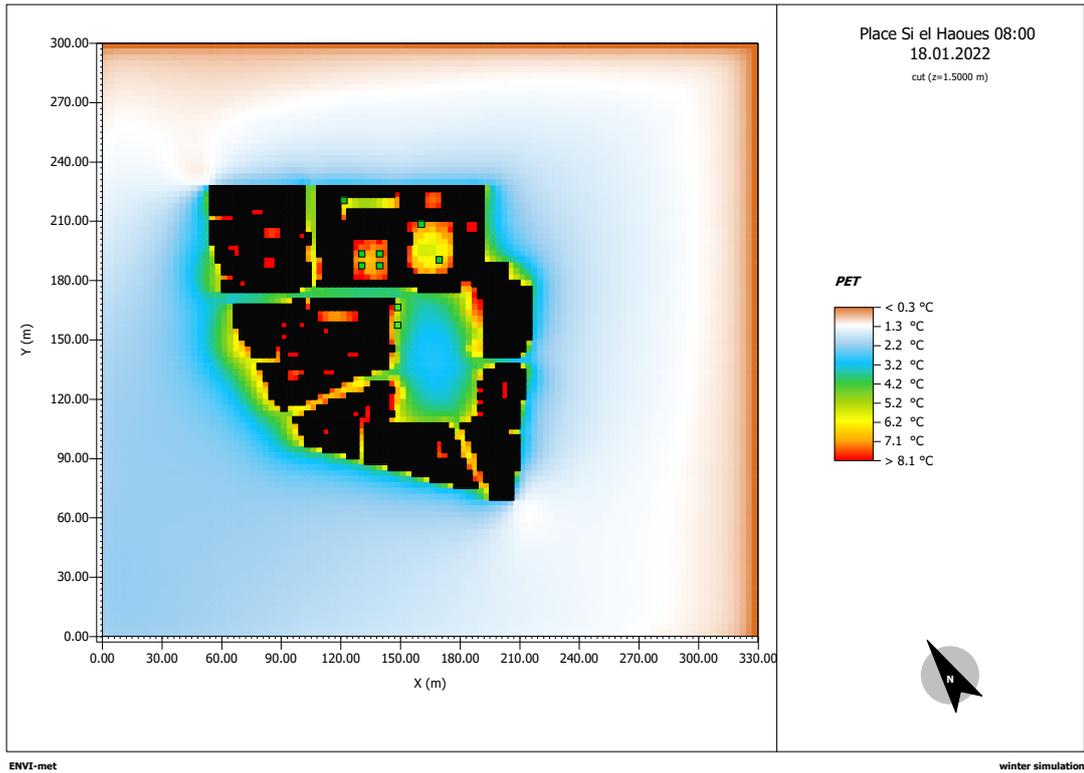


**Figure 6.13.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (18 :00h)  
 Source : ENVI-met (Auteur, 2022)

### 6.3.2 Analyse des cartes de confort thermique dans la période hivernale

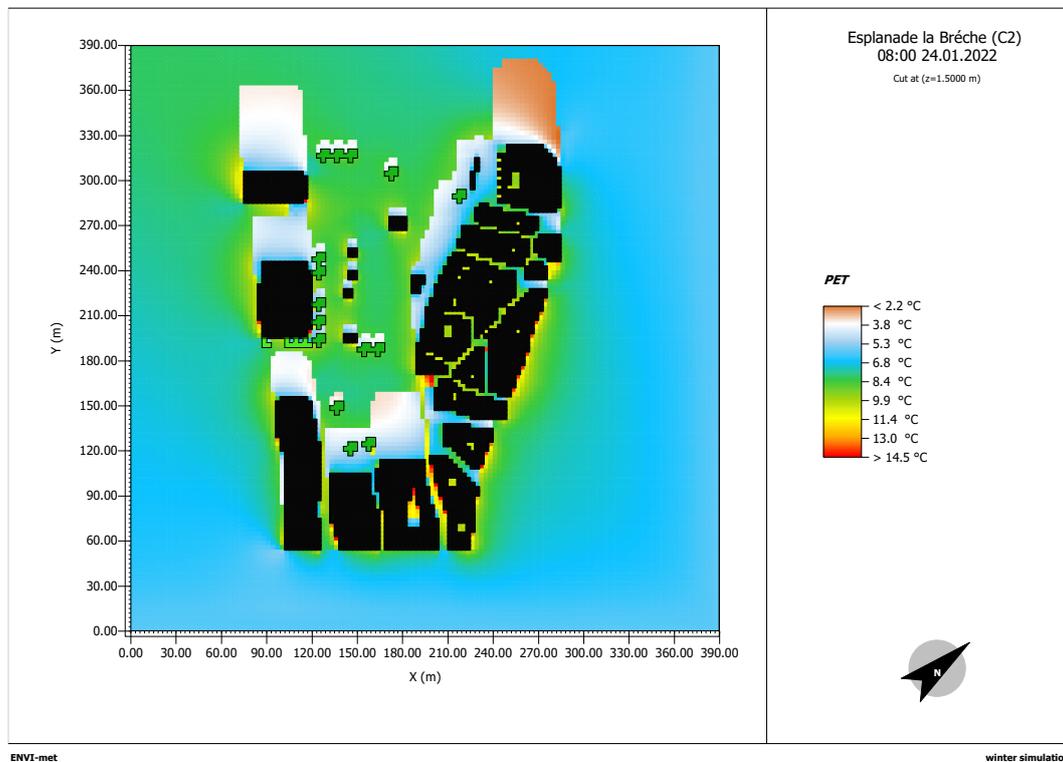
Dans le but d'identifier les zones de stress thermique dû au froid nous avons procédé à une analyse temporel similaire à celle de l'étude estivale, pour comprendre la variation des conditions thermiques lors des journées d'investigation hivernale, notamment à 8h du matin, l'après-midi (heure de pic), et le soir (17h).

A 8h du matin (**Figure 6.14\_6.16**), les cartes du confort thermique de (PET) indiquent un « stress thermique froid élevé » sur la superficie des places publiques étudiées, présentant valeurs de (PET) proportionnellement faibles, varient de (3.2–8) °C pour la place *Si el Haoues* (C1), (**Figure 6.14**), à (3.8–8.4) °C dans l'esplanade de la Brèche (C2), (**Figure 6.15**), et les valeurs les plus basses (2.8–3.7) °C ont été détecté à la place *Hadj Ahmed bey* (C3), (**Figure 6.16**). Cela est attribué aux températures basses avec des valeurs minimales allant de 0.9 °C à 1.8 °C enregistrés dans les trois places publiques ont été à 8h, ainsi l'absence de rayonnement solaire direct combiné avec des vents froids (**cf. Tableau 5.4, pp : 138**) contribue au refroidissement des places.



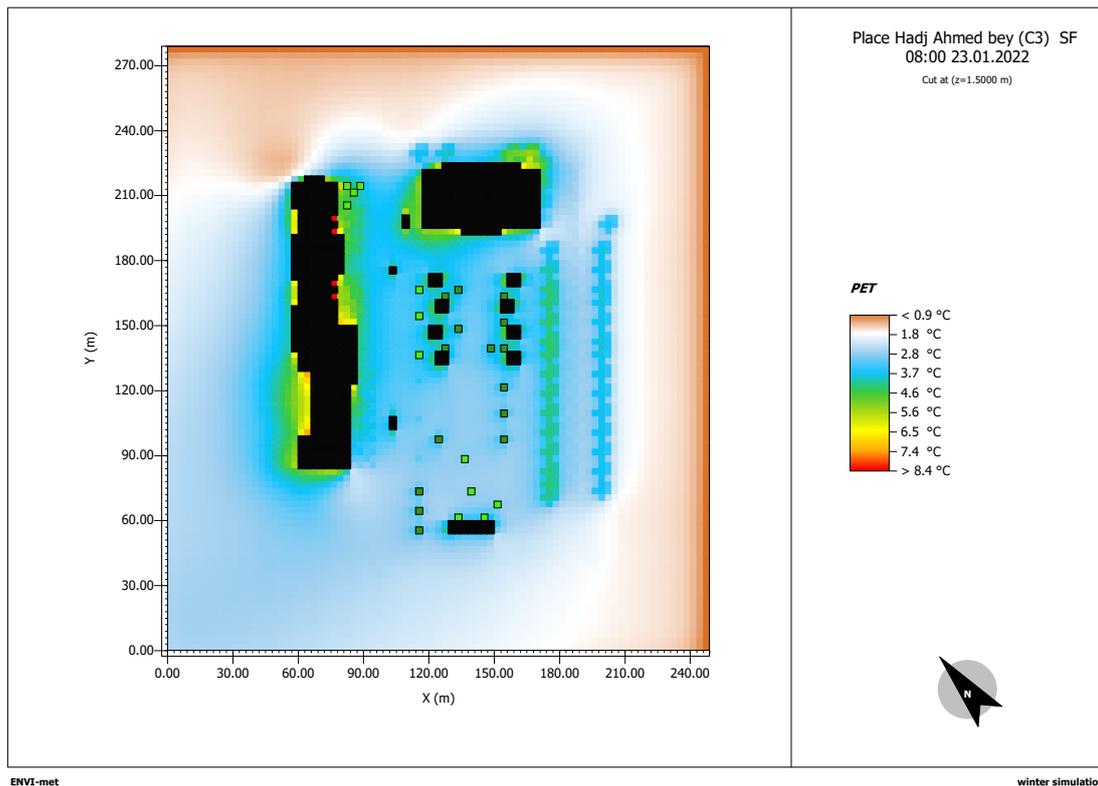
**Figure 6.14.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (8 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



**Figure 6.15.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (8 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)

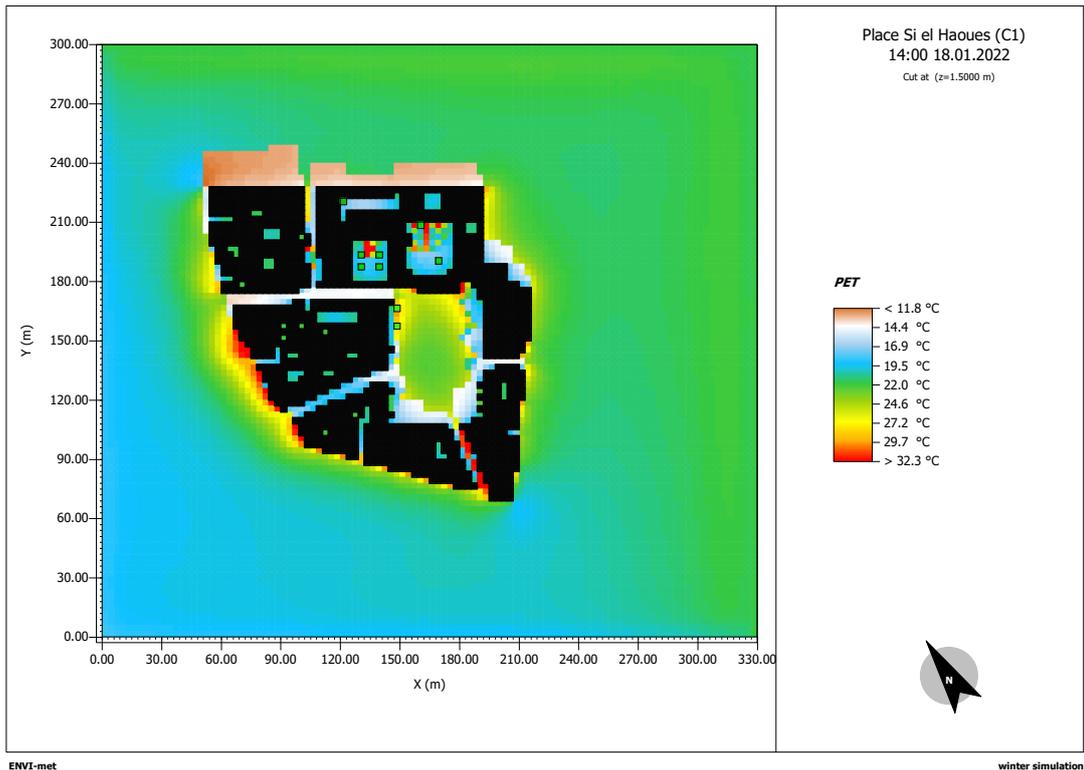


**Figure 6.16.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (8 :00h)

Source : **ENVI-met (Auteur, 2022)**

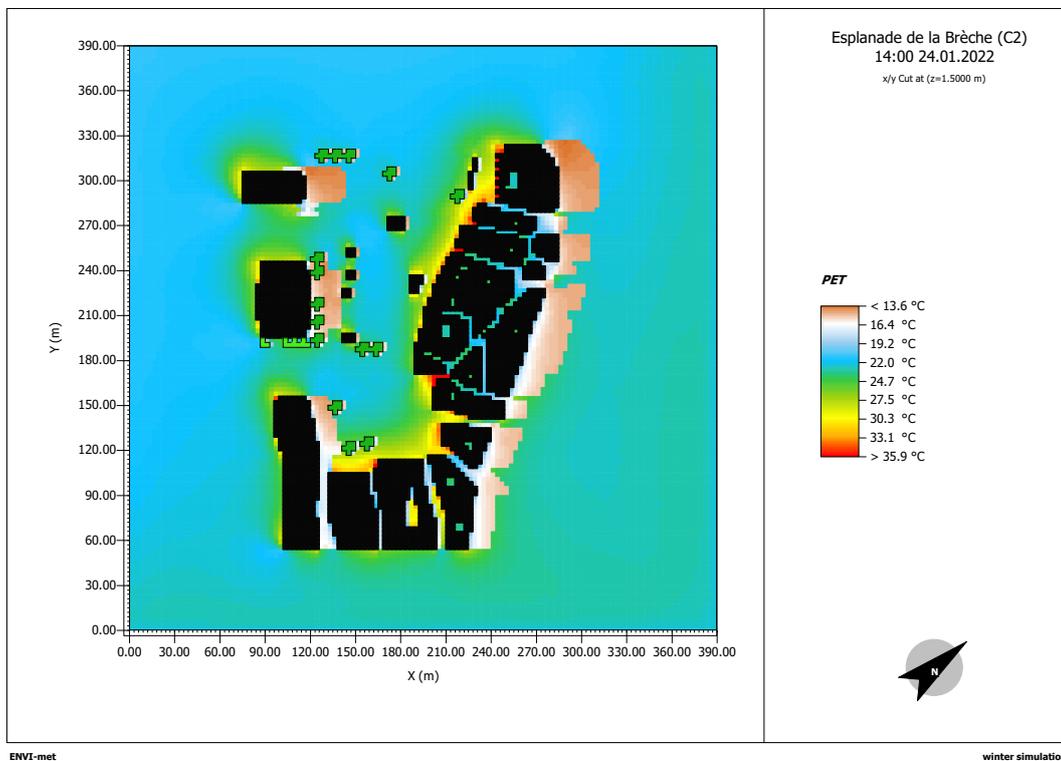
D'après les plages de valeur de l'indice (PET) dans la (**Figure 6.17**), la place du palais (C1) présente une variation de niveaux de stress thermique à 14h, les zones ombragées par les bâtiments environnants ont enregistré des valeurs basses de l'indice (PET), allant de 14.4 °C à 17 °C révélant ainsi un « stress thermique froid modéré ». D'autre part, une plage de « pas de stress thermique » a été signalée dans le reste de la superficie avec des valeurs de l'indice (PET) comprises entre 19.5 °C et 26.2 °C. Ce qui indique un niveau de confort thermique important pour la plupart des usagers de la place qui pourraient ressentir à ce moment une sensation neutre.

Un réchauffement relatif a été observé en raison de l'augmentation des températures et l'exposition au rayonnement solaire, ce qui a diminué le stress thermique froid dans l'esplanade de la Brèche (C2) et la place *Hadj Ahmed bey* (C3). Une plage de (PET) correspond à « pas de stress thermique » a été détectée avec des valeurs allant de 17.5 °C à 24.7 °C de (PET), (**Figure 6.18\_6.19**).



