

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE CONSTANTINE 3
FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE

N° d'ordre:.....

Série:.....

THESE DE DOCTORAT EN-SCIENCE

Spécialité : Architecture

-Option : Architecture bioclimatique-

TITRE :

**Evaluation du confort thermique extérieur : Effet
de la morphologie et de la végétation sur les
échanges radiatifs**

Présentée par : Mme TEBBANI Habiba

Sous la direction du Pr/BOUCHAHM Yasmina

Jury d'évaluation :

Pr DEBBACHE Samira:.....Président, Université Constantine 3.
Pr BOURBIA Fatiha:.....Examineur, Université Constantine 3.
Pr MAZOUZ Said:Examineur, Université d'Oum El Bouaghi.
Pr ZEMMOURI Nouredine:Examineur, Université de Biskra.
Pr KAABI Abdenacer :Examineur, Université Constantine 1.
Pr BOUCHAHM Yasmina :Rapporteur, Université Constantine 3

2016-2017

وَمَا لَوْ فَفَعَلِي بِاللَّهِ بِالنَّهْ

Remerciements

*E*n tout premier lieu, je remercie **ALLAH**, tout puissant, de m'avoir donné la force et le courage pour dépasser toutes les difficultés.

A Pr. BOUCAHAM Yasmina, pour son encadrement, ses conseils, ses encouragements, sa patience et sa confiance tout au long de la préparation de cette thèse.

A Pr. BOURBIA Fatiha pour ces conseils et pour tout le matériel mis à notre disposition et qui a assuré le bon déroulement des investigations.

A tous les membres du jury : Pr DEBBACHE Samira, Pr MAZOUZ Said, Pr ZEMMOURI Nouredine et Pr KAABI Abdenacer pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

A mon Mari, sans qui je ne serais jamais parvenu au bout de ce travail.

A mes étudiants de deuxième année, Architecture pour les années 2012-2013 et 2013-2014 pour avoir m'aider dans le monitoring et les interviews.

A mon amie MEDJELAKH Dalel qui m'a acheté le logiciel BioMet.

A ma famille, spécialement à ma chère Maman et mes chères sœurs Ouafia et Sarah.

A toutes mes amies. Et afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail.

TABLE DES MATIERES

<u>Chapitre I : Microclimat, morphologie urbaine et interactions énergétiques</u>	Page
1.1. Introduction	7
1.2. Les méthodes de recherche en climatologie urbaine	8
1.2.1. Méthodes empiriques	8
1.2.2. Les modèles physiques	8
1.2.3. Les modèles numériques	
1.3. Phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain	9
1.3.1. Echelles d'analyse utilisées en climatologie urbaine	9
1.3.2. Echelle horizontale	10
1.3.3. Echelles verticales	12
1.3.3.1. L'atmosphère urbaine	12
1.3.3.2. La couche limite atmosphérique (CLA)	12
1.3.3.4. Les particularités de la CLA urbaine	12
1.3.3.4.1. La canopée urbaine (UCL – Urban Canopy Layer)	14
1.3.3.4.2. La sous-couche de rugosité (RSL – Roughness Sub-layer)	15
1.3.3.4.3. La sous-couche inertielle (CFL)	15
1.3.3.4.4. La couche de mélange (ML)	15
1.4. Les paramètres de rugosité urbaine	15
5. Stations météorologiques	16
1.6.1. Ecoulement d'air à l'échelle d'un quartier	19
1.6.2. Ecoulement d'air à l'échelle d'une rue d'un bâtiment	19
1.7. Système énergétique et transfert de masse	20
1.7.1. Le bilan d'énergie urbain	20
1.7.1.1. Modification du bilan radiatif de la ville	20
1.7.2. Le bilan d'énergie des surfaces urbaines	22
1.7.3. Les modèles de bilan énergétique	24
1.7.4. Echelle du fragment urbain	25
1.7.5. Le bilan d'énergie à l'échelle des canyons urbains	27
1.8. Le bilan hydrique d'une surface:	28
1.9. Evolution spatiale des paramètres climatiques :	29
1.9.1. Température et îlot de chaleur urbain	29
1.9.1.1. Evaluation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain :	31
1.9.2. L'impact de l'urbanisation sur les températures de surfaces	33
1.9.3. L'humidité et les précipitations	33
1.9.3.1. Facteurs urbains qui affectent les précipitations	35
1.9.4. L'impact de l'urbanisation sur le rayonnement	35
1.9.5. Vent et « brises de campagne »	37
1.9.6. La brise de mer	38
1.9.7. Effet de la pente	39
1.9.8. Les plans d'eau	39
1.9. Conclusion	40