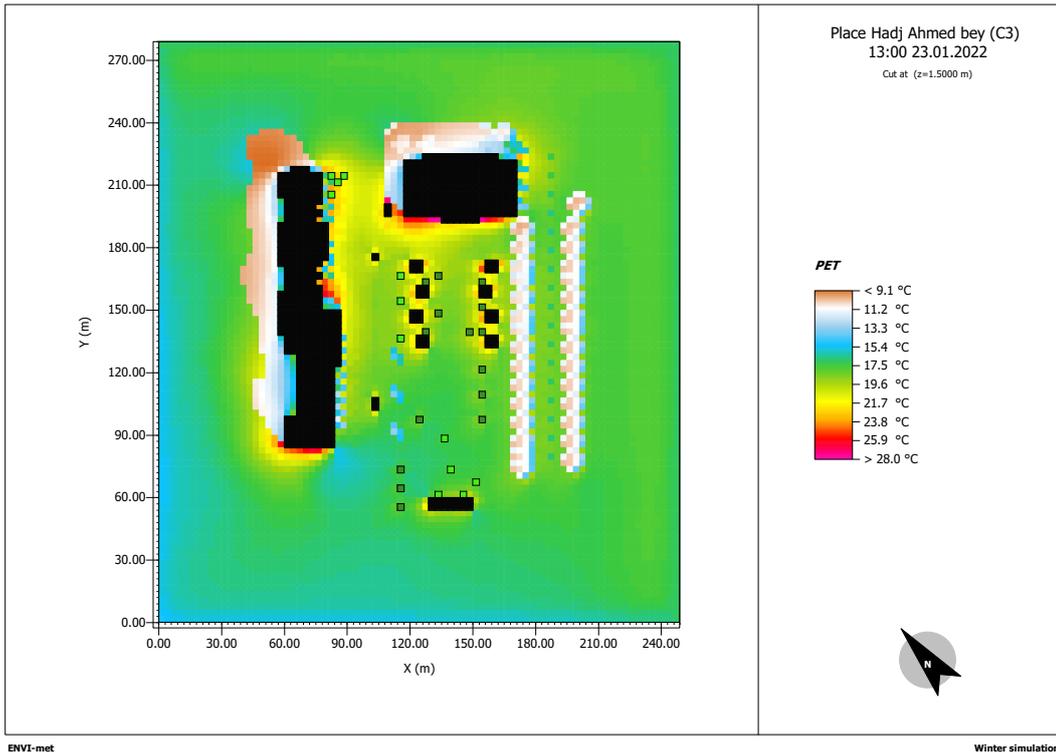
**Figure 6.17.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (14 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



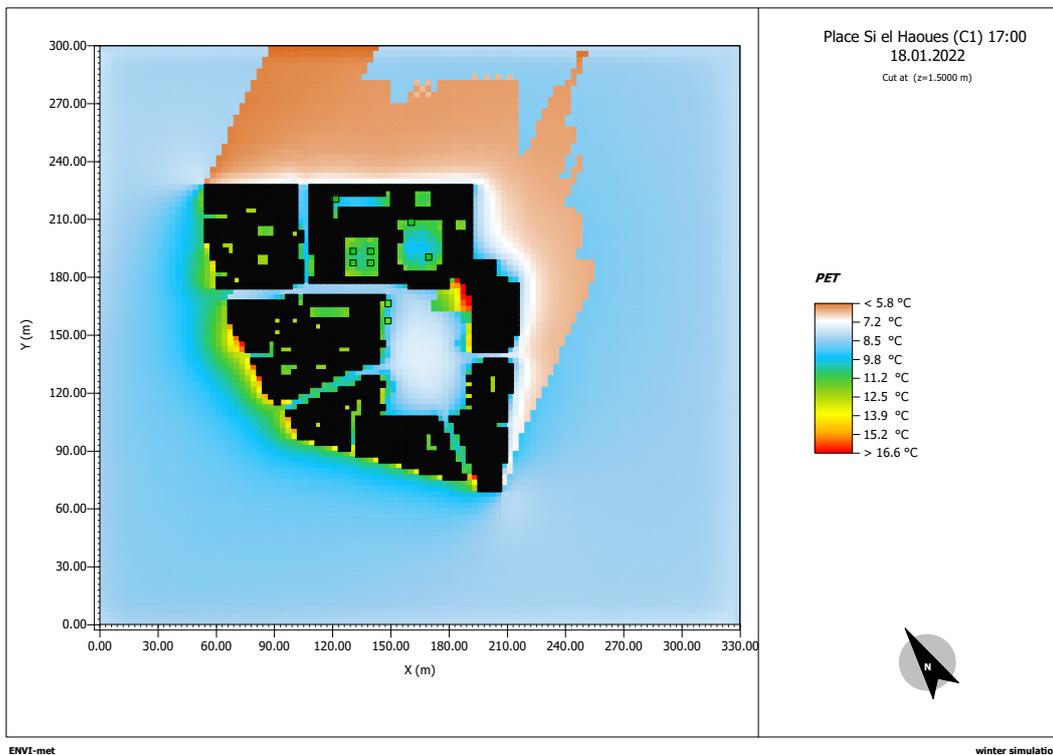
**Figure 6.18.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (14 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



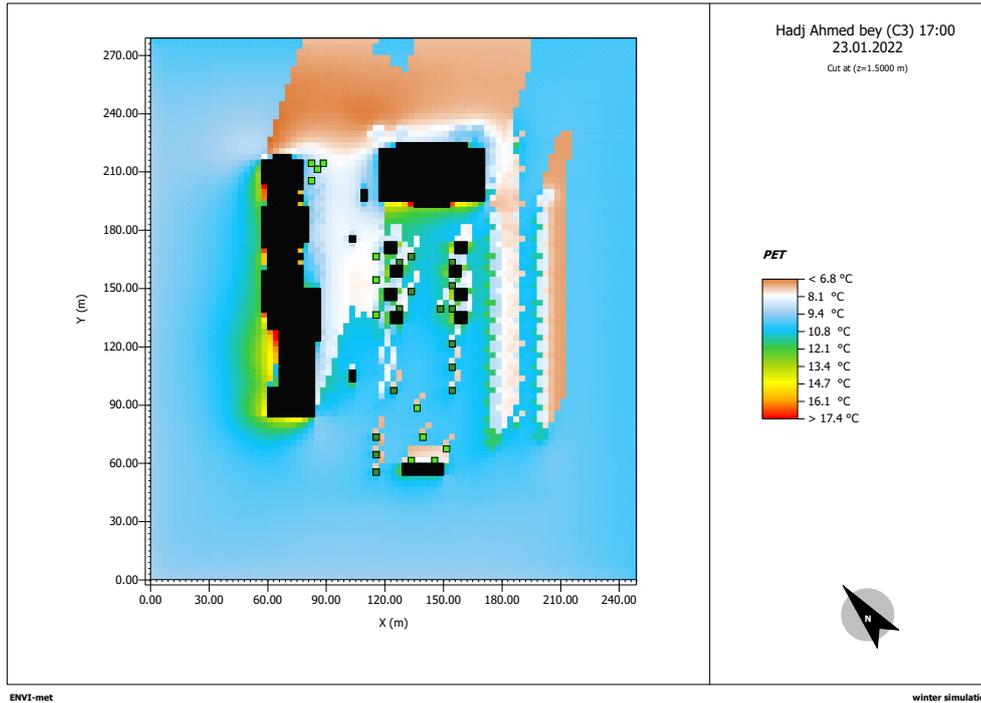
**Figure 6.19.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (13 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



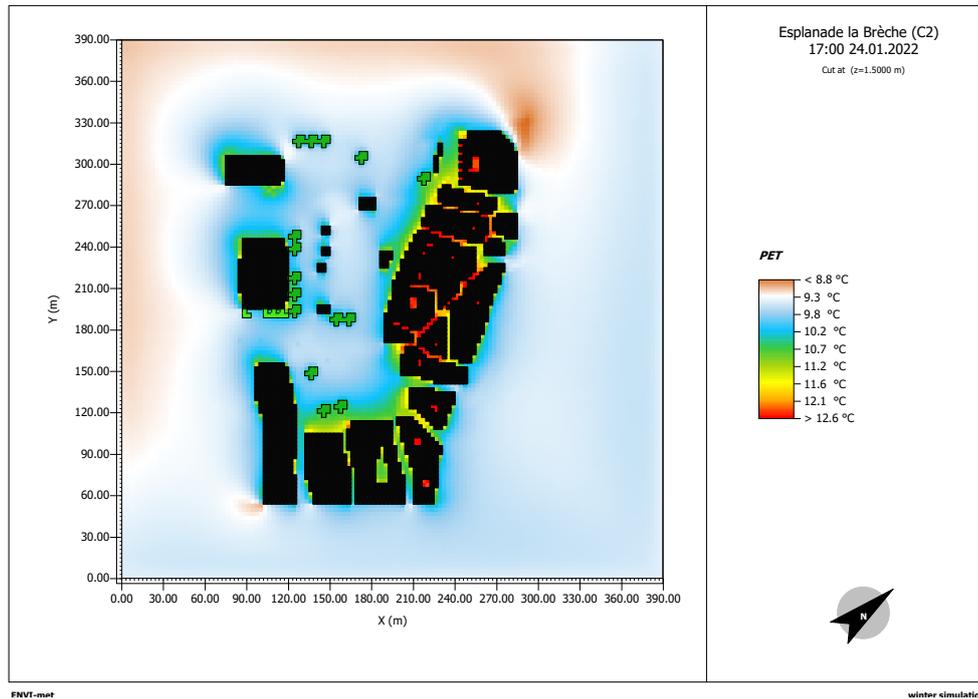
**Figure 6.20.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (17 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



**Figure 6.21.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (17 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)



**Figure 6.22.** Carte du confort thermique extérieur basé sur l'indice (PET) calibré à (17 :00h)

Source : ENVI-met (Auteur, 2022)

Le stress thermique varié considérablement le soir à 17h dans les places publiques étudiées en raison des faibles températures et manque d'ensoleillement (cf. **Figure 5.2**, pp :

**139).** Un « stress thermique froid élevé » et un « stress thermique modéré » a été observé dans la place *Si el Haoues* (C1) et la place *Hadj Ahmed bey* (C3), avec des valeurs de (PET) allant de (7–16.6) °C et (6.8–13.4) °C de manière respectif (**Figure 6.20\_6.21**). Cependant, une plage de (9.3– 10.2) °C indique un « stress thermique modéré » à l’esplanade de la Brèche (C2) (**Figure 6.22**).

## Conclusion

Les résultats de l’évaluation thermique subjective tirée de l’enquête sont en accord avec l’échelle d’évaluation de l’indice (PET) calculée, le niveau de « Stress thermique chaud extrême » et « Stress thermique chaud très élevé » ont été détectés pour la saison estivale dans les places publiques étudiées. En outre, une forte corrélation ( $R^2 = 0,89$ ) entre les (MTSV) et (PET) a été trouvée.

Pareillement dans la saison hivernale, les résultats de la satisfaction thermique démontrée au chapitre précédant concordent aux résultats de simulation thermique, où une variation significative des plages de (PET) a été observée dans les places publiques, particulièrement les plages de « pas de stress thermique » et « stress thermique froid modéré », ont été signalées dans toutes les places étudiées.

La méthode binée entre le (MTSV) et l’indice de confort (PET) a conduit à l’identification des températures neutres (22,7 °C) pour l’été, et (21.4 °C) pour l’hiver. Cette faible différence de (1.3 °C) des températures neutres entre l’été et l’hiver a été expliquée par le niveau d’adaptation thermique de la population locale, qui est beaucoup plus centré sur les conditions thermiques générales en climat semi-aride, plutôt qu’une adaptation thermique saisonnière (physiologique et psychologique) spécifique. Ensuite, la plage de neutralité thermique a été estimée entre 17,5 °C et 26,2 °C de (PET) pour le climat semi-aride de Constantine.

Par ailleurs, la relation entre les plages de sensation neutre de (PET) et l’environnement thermique extérieur local a révélé que la plage « neutre » évolue vers un seuil d’adéquation plus bas avec la baisse des températures extérieures. Elle s’étend davantage lorsque l’écart entre l’été et l’hiver s’accroît. Pour conclure, la synthèse des résultats de calibration de l’indice (PET) pour les différents contextes climatiques, indique que la perception thermique et ses multiples échelles impliquées divergent en fonction des caractéristiques climatiques et l’adaptation thermique de la population étudiée.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Dans l'objectif d'évaluer l'environnement thermique en extérieur, de nombreuses recherches ont été menées pour examiner les facteurs climatiques, physiologiques et psychologiques qui exercent une influence sur le bien-être thermique individuel. L'examen des indices thermo-physiologiques par la perception thermique est considéré comme outil méthodique pour examiner la précision, et la validité des indices de confort puis définir et classer également la perception thermique humaine selon les conditions environnementales locales.

La synthèse des indices de confort thermique en extérieur ont apporté des renseignements significatifs sur les méthodes de calcul et les spécificités de ces indices. Une diversité d'indicateurs a été exposée au cours de notre analyse. Sur la base de l'examen effectué, sur 165 indices thermiques humains développés, seuls quatre indices (PET, PMV, UTCI, SET\*) sont largement utilisés pour les études de perception thermique extérieure.

Tout fois, les indices empiriques (ASV, TSV) décrivent clairement les sensations thermiques des individus et les facteurs microclimatiques qui affectent particulièrement sur leur comportement thermique ; cependant, ils ne conviennent que pour les villes qui ont déjà été analysées. Le principal inconvénient de ces modèles simplifiés est qu'ils négligent les échanges d'énergie entre le corps humain et l'environnement.

De ce fait, établir une corrélation entre les indices rationnels et les indices empiriques s'avère essentiel : alors que les premiers définissent une approche "universelle" pour quantifier le confort humain, les seconds ont la capacité de traiter la perception thermique, y compris les préférences thermiques individuelles, en fonction du climat local, et de la sensibilité à certains stimuli.

Bien que des études antérieures aient montré que (PMV), et (SET\*) ne sont pas nécessairement les indices les plus précis, il semble que l'applicabilité de l'indice joue un rôle plus important que l'exactitude. La plupart de ces indices sont exprimés en °C, facilitant ainsi leur interprétation par les acteurs impliqués dans la conception architecturale ou urbaine. Par ailleurs, l'indice (PET) est le modèle le plus largement utilisé, ayant fait l'objet de nombreuse comparaison avec des études empiriques, dans l'objectif de définir la fourchette de neutralité thermique et de modifier l'échelle de l'indice (PET) pour l'adapter aux conditions climatiques locales.

Les études récentes portant sur la perception thermique en extérieur ont souligné la nécessité d'adopter un cadre (structure) conceptuel convenu, également appelé 'Framework'. Les lignes directrices pour la réalisation de ces recherches biométéorologiques en extérieur et l'évaluation de la perception thermique humaine reposent généralement sur quatre étapes essentielles qui ont été recommandées par Potchter et al, (2022).

La première étape consiste à définir les objectifs expérimentaux et, en conséquence, à sélectionner le site d'étude, la saison, la durée ainsi que la population étudiée. Étant donné que l'une des priorités est la population étudiée, il est important de définir les détails personnels des sujets (sexe, âge), leur activité (métabolisme), le taux de vêtements et l'historique thermique des enquêtés. De plus, l'étude doit inclure des conditions estivales et hivernales typiques, couvrant à la fois les heures chaudes et froides de la journée.

La deuxième étape, exige des mesures climatiques et l'investigation in situ, appréhendant des outils de mesures microclimatiques et des techniques de collecte de données par enquête. Il convient donc que les instruments de mesure soient conformes aux normes de (l'ASHRAE 55, et l'ISO 7726).

La troisième étape est l'analyse des données, comprenant la vérification de la fiabilité des données, l'évaluation de la perception thermique et la détermination du seuil de confort thermique extérieur.

La dernière étape nécessite l'ajustement de l'échelle d'indice initial pour s'adapter aux conditions climatiques spécifiques de la région. Avant d'apporter des modifications, il est nécessaire de collecter toutes les données de chaque enquête sur terrain et de les compiler dans une base de données unifiée.

Comme hypothèse de recherche nous avons alors supposé que : « *Sous un climat semi-aride, en matière de perception thermique extérieure la plage de neutralité thermique dépasse la fourchette initiale de (PET) qui varie entre 18 °C et 23 °C* ». Notre objectif est non seulement de déterminer et classer la perception du confort thermique pour le climat semi-aride de Constantine mais, aussi de consolider les recherches sur l'examen des indices thermo-physiologiques par la perception thermique subjective et de transmettre une méthode d'évaluation basée sur la triangulation des approches.