<u>Chapitre II : Caractérisation morpho-climatique des espaces extérieurs</u>	41
2.1. Introduction	41
2.2. Morphologie urbaine et forme urbaine	42
2.3. Espace public/ espace extérieur :	43
2.4. Typologie des espaces extérieurs	44
2.5. Morphologie urbaine et microclimat	46
2.6. Morphogenèse urbaine et climat	46
2.7. Performance thermique à travers les trois âges de la ville	47
2.9. Les échelles d'intervention sur la forme urbaine et éléments de classification	49
2.10. Morphologie urbaine et élément de climat	52
2.10.2. Phénomènes engendrés à l'échelle de la rue	53
2.10.3. Impacts de la morphologie urbaine sur les écoulements de l'air	56
2.9.4. Echanges radiatifs et thermiques dans le milieu urbain	57
2.9.5. Le rôle de la végétation	62
2.9.6. Matériaux de surface	62
2.9.7. Modèles élémentaires des formes construites génériques	64
2.9.8. Recherches à l'échelle d'un fragment urbain	68
2.10. Morphologie urbaine et microclimat: quels indicateurs choisir ?	71
Descripteurs géométriques, morphologiques morpho-climatiques et physiques :	
2.19. Conclusion	76

Chapitre III: Evaluation confort extérieurs : méthodes et outils.

3.1. Introduction	77
3.2. Définition du confort Thermique	78
3.3. Les principes physiologiques confort thermique: Thermorégulation	78
3.4. Les facteurs qui influent sur le confort thermique extérieur	79
3.5. L'équation d'équilibre thermique	79
3.6. Modes de transfert de chaleur	80
3.6.1. Les échanges par rayonnement	80
3.6.2. Les échanges par conduction	80
3.6.3. Les transferts par convection	80
3.6.4. Les transferts de chaleur latente	81
3.7. Le confort thermique dans les espaces extérieurs	81
3.8. Le besoin d'outils de prédiction	82
3.9. Evaluation du confort extérieur : qu'elle approche et qu'elle outils ?	83
3.9.1. Comparaison entre le confort thermique extérieur et intérieur	83
3.9.2. Les méthodes d'évaluation du confort thermique extérieur	83
3.10. Les aspects du confort thermique extérieur	87
3.11. Calibration des indices du confort	87
3.12. Les paramètres microclimatiques dans la modélisation du confort thermique	88
3.12.1. La température de l'air :	89
3.12.2. L'humidité relative de l'air	89
3.12.3. Le vent	89
3.12.4. Les échanges radiatifs	90
3.12.5. Impact des paramètres personnels	94
3.13. Aspects Psychologiques de la modélisation du confort thermique extérieur	95
3.14. Evaluation du confort thermique extérieur/ méthodes empiriques	99

Chapitre IV: Les méthodes de recueil et d'Analyse des données

1.	Introduction	105
2.	Morphogénèse de la ville d'Annaba	105
3.	Le climat de la ville d'Annaba	106
4.	Identification de la journée représentative du climat de la ville d'Annaba	107
5.	Présentation des sites	110
5.1.	La vieille ville	110
5.2.	Le centre-ville	111
5.2.1.	Cours de la révolution	111
5.2.2.	La place George Ishak	111
5.3.	Le quartier : Champs de Mars	113
5.4.	Le quartier : Menadia	113
5.5.	La cité 8 Mai 45	114
5.6.	La cité : Sidi Achour	115
6.	Echelles d'analyse	115
7.	Les indicateurs morpho-climatiques	116
7.1.	A l'échelle du tissu urbain	116
7.1.1.	La densité du bâti	116
7.1.2.	La densité surfacique (Ds)	117
7.1.3.	La densité volumique (Dv)	118
7.1.4.	Rugosité urbaine (Hu)	118
7.1.5.	La compacité	119
7.1.6.	La porosité	121
7.1.7.	Contigüité	121
8.	Définition et évaluation des indicateurs à l'échelle de l'espace public.	
8.1.	Indicateurs spatiaux (Géométriques)	122
8.1.1.	Facteur de vue de ciel (SVF)	122
8.1.2.	Degré d'enclosure	124
8.1.3.	Ombre / Ensoleillement	125
8.1.4.	Le rapport H/L et orientation	127
8.1.5.	Matériaux	129
8.1.6.	Les Composants	130
8.1.7.	Descripteurs relatifs aux usagers	130
9.	Analyse « statique » et dynamique des facteurs physiques	
9.1.	Evaluation du confort thermique extérieur	131
9.1.1.	Investigation et collecte des données	131
9.1.2.	Les facteurs climatiques	134
9.1.3.	Modèles de confort employés	134
9.1.3.1.	Le modèle de confort empirique TEP	135
9.1.3.2.	Comfa comfort Formula	135
9.1.3.3.	Calcul de l'indice de la température physiologique équivalente	137
10.	Conclusion	140

Chapitre V : Approche statistique du confort extérieur

5.1.	Introduction	141
5.2.	Déroulement des entretiens	141
5.3.	Taille de l'échantillon	141
5.4.	Interprétation des données personnelles	142
5.4.4.1.	Répartition des usagers à travers les différents sites	142
5.4.2.	Impact du genre sur le confort thermique	145
5.4.3.	Impact de l'âge sur le confort thermique	145
5.4.4.	Impact du lieu de résidence sur le confort thermique	146
5.4.5.	Impact de l'exposition au soleil sur le confort thermique	147
5.4.6.	Entourage et confort	147
5.4.7.	Couleur de la peau et confort	148
5.4.8.	Couleur des vêtements	148
5.4.9.	La Durée	149
5.4.10.	Le passé thermique	149
5.4.11.	Raison de l'utilisation de l'espace public	150
5.4.12.	Fréquence de l'utilisation	150
5.4.13.	Appréciation des différents paramètres climatiques	151
5.4.14.	Résistance des vêtements, taille et poids	151
		152
5.5.1.	La méthode la régression multiple	
5.5.2.	Récapitulation des observations	154
5.5.2.1.	Les variables utilisés	154
5.5.2.2.	Statistiques descriptives	154
5.5.3.	Évaluation de la qualité du modèle de régression	
5.5.3.1.	Analyse de variance	155
5.5.3.2.	Évaluation de l'ajustement du modèle de régression aux données	156
5.6.	Conclusion	161
<u>Chapitre VI : Impact des indicateurs morpho-climatiques sur le microclimat</u>		
		162
6.1.	Introduction	162
6.2.	Les parcours urbains	162
6.3.	Paramètres météorologiques mesurés	162
6.4.	Problèmes rencontrés	163
6.5.	Choix des parcours	163
6.6.	Présentation des parcours	164
6.6.1.	La vieille ville	164
6.6.2.	Centre ville	164
6.6.3.	Champs de mars	165
6.6.4.	.Menadia	165
6.6.5.	Cite 8 mai 45	165
6.6.6.	Sidi Achour	165
6.7.	Resltats des campagnes de mesure le long des parcours	166
6.7.1.	Interprétation du parcours de la vieille ville	166
6.7.2.	Interprétation du parcours au centre ville	167
6.7.3.	Interprétation du parcours au Champs de Mars	169
6.7.4.	Interprétation du parcours au Menadia	170
6.7.5.	Interprétation du parcours à la Cité 08 Mai 45	172
6.7.6.	Interprétation du parcours à la Cité Sidi Achour	173
6.8.	Croisement des indicateurs morphologiques avec les paramètres climatiques mesurés	174

6.8.1.	Choix de la méthode statistique d'analyse	174
6.8.2.	Modélisation des données	175
6.8.3.	Analyse graphique	175
6.8.3.1.	Analyse graphique de la Température de l'air	176
6.8.3.2.	Analyse graphique de l'Humidité relative de l'air	177
6.8.3.3.	Analyse graphique de la vitesse du vent	178
6.8.3.4.	Analyse graphique de l'indice du Confort TEP	179
6.9.	Caractérisation des variables/ test de corrélation	180
6.9.1.	Température de l'air	181
6.9.2.	Humidité relative de l'air	181
9.3.	Vitesse de l'air	181
9.4.	Indice du confort TEP	181
6.9.5.	Vérification de la significativité des relations	182
6.9.5.1.	La vérification de la signification de la régression linéaire	182
6.9.5.1.1.	Température de l'air avec la rugosité	183
6.9.5.1.2.	La température de l'air avec Cf	184
6.9.5.1.3.	La vitesse du vent avec la densité surfacique	185
6.9.5.1.4.	La vitesse du vent avec CUT.	186
6.9.5.1.5.	La vitesse du vent avec la rugosité	187
6.9.5.1.6.	TEP avec la densité surfacique	188
6.9.5.1.7.	TEP avec la rugosité	189
6.9.5.2.	Régression non linéaire	190
6.9.5.2.1.	La température de l'air et la densité surfacique	191
6.9.5.2.2.	La température de l'air et la densité volumique	191
6.9.5.2.3.	La vitesse de l'air et porosité	191
6.9.5.2.4.	TEP et la densité volumique	191
10.	Conclusion	193

Chapitre VII : Evaluation physiologique du confort extérieur

7.1.	Introduction	195
7.2.	Développement de COMFA+*	195
7.2.1.	Introduction de l'impact des bâtiments dans le modèle COMFA	196
7.2.2.	Evaluation du facteur de forme	197
7.2.3.	Introduction des activités rigoureuse et des propriétés des vêtements	199
7.3.	Résultats obtenus de COMFA+*	200
7.4.	La température physiologique équivalente PET	203
7.5.	Calibration des indices du confort: COMFA+* et PET	206
7.6.	Résultats et discussions	207
7.6.1.	La place 19 mai 56	207
7.6.2.	Le Cours de la révolution	209
7.6.3.	La Place George Ishak	211
7.6.4.	La place FLN (Champs de Mars)	214
7.6.5.	Le jardin des frênes	216
7.6.6.	Jardin 8Mai 45	217
7.6.7.	La place de Sidi Achour	218
7.7.	Modélisation des indicateurs morphologiques à l'échelle des espaces publics	219
7.7.1.	Impact du SVF sur le confort extérieur	220
7.7.2.	Impact de la durée d'ensoleillement/ durée d'ombre sur le confort extérieur	221
7.7.3.	Impact de l'albédo relatif sur le confort extérieur	222
7.7.4.	Impact du degré d'enclosure sur le confort extérieur	223

7.8.	Corrélation entre les différents indicateurs morphologiques et les indices du confort	225
7.9.	Variation du confort dans les espaces extérieurs en fonction des indicateurs morphol	226
7.9.1.	Modèle de régression de l'Albédo relatif	228
7.9.2.	Modèle de régression du facteur de vue de ciel (SVF)	228
7.9.3.	Modèle de régression de la Durée d'ensoleillement	229
7.9.4.	Modèle de régression de l'Indice de végétation	229
7.10.	Conclusion	230
Conclusion générale et axes de recherche		232
Bibliographie		236
Annexe 01		255
Annexe 02		261