Ainsi, l'évaluation de la perception thermique en climat semi-aride de Constantine a été menée sur une période de six jours couvrant la saison chaude (Août 2021) et froide (Janvier 2022). À l'aide des enquêtes par questionnaire structuré conformément à la norme ISO 10551, et la démarche expérimentale par l'analyse microclimatique, un total de 519

questionnaires ont été collectés dans les places publiques (*Si el Haoues*, esplanade de la Brèche, et *Hadj Ahmed bey*) situées au centre-ville de Constantine.

Adoptant plutôt une approche aléatoire pour la sélection des enquêtés, une attention particulière a été accordée à la parité entre les sexes, en veillant à équilibrer le nombre d'hommes et de femmes, ce qui contribue à rendre l'échantillon plus représentatif assurant l'inclusivité et la diversité du groupe étudié. De plus, la collecte des données s'est déroulée du matin au soir sans interruptions pour capturer les variations diurnes et la diversité d'expériences thermiques au sein de cette population.

En ce qui concerne la simulation numérique, nous avons employé deux logiciels ; le premier est RayMan, afin de calculer l'indice thermo-physiologique (PET) pour chaque enquêté ; le deuxième est ENVI-met science pour générer des cartes de confort thermique extérieures basées sur l'indice du confort (PET). Enfin, plusieurs techniques ont été utilisées afin d'analyser et d'interpréter les données collectées, nous nous sommes basés sur le logiciel de traitement des données statistiques SPSS.

Les conditions estivales à Constantine, où la température de l'air peut atteindre 42 °C dans les places publiques, sont moins agréables pour les piétons. La sensation de très chaud (TSV=+3) est prédominante ; la majorité des personnes interrogées sont insatisfaites de leur environnement thermique. En effet, lorsque la température moyenne de l'air mesurée ( $T_a$ ) augmente sur les sites étudiés ; les personnes interrogées expriment davantage d'inconfort thermique (TSV > 0).

Alors que, des proportions notables de satisfaction thermique dans la période hivernale ont été observées, car durant les jours d'enquête une tendance vers les niveaux de sensation thermique neutre (TSV=0) et légèrement froid (TSV=-1) a été reporté par rapport à la sensation froide. C'est pourquoi, la majorité des participants ont opté pour aucun changement dans les aspirations liées aux variables microclimatiques, ce qui révèle une nette préférence pour les conditions climatiques investigués dans la période hivernale.

A l'inverse, les préférences dominantes ont été une température plus basse (91.7 %), moins de radiation solaire (84.3 %), et plus d'ombre (78 %), pour atténuer le stress thermique dû à la chaleur et améliorer le confort thermique extérieur durant un été chaud en climat semi-aride de Constantine. Désormais, la planification et la gestion des espaces urbains doivent répondre aux besoins des occupants, améliorer le confort thermique extérieur dans un environnement chaud en fournissant plus d'ombre par des dispositifs extensibles ou

planter davantage de végétation pourrait réduire considérablement l'insatisfaction thermique dans le climat semi-aride.

Du fait qu'une personne ne soit pas un récepteur passif dans son environnement thermique ambiant, la perception thermique ne s'explique pas simplement par les conditions microclimatiques qui affectent le bilan énergétique du corps humain. Mais elle est également influencée par divers facteurs comportementaux et psychologiques par exemple (l'acclimatation, le temps d'exposition, les attentes, et le comportement adaptatif) qui sont collectivement appelés adaptation thermique.

L'évaluation de l'effet des paramètres microclimatiques (variable indépendante) sur la perception thermique (variable dépendante) a montré que, durant la saison estivale une corrélation significative ( $R^2=0.76$ ) entre la perception thermique et les facteurs microclimatiques (température de l'air, température radiante moyenne, vitesse de l'air, et humidité relative) a été constatée suggérant ainsi que les variations dans la perception thermique subjective en été peuvent être expliquées par la combinaison linéaire de ces quatre variables microclimatiques.

D'autre part, pour la saison froide bien qu'une corrélation significative ait été trouvée ( $R^2= 0.57$ ) entre la perception thermique des enquêtés et les variables microclimatique, le modèle linéaire ne parvient pas à expliquer 43 % de la variation du (TSV), probablement d'autres variables non incluses dans le modèle auraient contribué également à la variation de la perception thermique extérieure durant cette période.

En effet, les résultats de l'investigation estivale et hivernale de cette étude confirment l'hypothèse selon laquelle la température de l'air est le facteur microclimatique le plus influent sur la perception thermique subjective en milieu urbain. Parmi les paramètres microclimatiques analysés, la température de l'air s'est révélé être le paramètre le plus fortement corrélé aux variations de (TSV) des enquêtés. En somme, deux équations empiriques (été, hiver) ont été obtenues permettant ainsi de quantifier la variation de la perception thermique extérieure en fonction des paramètres microclimatiques pour le climat semi-aride de Constantine.

Quant à l'hypothèse proposé pour évaluer l'effet des variables subjectives (adaptation thermique et comportements adaptatifs) par un test statistique non paramétrique, elle a été confirmée, les résultats du test non paramétrique de *Kruskal wallis* ont indiqué que la perception thermique diffère pour les questionnés ayant de temps d'exposition distincts en

hiver, mais en été le temps d'exposition n'entraînait aucune disparité significative dans la sensation thermique des enquêtés.

Cependant, l'histoire thermique à court terme à une influence significative sur la perception thermique subjective durant les deux saisons. Les activités précédentes (15-30 min avant l'enquête) dans les deux saisons n'avaient statistiquement pas d'effet significatif sur la sensation thermique des enquêtés.

Et en termes de comportement adaptatif, « se déplacer à l'ombre » était la mesure privilégiée par les hommes et les femmes pour réduire l'inconfort thermique dû à la chaleur. Une différence significative dans la sensation thermique des questionnés a été détectée ( $p < 0,05$ ), ce qui souligne l'importance d'ajustement comportemental en été.

En hiver malgré la variation observée dans les comportements adaptatifs adoptés (s'asseoir au soleil, boisson chaude, se déplacer à l'intérieur, ajouter des vêtements, et rien/quitter la place) par des enquêtés pour diminuer leurs stress thermiques dû au froid, le test H de *Kruskal-Wallis* n'a révélé aucune différence significative avec ( $p=0.887$ ). Ces résultats affirment l'hypothèse sur l'évaluation de l'influence par une analyse statistique a été affirmé

Au-delà des effets des variables subjectives et objectives, une attention particulière a été accordée aux effets des restrictions liées au COVID-19 sur l'usage des espaces publics et la perception thermique des piétons pendant la période post-pandémique (Août 2021). Dans l'ensemble, les restrictions de mobilité (distanciation sociale et couvre-feu) et les protocoles de prévention (port de masque) ont révélé l'importance d'environnements extérieurs accessibles et adaptables.

Par conséquent, pour relever non seulement les défis induits par la pandémie, mais aussi pour faire face à d'éventuelles crises potentielles, les politiques et réglementations municipales locales en matière d'urbanisme doivent réexaminer la conception des espaces publics extérieurs notamment les places publiques afin de donner la priorité au zonage flexible, d'améliorer les installations sanitaires et de promouvoir l'ouverture de zones de loisirs en plein air.

La neutralité thermique pour les espaces urbains extérieurs a été estimée entre  $17,5\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 26,2\text{ °C}$  sous climat semi-aride de Constantine. Ensuite, l'approche comparative des plages de neutralité thermique représentées par  $(-0,5 < \text{MTSV} < +0,5)$  a indiqué une variation significative entre les différentes villes sous divers climats. Les climats tropical et

subtropical présentait des plages neutres de (PET) avec des seuils inférieurs et supérieurs ( $19\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 30\text{ °C}$ ) nettement plus élevées que le climat semi-aride de Constantine.

Alors que, les résultats de climats tempérés et froids ont montré que la plage de neutralité thermique est relativement étendue, comprise entre ( $6\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 25\text{ °C}$ ). Toutefois, dans les climats chauds et arides la plage de confort de (PET) a tendance à être supérieure à la plage neutre de (PET) de climat semi-aride.

En somme, la comparaison a démontré l'influence significative des conditions climatiques, des variations saisonnières et éventuellement des facteurs culturels sur la perception thermique et les températures neutres dans diverses régions climatiques. Elle souligne également l'importance de prendre en compte les facteurs climatiques, saisonniers et contextuels locaux lors de la conception et l'optimisation de l'environnement bâti.

En vue d'obtenir des indications sur l'adaptation thermique humaine à l'environnement thermique extérieur local, une synthèse des résultats de calibration sous différents climats a été également menée. Les études de cas qui ont calibré (ajusté) l'échelle complète de l'indice (PET) aux conditions climatiques locales, du seuil inférieur de la perception thermique « très froide » au seuil supérieur de la perception thermique « très chaude » ont révélé que, la plage de neutralité thermique de (PET) évolue vers un seuil d'adéquation plus bas avec la baisse des températures extérieures. Et elle s'étend davantage lorsque l'écart entre l'été et l'hiver s'accroît.

Autrement dit, l'amplitude des niveaux de perceptions thermique allant de « très chaud » à « très froid » varie selon les conditions climatiques et elle est plus importante que celle de l'indice (PET) d'origine développée pour l'Europe centrale et occidentale.

Par conséquent, l'indice du confort (PET) et ses catégories de perception thermique associées ne devrait pas être utilisé directement pour l'analyse du confort thermique extérieur en climat semi-aride de Constantine. Les limites des différentes échelles thermiques doivent être calibrées pour refléter au mieux la perception thermique de la population locale.

### **Limites et contraintes de la recherche**

Avant de conclure, il est essentiel d'aborder les défis et les contraintes rencontrés lors de l'élaboration de cette recherche, notamment :

Notre investigation de terrain dans les places publiques situées en plein cœur de la ville de Constantine au cours de l'été (Août 2021) a présenté des défis uniques associés à la période post-pandémique du COVID19 :

Premièrement, le respect des protocoles de restrictions de mobilité imposées ; distanciation social et couvre-feu, ce qui a eu un impact sur l'acquisition des données et a probablement affecté les attitudes et les perceptions des personnes interrogées.

Deuxièmement, le port de masques faciaux en espace public spécifiquement en temps chaud (températures extrêmes) a affecté considérablement le chercheur et les questionnés dans le recueil des données concernant la perception thermique. De plus, la précaution accrue des enquêtés à cause des problèmes sanitaires a eu un impact sur leur volonté de participer ou même sur la validité de leurs réponses. Nous avons travaillé avec ces facteurs post-pandémiques qui nous ont bloqué dans le temps et ont ajouté de la complexité à la collecte et l'interprétation des données. Par conséquent, nous les avons intégrés dans notre recherche sur l'évaluation de la perception thermique en extérieur.

Bien que les instruments de mesure micro-météorologiques soient essentiels pour capturer les variations diurnes des conditions environnementales dans les places publiques étudiées, ils peuvent être sensibles aux environnements chauds, des températures élevées peuvent affecter la performance de ces instruments, engendrant un dysfonctionnement ou des anomalies de mesure. De plus, la maintenance de l'appareil de mesure en extérieur peut être intimidante, nécessitant une protection contre les conditions météorologiques et humaines avec une planification des ressources pour garantir la fiabilité des résultats collectés.

Pour de multiples facteurs culturels, la collecte de certaines données nécessaires pour le calcul de l'indice du confort thermique pour chaque enquêté s'est avérée difficile, spécifiquement les questions concernant le type de vêtements et où ils se trouvaient avant de leur administrer le questionnaire. Cela peut être attribué à des préoccupations en matière de confidentialité. Par conséquent, l'acquisition des réponses précises a exigé des stratégies de communication et un examen attentif.

### **Perspectives de la recherche**

Dans cette recherche la méthode de régression linéaire a été utilisée pour calibrer les échelles de l'indice du confort (PET) sous un climat semi-aride de Constantine, Le problème lié à l'utilisation des données de (TSV) collectées au cours de l'enquête dans la régression

linéaire est que les votes de sensation thermique (TSV) ont une échelle ordinale, mais sont utilisés comme une échelle continue dans l'analyse des données par ce modèle.

Captivées par les études sur la perception du confort thermique, l'impact de cette hypothèse sur les résultats ne présente pour nous qu'un début. Nous sommes toujours intéressées par déterminer la neutralité thermique par une autre méthode statistique telle que, la régression logistique ordinale générant des modèles qui estiment les probabilités qu'un (TSV) conviendrait avec les neuf classes de (PET) dans la plage de données.

Les différences anthropométriques telles que l'âge, le sexe, la masse corporelle et type d'habillement peuvent influencer dans une certaine mesure les facteurs de subjectivité derrière les votes de sensation thermique rapportées dans les études menées en espace urbain. Une approche holistique de la perception thermique englobant à la fois les facteurs externes liés à l'environnement et les aspects internes liés au sujet pourrait être examinée à travers une méthode longitudinale couvrant ainsi une période plus prolongée (annuelle), afin d'évaluer plus amplement la perception thermique en extérieur.

Explorer la sensibilité, l'applicabilité et la validation des autres indices rationnels tels que l'UTCI, qui est basé sur le modèle thermo-physiologique le plus avancé, et l'indice OUT\_SET\* qui illustre une échelle intégrale de sensation thermique entourant la zone de confort thermique, nous ouvre ainsi de nouvelles pistes de recherche pour définir et classer la perception thermique dans les conditions environnementales locales.

## **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- Abreu-Harbach, L., Labaki, L., Matzarakis, A., 2013. Thermal bioclimate in idealized urban street canyons in Campinas, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0886-0>
- Alexander, C., Ishikawa, S., Silverstein, M., Jacobson, M., Fiksdahl-King, I., Angel, S., 1977. *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. Oxford University Press, New York.
- Ali, S.B., Patnaik, S., 2018. Thermal comfort in urban open spaces: Objective assessment and subjective perception study in tropical city of Bhopal, India. *Urban Climate* 24, 954–967. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.11.006>
- 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, 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- 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>
- Ananiadou-Tzimopoulou, M., Yérolympos, A., Vitopoulou, A., 2007. L'espace public et le rôle de la place dans la ville grecque moderne. *Évolution historique et enjeux contemporains. Études balkaniques. Cahiers Pierre Belon* 27–52.
- ASHRAE, 2009. *ASHRAE handbook: fundamentals*, SI ed. ed. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- ASHRAE Standard 55, 2010. *Thermal environmental conditions for human occupancy*. ANSI/ASHRAE Standard Atlanta, GA.
- Ata Chokhachian, Daniele Santucci, Thomas Auer, 2017. A Human-Centered Approach to Enhance Urban Resilience, Implications and Application to Improve Outdoor Comfort in Dense Urban Spaces. *Buildings* 7, 113. <https://doi.org/10.3390/buildings7040113>
- Bailly, A., 1974. La perception des paysages urbains. *L'Espace géographique* 3, 211–217. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1974.1486>
- Bailly, A., 1977. *La Perception de l'espace urbain : les concepts, les méthodes d'étude, leur utilisation dans la recherche urbanistique* / Antoine S. Bailly. CRU. Paris.
- Bassand, M., Compagnon, A., Joye, D., Stein, V., 2001. *Vivre et créer l'espace public*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).
- Batier, C., 2016. *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen* (phdthesis). Université de Montpellier,.
- Baudoux-Rousseau, L., Carbonnier, Y., Bragard, P., 2007. *La place publique urbaine. Du Moyen Age à nos jours*, Artois Presses Université. ed, Histoire (APU).
- Becker, S., Potchter, O., Yaakov, Y., 2003. Calculated and observed human thermal sensation in an extremely hot and dry climate. *Energy and Buildings* 35, 747–756. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00228-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00228-1)
- Belhedi, A., 2002. Les acteurs et l'espace. Quelques éléments de problématique, in: *Communication Faite Au Laboratoire Dynamiques & Planification Spatiales*, DPS. Faculté des Sciences Humaines & Sociales, Tunis.
- Benharkat, S., 2017. *La mise en ambiances thermiques et lumineuses des lieux d'enseignement universitaire* (Thesis). Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté d'architecture et d'urbanisme, Constantine.

- Benhassine-Touam, N., 2009. La pratique de la récréation dans les espaces verts interurbains à Constantine, pour une stratégie verte dans un urbanisme de santé et de bien-être. Thèse de doctorat en sciences en urbanisme soutenue à l'université Mentouri de Constantine
- Benhassine-Touam, N., Labii, B., 2011, Une stratégie verte dans un urbanisme de sante et de bien-être à Constantine : une approche méthodologique. La revue Sciences & Technologie D – N°33, Juin (2011), pp. 23-35.
- Berger, X., Sari, H., 2000. A new dynamic clothing model. Part 1: Heat and mass transfers. *International Journal of Thermal Sciences* 39, 635–645. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(00\)00211-8](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)00211-8)
- Bertrand, M.-J., Listowski, H., 1984. Les places dans la ville: lectures d'un espace public. Dunod.
- Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A., 2010. Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscellanea Geographica* 14, 91–102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., Tinz, B., 2012. Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int J Biometeorol* 56, 515–535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
- Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., Kampmann, B., 2013. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geogr. Pol.* 86, 5–10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>
- Bouchareb, A., 2020. Épuisement d'un lieu public constantinois. Place Si El Houes (Place du Palais du Bey)1. *VILLES ET PROJETS, SAVOIRS ET ACTIONS*. Consulté le 10 mai 2022, à l'adresse <https://doi.org/10.58079/v9ae>
- Bouketta, S., Bouchahm, Y., 2020. Numerical evaluation of urban geometry's control of wind movements in outdoor spaces during winter period. Case of Mediterranean climate. *Renewable Energy* 146, 1062–1069. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.012>
- Bourbia, F., Awbi, H.B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements. *Renewable Energy* 29, 249–262. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00170-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00170-8)
- Bourbia, F., Boucheriba, F., 2010. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy* 35, 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017>
- Boussoualim, A., 2002. Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat surl'usage et les activités en espace public extérieur- Etude de cas à Blagnac -.
- Boutebba, L., 2019. Requalifier l'espace public pour humaniser la ville rapports entre, usager, espace et image (Thesis). Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté d'architecture et d'urbanisme.
- Brager, G.S., de Dear, R.J., 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings* 27, 83–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* 56, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

- Brown, R.D., Gillespie, T.J., 1990. Estimating radiation received by a person under different species of shade trees. <https://doi.org/10.48044/jauf.1990.038>
- Brunet, R., 1974. Espace, perception et comportement. *L'Espace géographique* 3, 189–204. <https://doi.org/10.3406/spgeo.1974.1481>
- Bruse, M., 2007. Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi- Agent System, in: PLEA2007. Presented at the Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA, Wittkopf, St. and Tan, B. K., Singapore, pp. 699–706.
- Budd, G.M., 2008. Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine in Sport, Heat Stress in Sport* 11, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.003>
- Campbell-Lendrum, D., Corvalán, C., 2007. Climate Change and Developing-Country Cities: Implications For Environmental Health and Equity. *J Urban Health* 84, 109–117. <https://doi.org/10.1007/s11524-007-9170-x>
- Canan, F., Golasi, I., Ciancio, V., Coppi, M., Salata, F., 2019. Outdoor thermal comfort conditions during summer in a cold semi-arid climate. A transversal field survey in Central Anatolia (Turkey). *Building and Environment* 148, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.008>
- Canan, F., Golasi, I., Falasca, S., Salata, F., 2020a. Outdoor thermal perception and comfort conditions in the Köppen-Geiger climate category BSk. One-year field survey and measurement campaign in Konya, Turkey. *Science of The Total Environment* 738, 140295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140295>
- Canan, F., Golasi, I., Falasca, S., Salata, F., 2020b. Outdoor thermal perception and comfort conditions in the Köppen-Geiger climate category BSk. One-year field survey and measurement campaign in Konya, Turkey. *Science of The Total Environment* 738, 140295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140295>
- Candas, V., 2000. Confort thermique. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Candas, V., Dufour, A., 2005. Thermal Comfort: Multisensory Interactions? *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science* 24, 33–36. <https://doi.org/10.2114/jpa.24.33>
- Chalas, Y., 1997. Territoires contemporains et représentations: des vieux paradigmes urbanistiques aux nouvelles figures de la ville. *Revue de Géographie Alpine* 85, 11–36. <https://doi.org/10.3406/rga.1997.3934>
- Chen, L., Ng, E., 2012. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: A review of research in the past decade. *Cities* 29, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.08.006>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology* 32, 121–136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Chen, X., Gao, L., Xue, P., Du, J., Liu, J., 2020. Investigation of outdoor thermal sensation and comfort evaluation methods in severe cold area. *Science of The Total Environment* 749, 141520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141520>
- Chen, X., Xue, P., Liu, L., Gao, L., Liu, J., 2018. Outdoor thermal comfort and adaptation in severe cold area: A longitudinal survey in Harbin, China. *Building and Environment* 143, 548–560. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.041>
- 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. *Int J Biometeorol* 56, 43–56. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0396-z>

- Cheung, P.K., Jim, C.Y., 2018. Subjective outdoor thermal comfort and urban green space usage in humid-subtropical Hong Kong. *Energy and Buildings* 173, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.029>
- Cheung, P.K., Jim, C.Y., 2017. Determination and application of outdoor thermal benchmarks. *Building and Environment* 123, 333–350. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.008>
- Chow, W.T.L., Akbar, S.N., Assyakirin B.A., Heng, S.L., Roth, M., 2016. Assessment of measured and perceived microclimates within a tropical urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* 16, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.01.010>
- Climate Change | UN-Habitat [WWW Document], 2020. URL <https://unhabitat.org/climate-change> (accessed 1.23.20).
- 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>
- Cutini, V., 2003. Lines and squares: Towards a configurational approach to the morphology of openspaces, in: *Proceedings . 4th International Space Syntax Symposium*. London, UK.
- da Silva, F., de Alvarez, C., 2015. An integrated approach for ventilation’s assessment on outdoor thermal comfort. *Building and Environment* 87, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.018>
- d’Ambrosio Alfano, F.R., Palella, B.I., Riccio, G., 2011. Thermal environment assessment reliability using temperature–humidity indices. *Ind Health* 49, 95–106. <https://doi.org/10.2486/indhealth.ms1097>
- de Dear, R., Brager, G., Cooper, D., 1998. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference- FINAL REPORT ASHRAE RP- 884.
- de Dear, R., Pickup, J., 2000. An outdoor thermal comfort index (Out\_SET\*)–Part 1–The model and its assumptions, in: *Proceedings of the 15th International Congress on Biometeorology and International Conference on Urban Climatology*. Presented at the 15th international congress on biometeorology and international conference on urban climatology, Sydney, Australia; 8e12 Nov 1999, Sydney, Australia, pp. 279–283.
- Depecker, P., Izard, J.-L., Traisnel, J.-P., 1989. *Qualité thermique des ambiances 1, Cahiers pédagogiques Thermique et Architecture*. Agence Française pour la Maîtrise de l’Energie, Paris.
- Du Bois, D., Du Bois, E.F., 1989. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916. *Nutrition* 5, 303–311; discussion 312-313.
- Duby, G., 1999. *Histoire de la vie privée. Tome II. Pouvoir privé, pouvoir public*. Seuil.
- Ebi, K.L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., Dear, R. de, Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R.S., Ma, W., Malik, A., Morris, N.B., Nybo, L., Seneviratne, S.I., Vanos, J., Jay, O., 2021. Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet* 398, 698–708. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3)
- Eliasson, I., 2000. The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning* 48, 31–44. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00034-7)
- Elnabawi, M.H., Hamza, N., 2020. A Behavioural Analysis of Outdoor Thermal Comfort: A Comparative Analysis between Formal and Informal Shading Practices in Urban Sites. *Sustainability* 12, 9032. <https://doi.org/10.3390/su12219032>

- Elnabawi, M.H., Hamza, N., Dudek, S., 2016. Thermal perception of outdoor urban spaces in the hot arid region of Cairo, Egypt. *Sustainable Cities and Society* 22, 136–145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.005>
- Eludoyin, O.M., Adelekan, I.O., 2013. The physiologic climate of Nigeria. *Int J Biometeorol* 57, 241–264. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0549-3>
- Emmanuel, R., 2016. *Urban Climate Challenges In The Tropics: Rethinking Planning And Design Opportunities*. World Scientific.
- Energy | UN-Habitat [WWW Document], 2020. URL <https://unhabitat.org/topic/energy> (consulté le: 1/23/2020).
- Erell, E., Pearlmutter, D., Williamson, T., 2011. Urban Microclimate – Designing the Spaces Between Buildings. Presented at the CITY WEATHERS: METEOROLOGY AND URBAN DESIGN, The University of Manchester.
- Erell, E., Pearlmutter, D., Williamson, T., 2010. *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. Routledge, London. <https://doi.org/10.4324/9781849775397>
- Fabbri, K., 2015. A Brief History of Thermal Comfort: From Effective Temperature to Adaptive Thermal Comfort, in: Fabbri, K. (Ed.), *Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children*. Springer International Publishing, Cham, pp. 7–23. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18651-1_2)
- Fanger, P.O., 1972. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G., 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 56, 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>
- Fischer, G.-N., 1997. *Psychologie sociale de l'environnement*, 2ème édition. ed. Dunod, Paris.
- Fleury, A., 2010. Espace public. HyperGeo. URL <https://hypergeo.eu/espace-public/> (accessed 1.17.24).
- Foura Mohamed & Yasmina, Yasmina, 2003. Les places publiques dans la ville de Constantine. *Villes en Parallèle* 36, 316–339. <https://doi.org/10.3406/vilpa.2003.1405>
- Frank, U., Krüger, M., Schwarz, N., Grossmann, K., Röder, S., Schlink, U., 2013. Heat stress in urban areas : indoor and outdoor temperatures in different urban structure types and subjectively reported well-being during a heat wave in the city of Leipzig. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 167–177. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0384>
- Fu, M., Weng, W., Chen, W., Luo, N., 2016. Review on modeling heat transfer and thermoregulatory responses in human body. *Journal of Thermal Biology, Modeling bioheat transfer processes and thermoregulatory responses* 62, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.06.018>
- Gagge, A.P., 1936. The linearity criterion as applied to partitional calorimetry. *American Journal of Physiology-Legacy Content* 116, 656–668. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1936.116.3.656>
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L.G., 1986. A STANDARD PREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT. *ASHRAE Trans* 92: 709–731.
- Gauthiez, B., 2003. *Espace urbain : vocabulaire et morphologie*. Editions du Patrimoine, Paris.
- Gehl, J., 2011. *Life Between Buildings: Using Public Space*, Sixth Edition, Sixth Edition, Sixth. ed. Island Press, Washington, DC.

- Giedion, S., 2009. *Space, Time and Architecture*, 5th edition. ed. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Givoni, 1978. *L’homme, l’architecture et le climat*. Editions du Moniteur.
- Givoni, B., 1963. Estimation of the effect of climate on man; development of a new thermal index (phd). Hebrew University, Jerusalem.
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., Becker, S., 2003. Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings* 35, 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)
- Gobo, J.P.A., Galvani, E., Wollmann, C.A., 2018. Subjective Human Perception of Open Urban Spaces in the Brazilian Subtropical Climate: A First Approach. *Climate* 6, 24. <https://doi.org/10.3390/cli6020024>
- Hadianpour, M., Mahdavinejad, M., Bemanian, M., Nasrollahi, F., 2018. Seasonal differences of subjective thermal sensation and neutral temperature in an outdoor shaded space in Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society* 39, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.003>
- Han, S., Song, D., Xu, L., Ye, Y., Yan, S., Shi, F., Zhang, Y., Liu, X., Du, H., 2022. Behaviour in public open spaces: A systematic review of studies with quantitative research methods. *Building and Environment* 223, 109444. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109444>
- He, X., An, L., Hong, B., Huang, B., Cui, X., 2020. Cross-cultural differences in thermal comfort in campus open spaces: A longitudinal field survey in China’s cold region. *Building and Environment* 172, 106739. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106739>
- Hedquist, B.C., Brazel, A.J., 2014. Seasonal variability of temperatures and outdoor human comfort in Phoenix, Arizona, U.S.A. *Building and Environment* 72, 377–388. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.018>
- Heris, M.P., Middel, A., Muller, B., 2020. Impacts of form and design policies on urban microclimate: Assessment of zoning and design guideline choices in urban redevelopment projects. *Landscape and Urban Planning* 202, 103870. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103870>
- Hillier, B., Hanson, J., 1984. *The Social Logic of Space*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511597237>
- Hirashima, S.Q. da S., Katzschner, A., Ferreira, D.G., Assis, E.S. de, Katzschner, L., 2018. Thermal comfort comparison and evaluation in different climates, in: *ICUC9: The 9th International Conference on Urban Climate, Urban Climate*. pp. 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.007>
- Hoffmann, J.B., 1994. *Ambiances climatisées et confort thermique*. COSTIC, s.l.
- Honjo, T., Tzu-Ping Lin, Seo, Y., 2019. Sky view factor measurement by using a spherical camera. *J. Agric. Meteorol.* 75, 59–66. <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-18-00027>
- Houghton, F.C. and Yaglou, C.P. (1923) Determining Equal Comfort Lines. *J. Am. Soc. Heating and Ventilation in England*, 29, 165-176.
- Höppe, P., 2002. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings, Special Issue on Thermal Comfort Standards* 34, 661–665. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00017-8)
- Höppe, P., 1999. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>

- Huang, K.-T., Li, Y.-J., 2017. Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: A parametric analysis using orthogonal experiment. *Energy and Buildings* 154, 448–464. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.054>
- Huang, T., Li, J., Xie, Y., Niu, J., Mak, C.M., 2017. Simultaneous environmental parameter monitoring and human subject survey regarding outdoor thermal comfort and its modelling. *Building and Environment* 125, 502–514. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.015>
- Huang, Z., Cheng, B., Gou, Z., Zhang, F., 2019. Outdoor thermal comfort and adaptive behaviors in a university campus in China's hot summer-cold winter climate region. *Building and Environment* 165, 106414. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106414>
- Humphreys, M., Nicol, F., 1998. Understanding the adaptive approach to thermal comfort. *ASHRAE Transactions* 104, 991–1004.
- Humphreys, M., Hancock, M., 2007. Do people like to feel 'neutral'? Exploring the variation of the desired sensation on the ASHRAE scale. *Energy and Buildings* 39, 867–874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.014>
- Hwang, R.-L., Lin, T.-P., 2007. Thermal Comfort Requirements for Occupants of Semi-Outdoor and Outdoor Environments in Hot-Humid Regions. *Architectural Science Review* 50, 357–364. <https://doi.org/10.3763/asre.2007.5043>
- Hwang, R.-L., Lin, T.-P., Cheng, M.-J., Lo, J.-H., 2010. Adaptive comfort model for tree-shaded outdoors in Taiwan. *Building and Environment* 45, 1873–1879. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.021>
- Indraganti, M., Humphreys, M.A., 2021. A comparative study of gender differences in thermal comfort and environmental satisfaction in air-conditioned offices in Qatar, India, and Japan. *Building and Environment* 206, 108297. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108297>
- Indraganti, M., Rao, K.D., 2010. Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations. *Energy and Buildings* 42, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.003>
- ISO 8996:2004. Ergonomics of the thermal environment—Determination of metabolic rate.
- ISO 9920:2007. Ergonomics of the thermal environment—Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble
- ISO 10551:2019. Ergonomics of the Thermal Environment – Subjective judgement scales for assessing physical environments.
- ISO: 7726. Ergonomics of the Thermal Environment Instruments and Method for Measuring Physical Quantities, International Standard Organization, Geneva, 1998.
- ISO 7243: 2017. Ergonomics of the thermal environment –Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index.
- Jacobs, J., Paquot, T., Parin, C., 2012. *Déclin et survie des grandes villes américaines*. Parenthèses Editions, Marseille.
- Jakovljevic, N., Culot, M., 1984. *Places et Monuments*. Mardaga Editions, Liège.
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G., 2012. UTCI—Why another thermal index? *Int J Biometeorol* 56, 421–428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Jeong, M.-A., Park, S., Song, G.-S., 2016. Comparison of human thermal responses between the urban forest area and the central building district in Seoul, Korea. *Urban Forestry & Urban Greening* 15, 133–148. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.12.005>

- Jin, H., Liu, S., Kang, J., 2020. Gender differences in thermal comfort on pedestrian streets in cold and transitional seasons in severe cold regions in China. *Building and Environment* 168, 106488. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106488>
- Johansson, E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment* 41, 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., 2014. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate, ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment* 10, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.12.002>
- Johansson, E., Yahia, M.W., Arroyo, I., Bengs, C., 2018. Outdoor thermal comfort in public space in warm-humid Guayaquil, Ecuador. *Int J Biometeorol* 62, 387–399. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1329-x>
- Kähkönen, E., Nykyri, E., Tammela, E., Ilmarinen, R., Seppälä, T., 1990. The accuracy of estimating the thermal insulation of clothing ensembles — the effect of appraisers. *Applied Ergonomics* 21, 325–330. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(90\)90204-B](https://doi.org/10.1016/0003-6870(90)90204-B)
- Karjalainen, S., 2012. Thermal comfort and gender: a literature review. *Indoor Air* 22, 96–109. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00747.x>
- Karyono, T.H., 2000. Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta Indonesia. *Building and Environment*.
- Kastendeuch, P.P., 2013. A method to estimate sky view factors from digital elevation models. *International Journal of Climatology* 33, 1574–1578. <https://doi.org/10.1002/joc.3523>
- Katzschner, L., 2006. Behaviour of people in open spaces in dependency of thermal comfort conditions, in: *INTERNACIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE – PLEA*, 19. pp. 411–415.
- Kedissa, C., 2020. Pour une géométrie urbaine combinant confort thermique extérieur et économie d'énergie (Thesis). Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté d'architecture et d'urbanisme.
- Kedissa, C., Outtas, S., Belarbi, R., 2016. The impact of height/width ratio on the microclimate and thermal comfort levels of urban courtyards. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development* 7, 174–183. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2017.1302830>
- Kenawy, I., Elkadi, H., 2018. The outdoor thermal benchmarks in Melbourne urban climate. *Sustainable Cities and Society* 43, 587–600. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.004>
- Kenawy, I., Elkadi, H., 2012. Effect of personal and cultural diversity on outdoor thermal comfort perception. Presented at the Conference: Urban Climate. International Conference, Dublin, Ireland.
- Kenny, G.P., Jay, O., 2013. Thermometry, Calorimetry, and Mean Body Temperature during Heat Stress, in: *Comprehensive Physiology*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1689–1719. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130011>
- Keribeche, J. 2011a. Rapport de présentation : PPSMVSS vieille ville de Constantine, Phase III : rédaction finale du PPSMVSS. Direction de la culture de la wilaya de Constantine, OGEBC.
- Keribeche, J. 2011b. Dossier graphique : PPSMVSS vieille ville de Constantine, Phase III : rédaction finale du PPSMVSS La Direction de la culture de la wilaya de Constantine, OGEBC.