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Schématisation de la relation des différents thèmes de la climatologie urbaine et leurs relations avec les échelles spatiales appropriées (d'après Harman, 2003).	11
Figure 1.2 : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (Oke, 1987)	14
Figure 1.3 La structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vitesses supérieures et inférieures à 3m/s (d'après Mestayer, Anquetin)	15
Figure 1.4 Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain, d'après (Oke, 2006).	17
Figure 1.5 Caractéristiques de surfaces pour une morphologie urbaine régulière en blocs (Grimond & Oke, 1999).	20
Figure 1.6 Seuil divisant l'écoulement en trois régimes en fonction de la forme du bâtiment et la distance du prospect (H/W) d'après OKE	23
Figure 1.7 : l'équivalent de l'énergie au sommet d'un volume imaginaire (Nunez & Oke)	25
Figure 1.8: Les résistances aérodynamiques, les flux de chaleurs sensibles et latentes et les paramètres climatiques intervenant au sein du schéma TEB (Masson et al., 2002).	25
Figure 1.9: Les échelles spatiales et modèles de simulation correspondants (d'après Robitu, 2005)	26
Figure 1.10 : Coupe sur un îlot de chaleur urbain (d'après Oke, 1978)	30
Figure 1.11 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (D'après Rizwan et al. 2008).	31
Figure 1.12 : Bilan d'énergie nocturne de trois sites : site urbain (Basel-Sperstrasse), site suburbain (Allschwil), et site rural (Village-Neuf), (D'après Pringer et al 2007).	31
Figure 1.13: Relation entre l'amplitude moyenne observée ΔT_{u-r} et la taille de la population	32
Figure 1.14 : Système théorique de coordonnées utilisées pour définir le contrôle en amont et la zone d'impact maximale d'UHI-précipitations (Bornstein et Lin (2000).	35
Figure 1.15 : Diagramme solaire : Latitude 55° montrant l'impact des obstructions sur l'ensoleillement (D'après Littlefair, 1998).	36
Figure 1.16: Conception du plan de masse sur la base du solaire passif (Littlefair, 1998).	37
Figure 2.1 : Lecture morphologique des espaces extérieurs.	43
Figure 2.2 : Réorganisation scientifique de l'îlot selon l'axe thermique	47
Figure 2.3. Méthode de classification en zones climatiques locales (LCZ)	52
Figure 2.4: Relation entre le SVF et la température de surface, obtenus le 18 Novembre 1987 à 18 :00 et à 22 :00+ A33: A51 ne journée calme (D'après Elliason 1990/1991).	53
Figure 2.5 : Impact de l'introduction des tours sur le confort thermique (Priyadarsini.R, 2005)	56
Figure 2.6 : Ecoulement de l'air dans une intersection d'une rue avec un grand bâtiment indiquant les échanges entre la rue et les processus de mélange supplémentaires engendré à cause du grand bâtiment.	56
Figure 2.7 : Impact de l'orientation sur l'écoulement d'air (D'après Glony.G, 1995).	57
Figure 2.8: Piègeage radiatif à l'échelle des rues (Griffiths, 1976).	57
Figure 2.9 : Rayonnement mensuel moyen, juin, pour deux canyon orienté E-O et N-S avec de différents rapports d'aspect, les symboles +, x, *, □, Δ, ○ correspondent à H/W=0.25, 0.5, 1, 2, 3 et 4 respectivement (D'après Arnfield, 1999).	58
Figure 2.10: 1Angles of incidence of direct-beam solar radiation at noon in an E-W canyon, in a city at 45°N. (a) In a canyon with H/W = 1.0; (b) H/W = 0.40.	59
Figure. 2.11 : a) Variation de l'entropie longitudinale du réseau routier de Genève. B) Variation du rayonnement solaire annuel reçu à Genève. C) Corrélation entre le rayonnement solaire annuel reçu et l'entropie des rues	60
Figure 2.12 Les différents profils de rues (d'après Ali-Toudert).	61
Figure 2.13 : Orientation, SVF et profil de la forme bâtie	61
Figure. 2.14 : Influence de la géométrie urbaine, décrite par le ratio $W1/W2$, et de l'angle du soleil θ sur l'albédo global. Fondée sur des simulations avec $H/W2 = 1,0$ (Oke (1988)).	63