- Knez, I., Thorsson, S., 2006. Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square. *Int J Biometeorol* 50, 258–268. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0024-0>
- Koenigsberger, O.H., Ingersoll, T.G., Mayhew, A., Szokolay, S.V., 1975. *Manual of Tropical Housing and Building: Climate Design*. Orient Blackswan, Hyderabad.
- Korosec-Serfaty, 1999. *Grand'place : Identité et pratiques quotidiennes d'un espace public urbain*. CNRS Editions, Paris.
- Korosec-Serfaty, P., 1988. La sociabilité publique et ses territoires – Places et espaces publics urbains. *Architecture et comportement* 4, 111–132.
- Krier, R., 1975. L'espace de la ville: theorie et pratique. *Archives d'Architecture Moderne*.
- Krüger, E., Drach, P., Emmanuel, R., Corbella, O., 2013. Assessment of daytime outdoor comfort levels in and outside the urban area of Glasgow, UK. *Int J Biometeorol* 57, 521–533. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0578-y>
- Kruger, E.L., Drach, P., 2017. Identifying potential effects from anthropometric variables on outdoor thermal comfort. *Building and Environment* 117, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.020>
- Krüger, E.L., Rossi, F.A., 2011a. Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. *Building and Environment* 46, 690–697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.013>
- Krüger, Silva, T.J.V., da Silveira Hirashima, S.Q., da Cunha, E.G., Rosa, L.A., 2020. Calibrating UTCI'S comfort assessment scale for three Brazilian cities with different climatic conditions. *Int J Biometeorol* 65, 1463–1472. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01897-x>
- Labdaoui, K., Mazouz, S., Reiter, S., Teller, J., 2021. Thermal perception in outdoor urban spaces under the Mediterranean climate of Annaba, Algeria. *Urban Climate* 39, 100970. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100970>
- Lai, D., Guo, D., Hou, Y., Lin, C., Chen, Q., 2014a. Studies of outdoor thermal comfort in northern China. *Building and Environment* 77, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.026>
- Lai, D., Guo, D., Hou, Y., Lin, C., Chen, Q., 2014b. Studies of outdoor thermal comfort in northern China. *Building and Environment* 77, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.026>
- Lai, D., Lian, Z., Liu, Weiwei, Guo, C., Liu, Wei, 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., Zhou, X., Chen, Q., 2017. Modelling dynamic thermal sensation of human subjects in outdoor environments. *Energy and Buildings* 149, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.028>
- Lam, C.K.C., Gallant, A.J.E., Tapper, N.J., 2018. Perceptions of thermal comfort in heatwave and non-heatwave conditions in Melbourne, Australia. *Urban Climate, ICUC9: The 9th International Conference on Urban Climate* 23, 204–218. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.006>
- Lau, K.K.-L., Shi, Y., Ng, E.Y.-Y., 2019. Dynamic response of pedestrian thermal comfort under outdoor transient conditions. *Int J Biometeorol* 63, 979–989. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01712-2>
- Lévy, J., Lussault, M., Collectif, 2013. *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Enlarged édition. ed. BELIN LITTERATURE ET REVUES, Paris.
- Li, J., Niu, J., Mak, C.M., Huang, T., Xie, Y., 2018. Assessment of outdoor thermal comfort in Hong Kong based on the individual desirability and acceptability of sun and wind

- conditions. *Building and Environment* 145, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.059>
- Li, K., Zhang, Y., Zhao, L., 2016. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China. *Energy and Buildings* 133, 498–511. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.013>
- Lin, B.-S., Lin, C.-T., 2016. Preliminary study of the influence of the spatial arrangement of urban parks on local temperature reduction. *Urban Forestry & Urban Greening* 20, 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.003>
- Lin, T., De Dear, R., Hwang, R., 2011. Effect of thermal adaptation on seasonal outdoor thermal comfort. *Intl Journal of Climatology* 31, 302–312. <https://doi.org/10.1002/joc.2120>
- Lin, T., 2009. Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment* 44, 2017–2026. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.004>
- Lin, T., Matzarakis, A., 2008. Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *Int J Biometeorol* 52, 281–290. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0122-7>
- Lin, T., Tsai, K.-T., Liao, C.-C., Huang, Y.-C., 2013. Effects of thermal comfort and adaptation on park attendance regarding different shading levels and activity types. *Building and Environment* 59, 599–611. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.005>
- Lindberg, F., 2010. Sky View Factor Calculator.
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., 2010. Continuous sky view factor maps from high resolution urban digital elevation models. *Climate Research* 42, 177–183. <https://doi.org/10.3354/cr00882>
- Lindner-Cendrowska, K., Błażejczyk, K., 2018. Impact of selected personal factors on seasonal variability of recreationist weather perceptions and preferences in Warsaw (Poland). *Int J Biometeorol* 62, 113–125. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1220-1>
- Litmaps online research platform,(n.d.) URL <https://app.litmaps.com>(accessed 11.2.22)
- Liu, S., Nazarian, N., Niu, J., Hart, M.A., de Dear, R., 2020. From thermal sensation to thermal affect: A multi-dimensional semantic space to assess outdoor thermal comfort. *Building and Environment* 182, 107112. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107112>
- Liu, W., Zhang, Y., Deng, Q., 2016. The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate. *Energy and Buildings* 128, 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.086>
- Lopes, H., Remoaldo, P., Ribeiro, V., Martin-Vide, J., 2021. Perceptions of human thermal comfort in an urban tourism destination - A case study of Porto (Portugal). *Building and Environment* 205, 108246. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108246>
- Louafi, S., Abdou, S., Reiter, S., 2017. Effect of vegetation cover on thermal and visual comfort of pedestrians in urban spaces in hot and dry climate.
- Lynch, K., 1998. *L'Image de la cité*. Dunod.
- MacIntyre, D.A., 1980. *Indoor climate*. Applied Science Publishers, London.
- Mahmoud, A.H.A., 2011. Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Building and Environment* 46, 2641–2656. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.025>
- Makvandi, M., Zhou, X., Li, C., Deng, Q., 2021. A Field Investigation on Adaptive Thermal Comfort in an Urban Environment Considering Individuals' Psychological and

- Physiological Behaviors in a Cold-Winter of Wuhan. *Sustainability* 13, 678. <https://doi.org/10.3390/su13020678>
- Marry, S., 2011. L'espace public sonore ordinaire : les paramètres de la perception sonore dans les espaces publics : contribution à une connaissance de l'ambiance sonore. (phdthesis). Université de Grenoble.
- Masterton, J.M., Richardson, F.A., 1979. Humidex ; a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity, Canada. Environment Canada, Atmospheric Environment, Downsview, Ont.
- Matzarakis, A., 2020. A Note on the Assessment of the Effect of Atmospheric Factors and Components on Humans. *Atmosphere* 11, 1283. <https://doi.org/10.3390/atmos11121283>
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M.G., 1999. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int J Biometeorol* 43, 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Matzarakis, A., Rutz, F., 2010. Application of the RayMan model in urban environments, in: Undefined. Presented at the Ninth Symposium on the Urban Environment of the American Meteorological Society, Keystone Colorado, USA.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 54, 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Mavridou, M., 2012. Perception of Three-Dimensional Urban Scale in an Immersive Virtual Environment. *Environ Plann B Plann Des* 39, 33–47. <https://doi.org/10.1068/b34049>
- Mebarki, R., 2012. L'INFLUENCE DE LA FORME ET DE L'EMPLACEMENT SUR L'APPROPRIATION DES PLACES ET PLACETTES PUBLIQUES Cas d'étude à Batna (masters). Université Mohamed Khider Biskra. [https://doi.org/10.2\\_4%20Chapitre%206%20Analyse%20des%20places%20selection%20C3%A9es.pdf](https://doi.org/10.2_4%20Chapitre%206%20Analyse%20des%20places%20selection%20C3%A9es.pdf)
- Merenne-Schoumaker B., 1977. Perception de l'espace et quartiers urbains · GéoProdig, portail d'information géographique. G.E.O. (Géographie, écologie-environnement, organisation de l'espace) 33–44.
- Merlin, P., Choay, F., Collectif, 2010. Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, 3e édition. ed. Presses Universitaires de France - PUF, Paris.
- Mi, J., Hong, B., Zhang, T., Huang, B., Niu, J., 2020. Outdoor thermal benchmarks and their application to climate-responsive designs of residential open spaces in a cold region of China. *Building and Environment* 169, 106592. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106592>
- Middel, A., Häb, K., Brazel, A.J., Martin, C.A., Guhathakurta, S., 2014. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning* 122, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., 2017. Sky View Factors from Synthetic Fisheye Photos for Thermal Comfort Routing—A Case Study in Phoenix, Arizona. *Urban Planning* 2, 19–30. <https://doi.org/10.17645/up.v2i1.855>
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., Roth, M., 2018. Sky View Factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate* 25, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
- Middel, A., Selover, N., Hagen, B., Chhetri, N., 2016. Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. *Int J Biometeorol* 60, 1849–1861. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>

- Missenard, F.A.A. du texte, 1933. Étude physiologique et technique de la ventilation, par F. A. Missenard. Préface de M. le professeur Balthazard.
- Moles, A., Rohmer, E., 1998. Psychosociologie de l'espace. Editions L'Harmattan, Paris.
- Morakinyo, T.E., Dahanayake, K.W.D.Kalani.C., Adegun, O.B., Balogun, A.A., 2016. Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Buildings* 130, 721–732. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.087>
- Morakinyo, T.E., Kong, L., Lau, K.K.-L., Yuan, C., Ng, E., 2017. A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment* 115, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Moser, G., 1994. Psychologie environnementale, 1er édition. ed. De Boeck - Wesmael, Bruxelles.
- Moujalled, B., 2007. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés (These de doctorat). Lyon, INSA.
- Naboni, E., Natanian, J., Brizzi, G., Florio, P., Chokhachian, A., Galanos, T., Rastogi, P., 2019. A digital workflow to quantify regenerative urban design in the context of a changing climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113, 109255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109255>
- Nasrollahi, N., Hatami, M., Khastar, S.R., Taleghani, M., 2017a. Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate. *Sustainable Cities and Society* 35, 449–467. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.017>
- Nasrollahi, N., Hatami, Z., Taleghani, M., 2017b. Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan. *Building and Environment* 125, 356–372. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.006>
- Nasrollahi, N., Namazi, Y., Taleghani, M., 2021. The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran. *Sustainable Cities and Society* 65, 102638. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102638>
- Nazarian, N., Fan, J., Sin, T., Norford, L., Kleissl, J., 2017. Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature. *Urban Climate* 20, 251–267. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.011>
- Ndetto, E.L., Matzarakis, A., 2017. Assessment of human thermal perception in the hot-humid climate of Dar es Salaam, Tanzania. *Int J Biometeorol* 61, 69–85. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1192-1>
- Nicol, F., 1993. Thermal Comfort: A Handbook for Field Studies Towards an Adaptive Model. University of East London.
- Nicol, F., Humphreys, M., Roaf, S., 2012. Adaptive thermal comfort: Principles and practice. Spon press Earthscan, New York.
- Nicolas, J., 2014. De Paysage en Architecture - Énoncé critique.
- Nikolopoulou, M., 2004. Designing Open Spaces in the Urban Environment: a Bioclimatic Approach. Centre Renewable Energy Sources (C.R.E.S.).
- Nikolopoulou, M., Baker, N., Steemers, K., 2001. Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy, Urban Environment* 70, 227–235. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)

- Nikolopoulou, M., Baker, N., Steemers, K., 1999. THERMAL COMFORT IN URBAN SPACES: DIFFERENT FORMS OF ADAPTATION. Presented at the Proceedings of the REBUILD 1999 on Shaping Our Cities for the 21st Century, Barcelona.
- Nikolopoulou, M., Lykoudis, S., 2007. Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area. *Building and Environment* 42, 3691–3707. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.09.008>
- Nikolopoulou, M., Lykoudis, S., 2006. Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment* 41, 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* 7.
- Niu, J., Liu, J., Lee, T., Lin, Z. (John), Mak, C., Tse, K.-T., Tang, B., Kwok, K.C.S., 2015. A new method to assess spatial variations of outdoor thermal comfort: Onsite monitoring results and implications for precinct planning. *Building and Environment, Fifty Year Anniversary for Building and Environment* 91, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.017>
- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Othman, N.E., Zaki, S.A., Rijal, H.B., Ahmad, N.H., Razak, A.A., 2021. Field study of pedestrians' comfort temperatures under outdoor and semi-outdoor conditions in Malaysian university campuses. *Int J Biometeorol* 65, 453–477. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02035-3>
- Ouis, A., Benhassine, N., Canan, F., 2023. Outdoor thermal perception in the semi-arid climate of Constantine, Algeria: A field survey during the post-COVID-19. *Building and Environment* 245, 110920. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110920>
- Pantavou, K., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., Theoharatos, G., 2014. Empirical calibration of thermal indices in an urban outdoor Mediterranean environment. *Building and Environment* 80, 283–292. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.001>
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 2013a. Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment* 66, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.014>
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 2013b. Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment* 66, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.02.014>
- Parsons, K., 2014. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/b16750>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Perera, K., Schnabel, M.A., Donn, M., Maddewithana, H., 2015. Addressing human thermal adaptation in outdoor comfort research - A Literature Review, in: “Making Built Environments Responsive”: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference of Faculty of Architecture Research Unit (FARU). University of Moratuwa, Sri Lanka, pp. 477–490.

- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2022. A systematic review advocating a framework and benchmarks for assessing outdoor human thermal perception. *Science of The Total Environment* 833, 155128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155128>
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2018a. 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>
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2018b. 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>
- Qaid, A., Ossen, D.R., 2015. Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. *Int J Biometeorol* 59, 657–677. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0878-5>
- Rice, W.L., Mateer, T.J., Reigner, N., Newman, P., Lawhon, B., Taff, B.D., 2020. Changes in recreational behaviors of outdoor enthusiasts during the COVID-19 pandemic: analysis across urban and rural communities. *Journal of Urban Ecology* 6, juaa020. <https://doi.org/10.1093/jue/juaa020>
- Roberge, R.J., Kim, J.-H., Coca, A., 2012. Protective Facemask Impact on Human Thermoregulation: An Overview. *The Annals of Occupational Hygiene* 56, 102–112. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer069>
- Ruiz, M.A., Correa, E.N., 2015. Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate. *Building and Environment* 85, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.018>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A., 2016a. 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>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A., 2016b. 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>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A., 2016c. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society* 26, 318–343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- Santos Nouri, A., Charalampopoulos, I., Afacan, Y., Matzarakis, A., 2023. Detection and quantification of seasonal human heat and cold stress frequencies in representative existing and future urban canyons: the case of Ankara. *Theor Appl Climatol* 153, 593–620. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04482-5>
- Sayad, B., Alkama, D., 2021. A Combined Approach to Predict the Human Thermal Comfort in Downtown Guelma-Algeria. *Int J Innov Stud Sociol Humanities* 6, 14. <https://doi.org/10.20431/2456-4931.060101>
- Schellen, L., Van Marken Lichtenbelt, W.D., Loomans, M.G.L.C., Toftum, J., De Wit, M.H., 2010. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition. *Indoor Air* 20, 273–283. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00657.x>

- Schweiker, M., Huebner, G.M., Kingma, B.R.M., Kramer, R., Pallubinsky, H., 2018. Drivers of diversity in human thermal perception – A review for holistic comfort models. *Temperature* 5, 308–342. <https://doi.org/10.1080/23328940.2018.1534490>
- Schweiker, M., Schakib-Ekbatan, K., Fuchs, X., Becker, S., 2020. A seasonal approach to alliesthesia. Is there a conflict with thermal adaptation? *Energy and Buildings* 212, 109745. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109745>
- Shih, W.-M., Lin, T.-P., Tan, N.-X., Liu, M.-H., 2017. Long-term perceptions of outdoor thermal environments in an elementary school in a hot-humid climate. *Int J Biometeorol* 61, 1657–1666. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1345-x>
- Shooshtarian, Rajagopalan, 2019. Perception of Wind in Open Spaces. *Climate* 7, 106. <https://doi.org/10.3390/cli7090106>
- Shooshtarian, S., Ridley, I., 2017. The effect of physical and psychological environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts. *Building and Environment* 115, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.022>
- Shooshtarian, S., Ridley, I., 2016a. Determination of acceptable thermal range in outdoor built environments by various methods. *Smart and Sustainable Built Environment* 5, 352–371. <https://doi.org/10.1108/SASBE-06-2016-0010>
- Shooshtarian, S., Ridley, I., 2016b. The effect of individual and social environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts. *Sustainable Cities and Society* 26, 119–133. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.005>
- Shooshtarian, S., Ridley, I., 2016c. The effect of individual and social environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts. *Sustainable Cities and Society* 26, 119–133. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.005>
- Sitte, C., 1996. *L’art de bâtir les villes*. Seuil.
- Slimani, M.S., Mazouz, S., 2019. Outdoor thermal comfort in two types of canyon : the regulated and the traditional streets, Case study from Bechar city Le confort thermique extérieur dans deux rues de type canyon : la règlementée et la traditionnelle, Cas de la ville de Bechar Urbanisme, habitat et cadre de vie.
- Song, B., Park, K., 2015. Contribution of Greening and High-Albedo Coatings to Improvements in the Thermal Environment in Complex Urban Areas. *Advances in Meteorology* 2015, e792172. <https://doi.org/10.1155/2015/792172>
- 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, 721–738. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3)
- Steadman, R.G., 1984. A Universal Scale of Apparent Temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 23, 1674–1687. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2)
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., 2013. AR5 Climate Change 2013: The Physical Science Basis — IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (No. 5), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sun, C., Zhai, Z., 2020. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. *Sustainable Cities and Society* 62, 102390. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102390>
- Sun, S., Xu, X., Lao, Z., Liu, W., Li, Z., Higuera García, E., He, L., Zhu, J., 2017. Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on

- thermal comfort in hot summer by numerical simulation. *Building and Environment* 123, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.010>
- Tang, T., Zhu, Y., Zhou, X., Guo, Z., Mao, Y., Jiang, H., Fang, Z., Zheng, Z., Chen, X., 2022. Investigation of the effects of face masks on thermal comfort in Guangzhou, China. *Building and Environment* 214, 108932. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108932>
- Thellier, F., 1999. L'homme et son environnement thermique. Modélisation.
- Thorsson, S., Lindqvist, M., Lindqvist, S., 2004. Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden. *International Journal of Biometeorology* 48, 149–156. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0189-8>
- Tomas, F., 2003. Les temporalités des villes. PU Saint-Etienne.
- 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, 1346–1352. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.009>
- Tseliou, A., Tsiros, I.X., Nikolopoulou, M., 2017a. Seasonal differences in thermal sensation in the outdoor urban environment of Mediterranean climates – the example of Athens, Greece. *Int J Biometeorol* 61, 1191–1208. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1298-5>
- Tseliou, A., Tsiros, I.X., Nikolopoulou, M., 2017b. Seasonal differences in thermal sensation in the outdoor urban environment of Mediterranean climates – the example of Athens, Greece. *Int J Biometeorol* 61, 1191–1208. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1298-5>
- Tseliou, A., Tsiros, I.X., Nikolopoulou, M., Papadopoulos, G., 2015. Outdoor thermal sensation in a Mediterranean climate (Athens): The effect of selected microclimatic parameters. *Architectural Science Review* 59, 190–202. <https://doi.org/10.1080/00038628.2015.1028022>
- Tsitoura, M., Tsoutsos, T., Daras, T., 2014. Evaluation of comfort conditions in urban open spaces. Application in the island of Crete. *Energy Conversion and Management* 86, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.059>
- Tung, C.-H., Chen, C.-P., Tsai, K.-T., Kántor, N., Hwang, R.-L., Matzarakis, A., Lin, T.-P., 2014. Outdoor thermal comfort characteristics in the hot and humid region from a gender perspective. *Int J Biometeorol* 58, 1927–1939. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0795-7>
- Tuomaala, P., Holopainen, R., Piira, K., Airaksinen, M., 2013. Impact Of Individual Characteristics – Such As Age, Gender, Bmi, And Fitness – On Human Thermal Sensation, in: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Proceedings of BS2013. Chambéry, France. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.2240>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations.
- VDI, 2008. Environmental meteorology - Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning at regional level.
- Vellei, M., de Dear, R., Inard, C., Jay, O., 2021. Dynamic thermal perception: A review and agenda for future experimental research. *Building and Environment* 205, 108269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108269>

- Vinet, J., 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs (phdthesis). Université de Nantes.
- Wang, Y., Akbari, H., 2014. Effect of Sky View Factor on Outdoor Temperature and Comfort in Montreal. *Environmental Engineering Science* 31, 272–287. <https://doi.org/10.1089/ees.2013.0430>
- Wang, Y., de Groot, R., Bakker, F., Wörtche, H., Leemans, R., 2017. Thermal comfort in urban green spaces: a survey on a Dutch university campus. *Int J Biometeorol* 61, 87–101. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1193-0>
- Wang, Z., de Dear, R., Luo, M., Lin, B., He, Y., Ghahramani, A., Zhu, Y., 2018. Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Building and Environment* 138, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.040>
- Willmott, C.J., 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 63, 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Willmott, C.J., 1981. ON THE VALIDATION OF MODELS. *Physical Geography* 2, 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Wohlwill, J.F., 1974. Human adaptation to levels of environmental stimulation. *Hum Ecol* 2, 127–147. <https://doi.org/10.1007/BF01558117>
- Xiong, K., He, B.-J., 2022. Wintertime outdoor thermal sensations and comfort in cold-humid environments of Chongqing China. *Sustainable Cities and Society* 87, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104203>
- Xu, M., Hong, B., Mi, J., Yan, S., 2018. Outdoor thermal comfort in an urban park during winter in cold regions of China. *Sustainable Cities and Society* 43, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.034>
- Yahia, M.W., Johansson, E., 2013. Evaluating the behaviour of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria. *Int J Biometeorol* 57, 615–630. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0589-8>
- Yang, B., Olofsson, T., Nair, G., Kabanshi, A., 2017. Outdoor thermal comfort under subarctic climate of north Sweden – A pilot study in Umeå. *Sustainable Cities and Society* 28, 387–397. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.10.011>
- Yang, W., Wong, N.H., Zhang, G., 2013. A comparative analysis of human thermal conditions in outdoor urban spaces in the summer season in Singapore and Changsha, China. *Int J Biometeorol* 57, 895–907. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0616-9>
- Yin, J., Zheng, Y., Wu, R., Tan, J., Ye, D., Wang, W., 2012. An analysis of influential factors on outdoor thermal comfort in summer. *Int J Biometeorol* 56, 941–948. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0503-9>
- Yin, Q., Cao, Y., Sun, C., 2021. Research on outdoor thermal comfort of high-density urban center in severe cold area. *Building and Environment* 200, 107938. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107938>
- Zacharias, J., Stathopoulos, T., Wu, H., 2004. Spatial Behavior in San Francisco's Plazas: The Effects of Microclimate, Other People, and Environmental Design. *Environment and Behavior* 36, 638–658. <https://doi.org/10.1177/0013916503262545>
- Zhao, L., Zhou, X., Li, L., He, S., Chen, R., 2016. Study on outdoor thermal comfort on a campus in a subtropical urban area in summer. *Sustainable Cities and Society* 22, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.02.009>
- Zhou, Z., Dong, L., 2023. Experimental investigation of the effect of surgical masks on outdoor thermal comfort in Xiamen, China. *Building and Environment* 229, 109893. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109893>

## **ANNEXES**

## LISTES DES ANNEXES

### Annexe A : Valeurs de taux métabolique et résistance thermique de vêtements

Tableau A. 1. Classification du taux métabolique par activité

Source : (ISO 8996:2004)

Activity	W/m <sup>2</sup>
<b>Flat walk along the path</b>	
at 2 km/h	110
at 3 km/h	140
at 4 km/h	165
at 5 km/h	200
<b>Walking up to 3 km / h</b>	
slope of 5°	195
slope of 10°	275
slope of 15°	390
<b>Walking downhill, 5 km / h</b>	
slope of 5°	130
slope of 10°	115
slope of 15°	120
<b>Climb a ladder (0.172 m / step)</b>	
80 steps per minute	440
<b>Down a scale (0.172 m / step)</b>	
80 steps per minute	155
<b>Carry a cargo, 4 km / h</b>	
mass 10 kg	185
mass 30 kg	250
mass 50 kg	360
<b>Relaxing</b>	
Sleeping	41
Standing	46
Seat in a rest condition	58
Relaxing	65
Standing in a relaxing condition	79
<b>Various</b>	
sedentary activities (work, home, lab, light ind.)	70
light standing activities (shop, lab, light ind.)	93
media activities in a standing condition (committed, housework, work on the machine)	116
<b>Jobs – Building industry</b>	
<b>Laying bricks (building a wall with the same area)</b>	
Full brick (mass 3.8 kg)	150
Hollow brick (mass 4.2 kg)	140
Hollow brick ( mass 15,3 kg)	125
Hollow brick ( mass 23,4 kg)	135
<b>Prefabrication of concrete elements</b>	
Mounting and unmounting shuttering (compressed concrete)	180
Insert steel rods	130
Strain the concrete ( compressed concrete)	180
<b>Construction of houses</b>	
Mix cement	155
Strain the concrete for foundations	275
Compact the concrete to vibrate	220

**Tableau A. 2.** Valeurs de de résistance thermique de quelques combinaisons de vêtements typiques

Source : (ISO 9920 :2007)

	clo	m <sup>2</sup> KW
<b>Work clothing</b>		
Pants, overalls, socks, shoes	0,70	0,110
Pants, shirt, pants, socks, shoes	0,75	0,115
Pants, shirt, overalls, socks, shoes	0,80	0,125
Pants, shirt, pants, jacket, socks, shoes	0,85	0,135
Pants, shirt, pants, aprons, socks, shoes	0,90	0,140
Lingerie with short sleeves and legs, shirt, pants, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Lingerie with short sleeves and legs, shirt, pants, overalls, socks, shoes	1,10	0,170
Lingerie with long sleeves and legs, thermal jacket, socks, shoes	1,20	0,185
Lingerie with short sleeves and legs, shirt, pants, jacket, thermal jacket, socks, shoes	1,25	0,190
Lingerie with short sleeves and legs, overalls, thermal jacket and trousers, socks, shoes	1,40	0,220
Lingerie with short sleeves and legs, shirt, pants, jacket, thermal jacket and trousers, socks, shoes	1,55	0,225
Lingerie with short sleeves and legs, shirt, pants, jacket, padded jacket with heavy overalls, socks, shoes	1,85	0,285
Lingerie with short sleeves and legs, shirt, pants, jacket, heavy jacket and track suit, socks, shoes, cap, gloves	2,00	0,310
Lingerie with long sleeves and legs, thermal jacket and pants, thermal outer jacket and trousers, socks, shoes	2,20	0,340
Lingerie with long sleeves and legs, thermal jacket and pants, parka with heavy padding, padding with heavy overalls, socks, shoes, cap, gloves	2,55	0,395
<b>Daily clothing</b>		
Pants, shirt, shorts, light socks, sandals	0,30	0,050
Slip, slip, stockings, dress with light sleeves, sandals	0,45	0,070
Pants, shirt with short sleeves, light trousers, light socks, shoes	0,50	0,080
Panties, stockings, short-sleeve shirt, skirt, sandals	0,55	0,085
Pants, shirt, light trousers, socks, shoes	0,60	0,095
Slip, slip, stockings, dress, shoes	0,70	0,105
Underwear, shirts, trousers, socks, shoes	0,70	0,110
Underwear, complete racing (shirt and trousers), long socks, running shoes	0,75	0,115
Slip, slip, blouse, skirt, thick knee socks, shoes	0,80	0,120
Pants, shirt, skirt, a sweater neckline, thick knee socks, shoes	0,90	0,140
Pants, blouses with short sleeves, pants, sweater with a V-neck, socks, shoes	0,95	0,145
Pants, shirt, pants, jacket, socks, shoes	1,00	0,155
Panties, socks, shirt, skirt, vest, jacket	1,00	0,155
Panties, stockings, blouse, long skirt, jacket, shoes	1,10	0,170
Underwear, blouses with short sleeves, shirt, pants, jacket, socks, shoes	1,10	0,170
Underwear, short sleeve blouses, shirts, trousers, waistcoats, jackets, socks, shoes	1,15	0,180
Lingerie with long sleeves and legs, shirt, pants, sweater with a V-neck, jacket, socks, shoes	1,30	0,200
Lingerie with long sleeves and legs, shirt, pants, vest, jacket, coat, socks, shoes	1,50	0,230
<b>Knitted underwear</b>		
Panties	0,30	0,047
Long Panties	0,10	0,016
Blouse	0,04	0,006
Short-sleeve shirt	0,09	0,014
Long-sleeve shirt	0,12	0,019
Long-sleeve shirt	0,12	0,019
Panties and bra	0,03	0,005
<b>Jerseys - blouses</b>		
Short-sleeve shirt	0,15	0,023

	clo	m <sup>2</sup> K/W
Light , with long sleeves and legs	0,20	0,031
Normal, with long sleeves and legs	0,25	0,039
In flannel, with long sleeves and legs	0,30	0,047
Weak blouse, with long sleeves and legs	0,15	0,023
<b>Trousers</b>		
Short	0,06	0,009
Light	0,20	0,031
Normal	0,25	0,039
In flannel	0,28	0,043
<b>Clothes- skirts</b>		
Light skirt (summer)	0,15	0,023
Heavy skirt (winter)	0,25	0,039
Light cloth with short sleeves and legs	0,20	0,031
Winter cloth with long sleeves and legs	0,40	0,062
Suit	0,55	0,085
<b>Sweaters</b>		
Gilet	0,12	0,019
Light sweater	0,20	0,031
Sweater	0,28	0,043
Heavy sweater	0,35	0,054
<b>Jackets</b>		
Light , summer jacket	0,25	0,039
Jacket	0,35	0,054
Apron	0,30	0,047
<b>High thermal insulation, synthetic fur padding</b>		
Suit	0,90	0,140
Trousers	0,35	0,054
Jacket	0,40	0,062
Waistcoat	0,20	0,031
<b>Outdoor clothing</b>		
Coat	0,60	0,093
Under-jacket	0,55	0,085
Parka	0,70	0,109
Suit	0,55	0,085
<b>Accessories</b>		
Socks	0,02	0,003
Heavy ankle socks	0,05	0,008
Heavy long socks	0,10	0,016
Nylon socks	0,03	0,005
Shoes (thin soles)	0,02	0,003
Shoes (thick soles)	0,04	0,006
Boots	0,10	0,016
Gloves	0,05	0,008

## Annexe B : Fiche d'enquête pour l'évaluation de la perception thermique en extérieur (ASHREA 55) et (ISO : 10551)

L'enquête par questionnaire sur les conditions thermique extérieur à.....

Lieu: ..... Date: ..... Heure: ..... No: .....

**Première Section:** Données Personnels (sociodémographique)

1- Le questionnaire est rempli:  
 Sous l'ombre     Exposé au soleil     Ciel nuageux

2- Lieu de résidence:  
 Local     Non local     à l'étranger

3- Sexe:  Homme  Femme

4- Age:  ≤20     21-35     36-45     46-55     56-65     > 65

5- Taille:  ≤1.60     1.61-1.70     1.71-1.80     1.81-1.90     >1.90

6- Poids:  ≤50     51-60     61-70     71-80     >80

7- Type de Vêtements:

T-Shirts/chemises:    Pantalons:    Chaussures:    Veste:    Accessoires:    Autre:

Manches courtes     Shorts     Sandales     Jaillet     Bonnet/casquette .....

Manches longs     Pantalons     Soulier     Veste     Foulard

Sans manches     Robes     Bottes     Manteau     Parasol

8- Vous êtes ici:     Seul     Avec la compagnie

9- Pourquoi êtes-vous ici (Raison de visite)?  
 Travail     Repos/Rencontres des amis     Passage     Shopping

10- Combien de fois visitiez vous cette place?  
 Chaque jours     Quelques fois     Rarement     Première fois

11- Depuis combien temps êtes-vous ici dans cette place ?  
 ≤5min     5-15min     15-30min     30min-1h     >1h

12- Où avez-vous été dans les dernières (15min-30min) avant de visiter cette place?  
 à l'extérieur au soleil     à l'extérieur à l'ombre     à l'intérieur avec Clim     à l'intérieur sans Clim

13- Quelle activité avez-vous pratiqué au cours des dernières (15min-30min)?  
 Assis     Debout Détendu     Marche     Autre: .....

**Deuxième section:** Expérience Micro-météorologique

14- Comment vous sentez-vous dans cette place (actuellement) ?  
 Très Froid     Froid     Légèrement froid     Neutre     Légèrement chaud     Chaud     Très chaud

15- Comment évalueriez-vous votre satisfaction thermique à cet endroit ?  
 Très satisfait     Satisfait     Légèrement satisfait     Neutre     Légèrement insatisfait     Insatisfait     Très insatisfait

16- S'il vous plaît, estimez la température de l'air à ce moment-là ?  
 .....

17- Comment ressentez-vous le vent ?  
 Très élevé     Élevé     Légèrement élevé     Neutre     Légèrement faible     Faible     Très faible

18- Comment ressentez-vous l'humidité ?  
 Très humide     Humide     Légèrement humide     Neutre     Légèrement sec     Sec     Très sec

19- Comment préférez-vous que le climat soit dans cet endroit ?

Température :	Vent :	Humidité:	Irradiation	Ombre:
<input type="checkbox"/> Plus bas				
<input type="checkbox"/> Pas de changement				
<input type="checkbox"/> Plus haut				

20- Comment évaluez-vous votre confort général dans cet endroit ?  
 Très inconfortable     Inconfortable     Neutre     Confortable     Très confortable

21- Quelles mesures prendriez-vous si vous avez trop chaud dans cette place ?  
 Se déplacer vers l'ombre     Boire des boissons     Réduire les vêtements     Rien/quitter l'endroit

**Troisième section :** Santé/informations sur le post COVID-19 pandémie

22- SVP, évalueriez-vous votre statue de santé maintenant :  
 Comme d'habitude     Se sentir mieux     Se sentir pire

23- Avez-vous des problèmes de santé ou des maladies chroniques ?  
 OUI     NON

24- Avez-vous été infecté par le COVID-19?  
 OUI     NON

25- Les restrictions sociales et l'heure du couvre-feu ont affecté votre utilisation et votre fréquentation globale de ce lieu ?  
 OUI     NON

26- a Vous sentez-vous à l'aise thermiquement en portant une bavette dans cette place?  
 OUI     NON

25- b Le port de la bavette a eu un impact sur la durée de votre sortie dans cette place?  
 OUI     NON

26- Vos activités planifiées dans ce lieu ont été influencées par la distanciation sociale ?  
 OUI     NON

Figure B. 1. Fiche d'enquête en français Source : (Auteur, 2021)

16- من فضلك، حسب رأيك كم هي درجة الحرارة بالتقريب الآن في هذا المكان؟

.....

17- كيف تشعر بالرياح؟

مرتفع جداً  مرتفع  مرتفع قليلاً  محايد  منخفض قليلاً  منخفض جداً

18- كيف تشعر بالرطوبة؟

رطب جداً  رطب  رطب قليلاً  محايد  جاف قليلاً  جاف  جاف جداً

19- كيف تفضل أن يكون المناخ في هذا المكان؟

درجة الحرارة:	الرياح:	الرطوبة:	الإشعاع الحراري	الظل:
<input type="checkbox"/> أقل	<input type="checkbox"/> أقل	<input type="checkbox"/> أقل	<input type="checkbox"/> أقل	<input type="checkbox"/> ظل
<input type="checkbox"/> بدون تغيير				
<input type="checkbox"/> أعلى				

20- كيف تقيم رائحة العمامة في هذا المكان؟

مريح جداً  مريح  محايد  غير مريح  غير مريح بشدة

21- ما هي الإجراءات التي تلجأ إليها إذا شعرت بالحر الشديد في هذا المكان؟

التقليل من الملابس  تناول المشروبات  ارتداء الملابس  لا شيء / اخرج المنطقة

**القسم الثالث:**

22- من فضلك، ما هي تقييمك لوضعك الصحي الآن:

كاملة  بحالة أفضل  بحالة أسوأ

23- هل لديك أي مشكلات صحية أو أعراض مزمنة؟

نعم  لا

24- هل أصبت بفيروس COVID-19؟

نعم  لا

25- هل أثرت الإجراءات الاجتماعية الجديدة ووقت حظر التجول على زيارتك واستخدامك لهذا المكان؟

نعم  لا

26- هل تشعر بالارتياح حراري عند ارتداء العمامة في هذا المكان؟

نعم  لا

25- بعد كل خان لارتداء العمامة تأخر على المدة الزمنية التي تقضيها هنا؟

نعم  لا

26- هل تأثرت أنشطتك المخطط لها (راحة/بناء/رياضة/تعب الأطفال) في هذا المكان بالتباعد الاجتماعي؟

نعم  لا

27- في الظروف الصحية ما بعد COVID-19، هل تشعر بالأمان في الخارج في هذا المكان؟

نعم  لا

المسح عن طريق الاستبيان عن الظروف الحرارية في الخارج.....  
المكان: ..... التاريخ: ..... الساعة: ..... الرقم: .....

**القسم الأول:**

1- استيفاء الاستبيان:

في الظل  متعرض للشمس  سماء غائمة

2- مكان الإقامة:

قاطن بالمدينة (محلي)  غير قاطن بالمدينة (غير محلي)  بالخارج

3- الجنس:  ذكر  انثى

4- العمر:  20  21-35  36-45  46-55  56-65  < 65

5- الطول:  1.60  1.61-1.70  1.71-1.80  1.81-1.90  < 1.90

6- الوزن:  50  51-60  61-70  71-80  < 80

7- نوع الملابس:

الجزء العلوي / القمصان:	الجزء السفلي/ بنطلون:	الأحذية:	المعطف:	الراس:	أخرى:
<input type="checkbox"/> الأكمام قصيرة	<input type="checkbox"/> سروال قصير	<input type="checkbox"/> صندل	<input type="checkbox"/> وشاح	<input type="checkbox"/> قبعة	.....
<input type="checkbox"/> الأكمام الطويلة	<input type="checkbox"/> السراويل	<input type="checkbox"/> حذاء رياضي	<input type="checkbox"/> ستر	<input type="checkbox"/> خمار	
<input type="checkbox"/> بلا أكمام	<input type="checkbox"/> الفساتين	<input type="checkbox"/> حذاء طويل	<input type="checkbox"/> معطف	<input type="checkbox"/> المعطلة	

8- أنت هنا:  وحده  مع الرفقة

9- لماذا أتت هنا (سبب الزيارة)؟

العمل  الراحة / لقاء الأصدقاء  المرور فقط  التسوق

10- كم مرة قمت بزيارة هذا المكان؟

كل يوم  عدة مرات  نادراً  المرة الأولى

11- منذ متى وأنت هنا في هذا المكان؟

< 5 دقائق  5-15 دقيقة  15-30 دقيقة  30-1 ساعة  > 1 ساعة

12- أين كنت في آخر (15 دقيقة - 30 دقيقة) قبل زيارة هذا المكان؟

في الخارج في الشمس  في الخارج تحت الظل  بالداخل مع تكييف الهواء  بالداخل بدون تكييف

13- ما هي النشاط الذي قمت به في آخر (15 دقيقة - 30 دقيقة)؟

الجلوس  الوقوف مسترخئ  المشي: ..... نشاط آخر: .....

**القسم الثاني:**

14- ما هي شعورك في هذا المكان (حالياً)؟

بارد جداً  بارد  بارد قليلاً  محايد  دافئ قليلاً  ساخن  ساخن جداً

15- هل يمكنك تقييم مدى رضاك الحراري، من فضلك؟

راضٍ جداً  راضٍ  راضٍ قليلاً  محايد  غير راضٍ قليلاً  غير راضٍ  غير راضٍ تماماً

Figure B. 2. Fiche d'enquête en arabe Source : (Auteur, 2021)

The outdoor thermal questionnaire survey at .....

Place: ..... Date: ..... Time: ..... No: .....

**Section one:** Personnel data

**1- The questionnaire is accomplished:**  
 Under the shade     Exposed to sun     Cloudy weather

**2- Place of residence:**  
 Local     Not local     Abroad

**3- Sex:**  Male     Female

**4- Age:**  ≤ 20     21-35     36-45     46-55     56-65     > 65

**5- Height:**  ≤ 1.60     1.61-1.70     1.71-1.80     1.81-1.90     > 1.90

**6- Weight:**  ≤ 50     51-60     61-70     71-80     > 80

**7- Type of Clothing:**

Shirts/Tshirts:	Trousers:	Shoes:	Jacket:	Head:	Other:
<input type="checkbox"/> Short sleeves	<input type="checkbox"/> Shorts	<input type="checkbox"/> Sandals	<input type="checkbox"/> Sweater	<input type="checkbox"/> Hat	.....
<input type="checkbox"/> Long sleeves	<input type="checkbox"/> Pants	<input type="checkbox"/> Shoes	<input type="checkbox"/> Jacket	<input type="checkbox"/> Scarf	
<input type="checkbox"/> Sleeveless	<input type="checkbox"/> Dress	<input type="checkbox"/> Boots	<input type="checkbox"/> Coat	<input type="checkbox"/> Parasol	

**8- Are you here:**  Alone     With company

**9- Why you are here (Reason to be in this place)?**  
 Working     Resting/Meeting other people     Passing by     Shopping

**10- How often do you visit this place?**  
 Daily     Few times     Rarely     First time

**11- How long have you been in this place?**  
 ≤ 5min     5-15min     15-30min     30min-1h     > 1h

**12- Where have you been in the last (15min-30min) before visiting this place?**  
 Outdoor in the sun     Outdoor in the shade     Indoor with AC     Indoor without AC

**13- What activity have you done in the last (15min-30min)?**  
 Seating     Standing relaxed     Walking     Other: .....

**Section Two:** Micro-meteorological experience

**14- How do you feel in this place (currently)?**  
 Cold     Cool     Slightly cool     Neutral     Slightly warm     Warm     Hot

**15- Would you rate your thermal satisfaction, please?**  
 Very satisfied     Satisfied     Slightly Satisfied     Neutral     Slightly dissatisfied     Dissatisfied     Very dissatisfied

**16- Please, estimate the air temperature at this moment?**  
 .....

**17- How do you sense (experience) the wind?**  
 Very high     High     Slightly high     Neutral     Slightly low     Low     Very low

**18- How do you sense (experience) the humidity?**  
 Very humid     Humid     Slightly humid     Neutral     Slightly dry     Dry     Very dry

**19- How would you prefer the climate to-be in this place?**

Temperature:	Wind:	Humidity:	Irradiation	Shade:
<input type="checkbox"/> Lower				
<input type="checkbox"/> No change				
<input type="checkbox"/> Higher				

**20- How do you rate your overall comfort in this place?**  
 Very uncomfortable     Uncomfortable     Neutral     Comfortable     Very comfortable

**21- What measures would you take if you feel too hot in this place?**  
 Move to shade tree/shelter     Drink beverages     Reduce clothing     Nothing/leave the place

**Section Three:** Health status and COVID-19 pandemic information

**22- Could you please rate your health status?**  As usual     Feeling better     Feeling worse

**23- Do you have any health problems or chronicle diseases?**  
 Yes     No

**24- Were you infected by the COVID-19?**  
 Yes     No

**25- Social restrictions and curfew time affected your usage and overall attendance in this place?**  
 Yes     No

**26- a Do you feel thermally comfortable wearing face mask in this place?**  
 Yes     No

**25- b Wearing face mask impacted your duration of outing in this place?**  
 Yes     No

**26- Your planned activities in this place were influenced by social distancing?**  
 Yes     No

**27- In the post-COVID-19 conditions, do you feel safe staying outside in this place?**  
 Yes     No

Figure B. 3. Fiche d'enquête en anglais Source : (Auteur, 2021)

## Annexe C : Résultats de l'analyse de la régression multiple (Effets des variables microclimatique)

### Saison estivale (chaude)

**Tableau C. 1.** Régression multiple entre (TSV) et paramètres microclimatiques

Source : SPSS (Auteur, 2022)

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté	Erreur standard de l'estimation	Modifier les statistiques					Durbin-Watson
				Variation de R <sup>2</sup>	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F	
<b>0,863<sup>a</sup></b>	<b>0,744</b>	0,740	0,515	0,744	<b>180,953</b>	4	249	<b>0,000</b>	<b>1,552</b>

a. Prédicteurs : (Constante), Ta, Tmrt, Va, Rh,

**Tableau C. 2.** ANOVA métriques.

Source : SPSS (Auteur, 2022)

ANOVA <sup>a</sup>					
Modèle	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Régression	191,740	4	47,935	180,953	<b>0,000<sup>b</sup></b>
de Student	65,961	249	0,265		
Total	257,701	253			

a. Variable dépendante : TSV

b. Prédicteurs : (Constante), Va, Tmrt, Rh, Ta

**Tableau C.3.** Signification partielle (tableau de coefficients) des variables microclimatiques

Source : SPSS (Auteur, 2022)

Modèle	Coefficients <sup>a</sup>									
	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.	Corrélations			Statistiques de colinéarité	
	B	Erreur standard	Bêta			Corrélation simple	Partielle	Partielle	Tolérance	VIF
(Constante)	-4,946	0,560		-8,830	0,000					
Ta	0,153	0,015	0,719	10,004	0,000	0,810	0,535	0,321	0,199	5,030
Tmrt	0,027	0,005	0,341	5,690	0,000	0,792	0,339	0,182	0,285	3,503
Rh	0,012	0,005	0,162	2,706	0,007	-0,662	0,169	0,087	0,286	3,502
Va	0,143	0,039	0,141	3,685	0,000	-0,010	0,227	0,118	0,705	1,419

a. Variable dépendante : TSV

## Saison hivernale (froide)

**Tableau C. 4.** Régression multiple entre (TSV) et paramètres microclimatiques

Source : SPSS (Auteur, 2023)