Figure 2.15 Formes urbaines génériques de Martin et March de gauche à droite: pavillonnaire, dalle, terrasse, terrasse avec cour, pavillonnaire avec cours et cours.	64
Figure 2.16 : Comparaison des consommations selon trois modèles élémentaires des formes urbaines (d'après Yuan Huang)	64
Figure 2.17: Vues de face et vue de dessous de quatre dispositions des constructions (d'après Chen et al).	65
Figure 2.18: Comparaison entre les différentes formes d'occupations et les différentes hauteurs.	65
figure 2.19: Evaluation du potentiel et de l'éclairage naturel et du solaire thermique et photovoltaïque selon cinq scénarios(Compagnon. R, 2000).	67
Figure 2.20: Représentation schématique de l'indice de plancher (FSI) égale à 1.0: (a) quatre étages (Type individuel); (b) Deux étages (Type individuel).	68
Figure 2.21 : Comparaison entre les quatre scénarios d'aménagement de Mariaque et al.	68
Figure 2.22 : Les typologies analysées à :Beijing , Shanghai, Paris , Berlin	69
Figure 2.23: Zones passive Selon la méthode LT ,elle s'étend sur 6 m (où deux fois la hauteur du plafond) de la façade (d'après Baker et Steemers)	70
Figure 2.24 : La liaison entre les indicateurs environnementaux et les descripteurs morphologiques.	74
Figure 2.25: Typologie des trois sites analysés par Groleau et Marennes (1995)	74
Figure 3.1 : Les différents aspects du confort thermique extérieur (d'après Chen et Ng, 2012).	82
Figure 4.1 : Répartition des sites à travers la ville d'Annaba	105
Figure 4.2 : Analyse climatique de la ville d'Annaba (Ecotect)	106
Figure 4.3 : Comparaison entre les températures de l'air enregistrées entre 2004/2013 et la moyenne annuelle	108
Figure 4.4 : Comparaison entre les humidités enregistrées entre 2004 et 2013 et la moyenne annuelle	108
Figure 4.5 : Comparaison entre les vitesses de l'air enregistrées entre 2004 et 2013 et la moyenne annuelle	108
Figure 4.6 : Comparaison entre le rayonnement enregistré entre 2004 et 2013 et la moyenne annuelle	108
Figure 4.7 : Comparaison des valeursdes paramètres physiques relatifs à la journée du 1er juillet enregistrés pendant les quatre années filtrées avec leur moyenne	109
Figure 4.8 : Comparaison des valeursdes paramètres physiques relatifs à la journée du 28 juillet enregistrés pendant les quatre années filtrées avec leur moyenne.	109
Figure 4.9 : Présentation de la vieille ville d'Annaba.	111
Figure 4.10 : Présentation du cours de la révolution	112
Figure 4.11 : Présentation de la place Goerge Ishak.	112
Figure 4.12 : Présentation du champ de mars.	113
Figure 4.13 : Présentation de la Menadia.	114
Figure 4.14 : Présentation du 8 Mai 45.	114
Figure 4.15 : Présentation du Sidi Achour.	115
Figure 4.16 : La densité surfacique des différents sites.	117
Figure 4.17 : La densité volumique des différents sites.	118
Figure 4.18 : La Rugosité des différents sites.	118
Figure 4.19 : La compacité des différents sites : calcul des indices : Cf et Cut.	120
Figure 4.20 : La porosité des différents sites.	121
Figure.4.21 : Comparaison entre le facteur de vue du ciel des différents sites	121
Figure 4.22 : Méthode d'évaluation du degré d'enclosure.	122
Figure 4.23 Degré d'enclosure.	124
Figure 4.24 : La durée d'ombre.	125
Figure 4.25: La durée d'enseulement.	125
Figure 4.26.Comparaison du rapport Hauteur largeur H/L des différents sites	126
Figure 4.27 : SVF des parois des différents espaces publics	129
Figure 4.28 :Albédo relatif des différents espaces publics.	129
Figure 4.29.Calcul de l'indice de végétation (I.V).	129
Figure 4.30 : thermo-hygromètre, model LM-8000	132
Figure 4.31 : Mini station DELTA OHM HD32.3	133

Figure 4.32 : Fenêtre de commande d'ENVI-met BIOMET V1.01	139
Figure 5.1 : Répartition des usagers à travers les espaces publics.	143
Figure 5.2 : Variation de la sensation thermique à travers les espaces publics.	143
Figure 5.3 : Importance des causes relatives au choix des espaces extérieurs.	143
Figure 5.4 : Répartition du genre dans l'échantillon.	144
Figure 5.5 : Répartition de la sensation thermique selon le genre.	144
Figure 5.6 : Répartition de l'échantillon selon l'âge.	145
Figure 5.7 : Répartition de la sensation thermique selon l'âge.	145
Figure 5.8 : Résidence des interviewés.	146
Figure 5.9 : Sensation thermique selon la résidence des interviewés.	146
Figure 5.10 : L'impact de l'exposition au soleil sur les usagers.	147
Figure 5.11 : Entourage des interviewés.	147
Figure 5.12 : Impact de la couleur de la peau sur le confort thermique.	148
Figure 5.13 : Impact de la couleur des vêtements sur le confort thermique.	148
Figure 5.14 : Répartition des durées en fonction des usagers.	149
Figure 5.15 : Sensation thermique en fonction de la durée.	149
Figure 5.16 : Sensation thermique en fonction du passé thermique.	149
Figure 5.17 : Répartition des activités.	150
Figure 5.18 : Répartition des fréquences.	150
Figure 5.19 : Sensation thermique selon les fréquences.	151
Figure 5.20 : Appréciation des différents paramètres climatiques.	151
Figure 5.21 : L'indice IMC selon l'échantillon.	152
Figure 5.22 : Résistance des vêtements, taille et poids	152
Tableau 5.1 : Récapitulatif des observations	
Figure 5.23 : Vérification de l'homéostasie	157
Figure 5.24 : Diagramme gaussien P-P de régression de Résidu standardisé	158
Figure 5.25 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ température de l'air	159
Figure 5.26 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ humidité relative de l'air	159
Figure 5.27 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ vitesse de l'air	159
Figure 5.28 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ température moyenne radiante	160
Figure 5.29 : Intervalles de confort de l'indice empirique TEP	161
Figure 6.1 : Présentation du parcours à la vieille ville	163
Figure 6.2 : Présentation du parcours au Centre ville.	164
Figure 6.3 : Présentation du parcours au Champs de Mars.	164
Figure 6.4 : Présentation du parcours au Menadia.	165
Figure 6.5 : Présentation du parcours à la cité du 8 mai 45.	166
Figure 6.6 : Présentation du parcours à Sidi Achour.	166
Figure 6.7 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (la vieille ville).	166
Figure 6.8 : Température équivalente prévisible calculée dans la vieille ville.	167
Figure 6.9 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (centre ville)	167
Figure 6.10 : Température équivalente prévisible (centre ville).	168
Figure 6.11 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (Champs de mars)	168
Figure 6.12 : Température effective prévisible à Champs de mars.	169
Figure 6.13 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiante (Menadia).	169
Figure 6.14 : Température effective équivalente prévisible (Menadia)	170
Figure 6.15 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (8 mai 45)	172

Figure 6.16 :Température équivalente prévisible (8 mai 45).	172
Figure 6.17 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (Sidi Achour)..	173
Figure 6.18 : Température équivalente prévisible (Sidi Achour).	174
Figure 6.19 : Diagrammes nuage de points, température et les indicateurs morphologiques	176
Figure 6.20 : Diagrammes nuage de points, humidité et les indicateurs morphologiques	177
Figure 6.21 : Diagrammes nuage de points, vitesse du vent et les indicateurs morphologiques	178
Figure 6.22 : Diagrammes nuage de points, TEP et les indicateurs morphologiques	179
Figure 6.23 : Régression de Ta par rugosité	182
Figure 6.24 :Régression de Ta par cf	184
Figure 6.25 :Régression de la vitesse de l'air par la densité de surface	185
Figure 6.26 :Régression de la vitesse de l'air par Cut.	186
Figure 6.27 :Régression de la vitesse du vent par la rugosité.	187
Figure 6.28 :Régression de TEP par la densité de surface.	188
Figure 6.29 :Régression de TEP par la rugosité	189
Figure 6.30 :Régression non linéaire de Ta par la densité de surface	190
Figure 6.31 :Régression non linéaire de Ta par la densité volumique.	191
Figure 6.32 :Régression non linéaire de la vitesse du vent par la porosité.	192
Figure 6.33 :Régression de TEP par la densité volumique	193
Figure 7.1:Coordonnées entre une personne (P) et une surface dans un environnement rectangulaire. (d'après P.O. Fanger,1972).	198
Figure 7.2: Répartition de l'enclosure en fonction de six situations géométriques.	198
Figure 7.3: Visualisation des différences entre les points de coupes des intervalles en fonction des réponses des usagers (d'après Nonnenmacher, A., 2005inKatzschner, 2010),	206
Figure 7.4 : Orientation des parois B1, B2, B3 et B4 dans la place 19mai56.	207
Figure 7.5 : Coupe Coupe aa N/S a 9h et 15h	208
Figure 7.6 : Coupe bb E/O a 9h et 15h	209
Figure 7.7 : Orientation des parois B2 et B4 dans le cours de la révolution.	210
Figure 7.8 : Orientation des parois B1, B2, B3 et B4 dans la place George Ishak.	211
Figure 7.9 : Coupe aa N-S a 09h et 15h.	212
Figure 7.10 Coupe bb E-O a 09h et 15h	213
Figure 7.11 : Orientation des parois B1, B2, B3 et B4 dans la place la place du FLN.	214
Figure 7.11 Coupe aa SE-NO à 9h et 15h	215
Figure 7.12 : Coupe bb SO-NE à 9h et 15h	216
Figure 7.13 : Orientation des parois B2, B3 et B4 dans le jardin des frênes.	216
Figure 7.14 : Orientation des parois B2, B3 et B4 dans le jardin du 8Mai 45.	217
Figure 7.15 : Orientation des parois B1 et B3 dans la cité Sidi Achour.	218
Figure 7.16 : Variation du confort à travers les différents espaces publics.	219
Figure 7.17 Impact du facteur de vue de ciel sur le confort extérieur.	220
Figure 7.18 Impact de la durée d'ensoleillement sur le confort extérieur.	221
Figure 7.19 Impact de l'ombre sur confort extérieur.	221
Figure 7.20 Impact de l'Albédo relatif sur le confort extérieur.	222
Figure 7.21 :Impact du degré d'enclosure sur le confort extérieur.	223
Figure 7.22 Impact de l'indice de végétation sur le confort extérieur.	223
Figure 7.23 : Régression de TEP par l'albédo relatif	226
Figure 7.24 : Régression des indices de confort (TEP, Comfa+* et PET) par SVF.	227
Figure 7.25 : Régression des indices de confort (TEP, Comfa+* et PET) par la durée d'ensoleillement.	228
Figure 7.26 : Régression des indices de confort (TEP, Comfa+* et PET) par la durée d'ombre..	228
Figure 7.27 : Régression des indices de confort (TEP, Comfa+* et PET) par l'indice de végétation.	229