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté	Erreur standard de l'estimation	Modifier les statistiques					Durbin-Watson
				Variation de R <sup>2</sup>	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F	
0,761 <sup>a</sup>	0,579	0,572	0,888	0,579	<b>89,367</b>	4	260	<b>0,000</b>	1,531

a. Prédicteurs : (Constante), Ta, Tmrt, Va, Rh,

**Tableau C. 5.** ANOVA métriques

Source : SPSS (Auteur, 2023)

ANOVA <sup>a</sup>					
Modèle	Somme des carrés	ddl	Carré moyen	F	Sig.
Régression	281,935	4	70,484	89,367	<b>0,000b</b>
de Student	205,061	260	0,789		
Total	486,996	264			

a. Variable dépendante : TSV  
b. Prédicteurs : (Constante), Tmrt, Va, RH, Ta

**Tableau C.6.** Signification partielle (tableau de coefficients) des variables microclimatiques

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Coefficients <sup>a</sup>										
Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.	Corrélations			Statistiques de colinéarité	
	B	Erreur standard	Bêta			Corrélation simple	Partielle	Partielle	Tolérance	VIF
(Constante)	-7,079	1,068		-6,630	0,000					
Ta	0,263	0,042	1,045	6,261	0,000	0,737	0,362	0,252	0,058	17,210
Tmrt	0,028	0,009	0,284	3,089	0,002	0,690	0,188	0,124	0,191	5,235
Rh	0,048	0,013	0,590	3,747	0,000	-0,675	0,226	0,151	0,065	15,317
Va	-0,120	0,093	-0,064	-1,283	0,021	-0,157	-0,179	-0,052	0,655	1,526

a. Variable dépendante : TSV

## Annexe D : Résultats de Test H *Kruskal wallis* (Effets des variables subjectives)

Saison estivale :

**Tableau D. 1.** Effet des raisons de visite sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Motifs (raison) de visite	N	Rang moyen :	
TSV	Travailler/Etudier	20	65,83
	Repos/Rencontres des amis	134	135,28
	Passage	100	129,41
	Total	254	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
Kruskal-Wallis H	24,761
df	2
Asymp. Sig.	0,000
a. Kruskal Wallis Test	
b. Variable de regroupement : Motifs (raison) de visite	

**Tableau D. 2.** Effet de temps d'exposition sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Temps d'exposition	N	Rang moyen :	
TSV	≤5min	75	124,82
	5-15min	93	132,18
	15-30min	44	134,60
	30min-1h	29	103,91
	>1h	13	138,04
	Total	254	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
Kruskal-Wallis H	6,552
df	4
Asymp. Sig.	0,162
a. Kruskal Wallis Test	
b. Variable de regroupement : temps d'exposition	

**Tableau D. 3.** Effet de type d'activité sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Type d'activités (15min-30min)	N	Rang moyen	
TSV	Assis	102	130,42
	Debout détendu	37	118,11
	Marcher	100	131,93
	autre	15	101,30
	Total	254	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
Kruskal-Wallis H	4,799
dl	3
Asymp. Sig.	0,187
a. Kruskal Wallis Test	
b. Variable de regroupement: Type d'activités (15min-30min)	

**Tableau D. 4.** Effet de l'histoire thermique a court-terme sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Histoire thermique (15min-30min)	N	Rang moyen	
TSV	à l'extérieur au soleil	96	143,36
	à l'extérieur sous l'ombre	97	115,58
	à l'intérieur avec Clim	36	147,58
	à l'intérieur sans Clim	25	83,94
	Total	254	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
Kruskal-Wallis H	29,251
dl	3
Asymp. Sig.	0,000
a. Kruskal Wallis Test	
b. Variable de regroupement: Histoire thermique (15-30 min)	

**Tableau D. 5.** Effet de comportements adaptatifs

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Comportements adaptatifs	N	Rang moyen	
TSV	Se déplacer à l'ombre	125	138,18
	Boire des boissons	63	110,13
	Réduire les vêtements	6	16,83
	Rien/quitter la place	60	134,56
	Total	254	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
Kruskal-Wallis H	23,698
dl	3
Asymp. Sig.	0,000
a. Kruskal Wallis Test	
b. Variable de regroupement: Comportements adaptatifs	

## Saison hivernale

**Tableau D. 6.** Effet de raison de visite sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Motifs (raison) de visite	N	Rang moyen :	
TSV	Travailler/Etudier	49	136,46
	Repos/Rencontres des amis	137	133,04
	Passage	71	128,28
	Shopping	8	153,06
	Total	265	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
H de Kruskal-Wallis	0,958
ddl	3
Sig. asymptotique	0,811
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Motifs (raison) de visite	

**Tableau D. 7.** Effet de temps d'exposition sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Temps d'exposition	N	Rang moyen	
TSV	≤5min	52	121,99
	5-15min	74	133,86
	15-30min	37	132,77
	30min-1h	53	109,13
	>1h	49	169,38
	Total	265	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
H de Kruskal-Wallis	18,034
ddl	4
Sig. asymptotique	0,001
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Temps d'exposition	

**Tableau D. 8.** Effet de type d'activités sur (TSV)Source : **SPSS (Auteur, 2023)**

Rangs			
Type d'activités (15min-30min)	N	Rang moyen :	
TSV	Assis	104	136,25
	Debout détendu	48	112,96
	Marcher	108	137,86
	autre:	5	152,90
	Total	265	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
H de Kruskal-Wallis	4,430
ddl	3
Sig. asymptotique	0,219
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Type d'activités (15min-30min)	

**Tableau D. 9.** Effet de l'histoire thermique à court-terme sur (TSV)Source : **SPSS (Auteur, 2023)**

Rangs			
Histoire thermique (15min-30min)	N	Rang moyen :	
TSV	à l'extérieur au soleil	127	153,86
	à l'extérieur sous l'ombre	97	112,18
	à l'intérieur avec chauffage	1	76,00
	à l'intérieur sans chauffage	40	118,69
	Total	265	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
H de Kruskal-Wallis	19,341
ddl	3
Sig. asymptotique	0,000
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Histoire thermique (15min-30min)	

**Tableau D. 10.** Effet de comportements adaptatifs sur (TSV)

Source : SPSS (Auteur, 2023)

Rangs			
Comportements adaptatives	N	Rang moyen	
TSV	S'asseoir au soleil	70	128,89
	Boissons chaudes	26	141,37
	Se déplacer à l'intérieur	52	135,36
	Ajouter des vêtements	90	135,38
	Rien/quitter la place	27	123,13
	Total	265	

Tests statistiques <sup>a,b</sup>	
	TSV
H de Kruskal-Wallis	1,144
ddl	4
Sig. asymptotique	0,887
a. Test de Kruskal Wallis	
b. Variable de regroupement : Comportements adaptatifs	

**Annexe E : Résultats de Chi-2 (Effets des mesures de post-COVID19)****Tableau E. 1.** Résultats du test Chi-2 pour l'effet des mesures imposées lors du post-COVID19

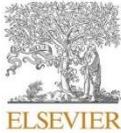
Source : SPSS (Auteur, 2023)

Fréquence de visite (Couvre-feu)			
	Observé N	Excepté N	Résiduel
Oui	139	127,0	12,0
Non	115	127,0	-12,0
Total	254		
Perception thermique des piétons (Port de masque)			
	Observé N	Excepté N	Résiduel
Oui	41	127,0	-86,0
Non	213	127,0	86,0
Total	254		
Distanciation social (activités planifiées)			
	Observé N	Excepté N	Résiduel
Oui	144	127,0	17,0
Non	110	127,0	-17,0
Total	254		
Tests statistiques			
	Fréquence de visite	Perception thermique des piétons	Activités planifiées
Chi-Square	2,268 <sup>a</sup>	116,472 <sup>a</sup>	4,551 <sup>a</sup>
df	1	1	1
Asymp. Sig.	0,132	0,000	0,033

a. 0 cells (,0%) have expected frequencies less than 5. The minimum expected cell frequency is 127,0.

## Annexe F : Publication scientifique

Building and Environment 245 (2023) 110920



Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/buildenv](http://www.elsevier.com/locate/buildenv)



### Outdoor thermal perception in the semi-arid climate of Constantine, Algeria: A field survey during the post-COVID-19

Afef Ouis<sup>a,\*</sup>, Nassira Benhassine<sup>a</sup>, Fatih Canan<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Laboratory of Bioclimatic Architecture and Environment (ABE), Faculty of Architecture and Urban Planning, University of Constantine 3 Salah Boubnider, Constantine, Algeria*

<sup>b</sup> *Department of Architecture, Faculty of Architecture and Design, Konya Technical University, Akademi Mah, Yeni Istanbul Cad, No:235/1 Selçuklu, Konya, Turkey*

#### ARTICLE INFO

##### Keywords:

Outdoor thermal comfort  
Thermal sensation  
Pedestrian  
Public places  
Post-COVID 19  
Field survey

#### ABSTRACT

The purpose of the paper was to assess pedestrians' thermal perception, in the semi-arid climate of Constantine, Algeria, with particular emphasis on the protocols implemented in public spaces during the post-COVID-19. Three outdoor public spaces were selected in August 2021 to conduct a field study involving 254 respondents, randomly assigned. The adopted approach combined objective and subjective assessment, as well as numerical simulations using ENVI-met. Accordingly, microclimate monitoring and a questionnaire survey were carried out simultaneously from 7 a.m. to 7 p.m. in each study site. A strong association was found between the combined microclimate parameters (objective variables) and thermal sensation of the surveyors with ( $R^2 = 0.74$ ). Besides, Kruskal-Wallis  $H$  test revealed that the subjective thermal sensation was significantly influenced ( $p$ -value  $< 0.05$ ) by thermal history and purpose of visit (subjective variables). Most interviewees preferred 'move to shade' measure as a remedial behavior to reduce their thermal discomfort. Further, a neutral temperature of  $22.7$  °C PET was obtained by a linear regression between the Mean Thermal Sensation Votes (MISV) and Physiological Equivalent Temperature (PET), the comfort range was estimated between  $18.6$  °C  $\leq$  PET  $\leq$   $26.8$  °C during summer. Regarding the COVID-19 pandemic effects, the Chi-square test suggests that the frequency of pedestrian visits was statistically independent of the imposed pandemic measures. However, the planned activities were affected by social distancing and the use of face masks increases pedestrians' thermal discomfort. Overall, the study highlights the significance of environmental and non-environmental factors to improve outdoor thermal comfort, and ensure human well-being.

#### 1. Introduction

Outdoor public spaces including squares, plazas, esplanades, green parks, and sidewalks among others play a vital role in promoting urban life, health and well-being. Attractive and well-designed urban spaces with favorable microclimate would intrigue the residents and the visitors of the city to engage in different recreational, social, and cultural activities [1]. As demonstrated in several studies [2–7], thermal comfort in outdoors is a key element that influences the quality and the usage of urban spaces. Thus, understanding and assessing outdoor thermal comfort is crucial and challenging.

Human's thermal perception and comfort in outdoor environments are highly affected by the microclimate parameters. However, their assessment is not constantly dependable on the objective factors (air temperature, air velocity, relative humidity, and solar irradiation) [8].

The subjective factors such as thermal adaptation and social factors (thermal history and expectancy, behavioral and psychological aspects) play a major role in influencing human thermal sensations and the utilization of outdoor spaces [9,10]. As stated by Chen and Ng [11], the 'state of mind' as well as the 'state of the body' determines how people really use urban spaces.

Subsequently, numerous methods have been employed in the last decades, to identify the drivers that determine thermal comfort and to evaluate the thermal environments for humans; they can be classified into two primary approaches. Qualitative studies involve interviews, observations, and questionnaire surveys, while quantitative approaches rely on, in-situ measurements or/and numerical simulations [12]. In fact, with the advancement of methods in both domains of urban climatology and bio-meteorology [13–17], the quantitative methods started to progress and gained more interest. The study by Nikolopoulou

\* Corresponding author.

E-mail address: [afef.ouis@univ-constantine3.dz](mailto:afef.ouis@univ-constantine3.dz) (A. Ouis).

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110920>

Received 7 June 2023; Received in revised form 17 September 2023; Accepted 10 October 2023

Available online 11 October 2023

0360-1323/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.



Nom et prénom : Afef OUIS

Titre : La perception thermique en climat semi-aride : Cas des places publiques à Constantine.

Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat LMD en architecture, spécialité ville et environnement durable

## RESUME

La perception thermique qui est étroitement liée au confort des individus dans les environnements extérieurs est aussi influencée par les caractéristiques du microclimat. Cependant, l'évaluation de ce dernier n'est pas systématiquement fondée sur des paramètres objectifs (température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et radiations solaires). En plus des facteurs objectifs, la perception thermique et l'usage des espaces extérieurs sont considérablement tributaires des caractéristiques comportementales et psychologiques, de l'adaptation thermique et des facteurs sociaux (désignés comme facteurs subjectifs).

Ainsi, nous étudions la perception thermique en climat semi-aride de Constantine par la vérification des caractéristiques du confort thermique et de l'adaptation psychologique exprimés par les usagers dans la pratique des espaces extérieurs ; notamment les places. A cette fin, trois places publiques situées dans le secteur sauvegardé de la vieille ville de Constantine, ont été choisies pour mener cette recherche ; il s'agit de la place *Si El Haoues* 'place du palais', place de la révolution 'la Brèche' et la place *Hadj Ahmed bey*.

La méthodologie regroupe un ensemble d'approches, méthodes et outils : l'approche comparative et analytique par un état de l'art et la méthode de l'enquête par le questionnaire, ainsi que la démarche expérimentale par les mesures microclimatiques. Les simulations numériques ont été effectuées par ENVI-met Science V5.0 et RayMan. Par conséquent, la phase initiale implique la collecte simultanée de données (personnelles, Vote de Sensation Thermique (TSV), et de l'adaptation thermique). Les mesures météorologiques (estivale et hivernale) dans les trois places définies ont été effectuées lors des journées représentatives d'été et d'hiver en période post-pandémique COVID19 (août 2021 et janvier 2022). Ensuite, les résultats de simulations du logiciel ENVI-met ont été visualisés pour générer une cartographie du confort extérieur en nous appuyant sur l'indice de Température Physiologique Equivalente (PET). Enfin, basée sur la triangulation des différentes approches, l'ensemble des données collectées lors des investigations estivales et hivernales a été traité et analysé à l'aide du logiciel de statistiques SPSS V25.0.

Les conditions estivales à Constantine, où la température de l'air peut atteindre 42 °C dans les places publiques, sont moins agréables pour les piétons. Alors que, des proportions notables de satisfaction thermique dans la période hivernale ont été observées. L'évaluation de l'effet des paramètres microclimatiques sur la perception thermique a montré que, une corrélation significative ( $R^2=0.76$ ) durant la saison estivale. En accord avec des études précédentes conduites dans des climats chauds, la température de l'air a été déterminée comme le facteur le plus influent sur la perception thermique subjective durant l'investigation estivale et hivernale. En somme, deux équations empiriques (été, hiver) ont été obtenues permettant ainsi de quantifier la variation de la perception thermique extérieur en fonction des paramètres microclimatiques pour le climat semi-aride de Constantine.

Quant à l'effet des variables subjectives (adaptation thermique et comportements adaptatifs), les résultats du test non paramétrique ont indiqué que le temps d'exposition a probablement un effet sur la perception thermique en hiver, mais en été le temps d'exposition n'entraînait aucune disparité significative. Cependant, l'histoire thermique à court terme à une influence significative sur la perception thermique subjective durant les deux saisons.

La méthode binée entre le vote moyen de sensation thermique (MTSV) et l'indice de confort (PET) a permis de définir une température neutre de (22,7 °C) pour la saison chaude, et celle de (21.4 °C) pour la saison froide. Cette faible différence de (1.3 °C) des températures neutres entre l'été et l'hiver a été expliquée par le niveau d'adaptation thermique de la population locale, qui est beaucoup plus centré sur les conditions thermiques générales en climat semi-aride, plutôt qu'une adaptation thermique saisonnière (physiologique et psychologique) spécifique. Ensuite, La neutralité thermique pour les espaces urbains extérieurs a été estimée entre  $17,5\text{ °C} \leq \text{PET} \leq 26,2\text{ °C}$  sous climat semi-aride de Constantine.

### Mots clés :

Perception thermique, Température Physiologique Equivalente (PET), Vote de Sensation Thermique (TSV), Climat semi-aride, Place publique, Neutralité thermique, Enquête.

Directeur de thèse : Pr. Nassira BENHASSINE TOUAM – Université de Constantine 3

Année universitaire : 2023-2024