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Interdépendance entre les différentes échelles climatiques et leur incidence sur les actions d'aménagement et les projets construits	11
Tableau. 1.2 – Comparaison entre la couche limite dans le milieu urbain (U) et rural .	13
Tableau 1.3 : Valeurs typiques de rugosité autres propriétés aérodynamiques des zones urbaines homogènes ordonnées selon la hauteur et la densité (d'après Grimmond, Oke).	18
Tableau 1.4 : La turbulence selon les différentes échelles urbaines.	19
Tableau 1.5 : Comparaison entre les modèles d'énergie (D'après Colombert, 2008).	27
Tableau 1.6: Les valeurs acceptables de Pmax relatives au vent et confort (Willemsen et Wisse, 2007)	38
Tableau 2.1 : Forme et fonction des espaces extérieurs selon l'échelle géographique (Benjamin W. Stanley et al, 2012)	44
Tableau 2.2 : Outils de contrôle du microclimat urbain selon les différentes échelles (d'après G. Mills, 2006).	50
Tableau 2.3 : Zones climatiques urbaines (UCZ) (d'après Oke 2008).	51
Tableau 2.4: Typologie des trois sites analysés au Caire par Fahmy et Sharples (2008)	68
Tableau 2.5 : Indicateurs morphologiques selon l'échelle du quartier et celle de l'espace urbain et leurs influences (d'après Ait-Ameur).	72
Tableau 2.6: Propriétés des surfaces urbaines et la variation de leurs valeurs à travers les différentes échelles (suburbaine, urbaine et tours(Pringer et Sylvain, 2005)	72
Tableau 2.7. Eléments d'analyse microclimatique selon l'échelle du quartier et celle de l'espace public (d'après Pinho et al. 2003):	75
Tableau 3.1: Calibration du PET (°C) en Allemagne, Hong Kong, Brésil et Tehran (Basé sur des données empiriques)	88
Tableau 3.2 : Les facteurs de correction pour dériver la température moyenne radiante/Tmrt) , à partir de la températures de l'air et la température du globe (TG).	89 92
Tableau 3.3 : Comparaison de l'évaluation de la Tmrt à partir d'Envi-met et SOLWEIG.	98
Tableau 3.4: Indice du confort PETet activité en fonction des mesures et des interviews à Kassel/Allemagne (Katzschner 2002)	101
Tableau 4.1 :Ecart type de la température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et rayonnement.	105
Tableau 4.2 :Indicateurs morphologiques à l'échelle de l'espace public.	107
Tableau 4.3: Diagrammes solaires, orientation, ombre et ensoleillement pendant la journée type du 1er juillet.(A). Place 19mai56, (B). Cours de la révolution, (C). La place GoergeIshak, (D). La place FLN, (D).Jardin des frênes, (E). Jardin 8Mai45, (F) La place Sidi Achour.	121
Tableau 4.4 : L'albédo, émissivité et conductivité des éléments rencontrés en aménagement urbain	127
Tableau 4.5 : Quelques valeurs de résistance de vêtements typiques.	130
Tableau 4.6 :Echelle du confort adaptée dans le questionnaire comparée à l'échelle d'ASHRAE Refrigerating and Air conditioningEngineers), (d'après RabiatalAdawiyah .N, 2012)	134
Tableau 5.1 : Récapitulatif des observations	154
Tableau 5.2 : Variables introduites et supprimées.	154
Tableau 5.3 : Statistiques descriptives	155
Tableau 5.4 : Corrélation.	155
Tableau 5.5 : Analyse de variance (ANOVA)	156
Tableau 5.6 : Récapitulatif du modèle	156
Tableau 5.7 : Calcul des coefficients	157
Tableau 5.8 : Diagnostic de colinéarité	157
Tableau 5.8 : Interprétation des intervalles de l'indice du confort TEP	160
Tableau 6.1 Matrice de corrélation (Pearson) de Ta et les indicateurs morphologiques	180
Tableau 6.2 Matrice de corrélation (Spearman) de Ta et les indicateurs morphologiques	180
Tableau 6.3 Matrice de corrélation (Spearman) de HR et les indicateurs morphologiques	181
Tableau 6.4 : Matrice de corrélation (Pearson) entre Vv et les indicateurs morphologiques :	181

Tableau 6.5	Matrice de corrélation (Spearman) entre Vv et les indicateurs morphologiques.	181
Tableau 6.6	Matrice de corrélation (Pearson) entre TEP et les indicateurs morphologiques.	181
Tableau 6.7	Matrice de corrélation (Spearman) entre TEP et les indicateurs morphologiques	181
Tableau 6.8	Test de significativité des régressions.	181
Tableau 6.09	: Paramètres du modèle (Ta).	182
Tableau 6.10	: coefficients d'ajustement de régression de la variable Ta	
Tableau 6.11	: coefficients d'ajustement du modèle de régression vitesse du vent/Densité de surface.	183
Tableau 6.11	: Paramètres du modèle (Ta).	185
Tableau 6.12	: coefficients d'ajustement du modèle de régression vitesse du par Cut.	186
Tableau 6.13	: coefficients d'ajustement du modèle de régression vitesse du par la rugosité.	187
Tableau 6.14	: coefficient d'ajustement du modèle de régression TEP par la densité surfacique.	188
Tableau 6.15	: coefficient d'ajustement du modèle de régression TEP par la rugosité.	189
Tableau 7.1:	Description des situations analysées.	198
Tableau 7.2:	Paramètres utilisés dans l'équation pour une personne assise avec leurs coefficients de corrélation.	199
Tableau 7.3:	Paramètres utilisés dans l'équation pour une personne debout avec leurs coefficients de corrélation.	199 200
Tableau 7.4	les modifications portées sur les équations du modèle initial de COMFA.	
Tableau 7.4	: Valeurs de COMFA+* enregistrées à 09h le 1 ^{er} juillet 2014	201
Tableau 7.5:	Valeurs de COMFA+* enregistrées à 13h le 1 ^{er} juillet 2014	
Tableau 7.6	: Valeurs PET enregistrées à 09h le 1 ^{er} juillet 2014	204
Tableau 7.7	: Valeurs PET enregistrées à 13h le 1 ^{er} juillet 2014	205
Tableau 7.8.	La calibration du PET et COMFA+*.	206
Tableau 7.9	.Matrice de corrélation (Pearson) de la corrélation entre les différents indicateur	225
Tableau 7.10	p-values des corrélations des différents indicateurs	227

INTRODUCTION GENERALE

Suscités des impératifs techniques liés à la circulation et à la fluidité, support des activités urbaines, lieux de rencontre et de sociabilité, les espaces extérieurs représentent un composant fondamental dans la ville.

Actuellement, architectes, urbanistes, constructeurs et décideurs sont de plus en plus conscients de l'importance de l'amélioration de leur qualité, ainsi qu'à la création des zones urbaines abritants des espaces confortables.

En effet, le bien-être dans la ville implique la présence des qualités d'ambiances et de confort (bien-être physique et physiologique) qui correspondent non seulement à des usages déterminés mais à des attitudes générales.

La qualification d'un espace public ne se réduit pas seulement à lui attribuer des fonctions tel que mettre des bancs, aménager des aires de jeux, de stationnement ou autre, en effet, se limiter uniquement à des qualités fonctionnelles rend l'espace pauvre et fragile.

Bien que le confort soit une notion abstraite, on remarque que le changement dans le comportement et les activités déployées des usagers sont souvent associés à des conditions climatiques différentes. Similaires aux bâtiments, les espaces extérieurs génèrent des ambiances thermiques spécifiques dépendant de la combinaison de plusieurs facteurs, à savoir le microclimat généré et des facteurs sociaux économiques.

En fait, le microclimat généré en un milieu urbain dépend en premier lieu des conditions météorologiques, de la géométrie urbaine, des matériaux de construction ainsi qu'à la présence ou non des surfaces d'eau ou vertes.

En outre, la présence d'un site urbain crée une perturbation dans la température, l'humidité et dans la vitesse du vent du méso climat. Il est alors considéré comme un transformateur de climat qui génère depuis des conditions méso climatiques un microclimat spécifique. Ce microclimat correspond à la réaction thermo aéraulique de l'espace urbain liée à des échanges thermiques internes à partir de la conduction, la convection, de l'advection et de la diffusion (Pignol et Tardan, 1997).

Quoique l'étude des phénomènes thermo aérauliques en milieu ouvert se révèle complexe par l'ensemble des phénomènes mis en jeu à savoir : rayonnement solaire, rayonnement grande longueur d'onde, vent dominant, convection naturelle et phénomène de couche limite, inertie des bâtiments et des parois, une conception maîtrisée doit se donner les moyens de contrôler ces paramètres et de ne pas les confier au hasard (Izard, 1989).

Problématique :

La notion du confort n'est pas récente, on s'est rendu compte depuis plusieurs années de l'impact du microclimat sur la santé et le bien être du corps. Hippocrate écrivait depuis 2500 années sur les différences régionales des climats et leurs impacts sur la santé (Matzarakis, 2003).

En fait, le confort est lié à des paramètres physiologiques relatifs au système de régulation thermique et psychologique propres à chaque individu.

Le corps répond au stimulus thermique à travers plusieurs processus de déperdition et de production de chaleur afin d'arriver à un équilibre thermique (Höppe, 2002).

Le bilan thermique du corps humain est influencé par plusieurs paramètres climatiques et non climatiques.

Dans un temps calme, la température moyenne radiante joue un rôle plus important que la température de l'air (Tebbani, 2006). Elle est directement transformée en une chaleur sensible. L'humidité peut être nuisible lorsqu'elle est associée à de hautes températures où les déperditions par évaporation deviennent impossibles à cause de la saturation de l'air (Szokolay, 1979). Le vent accélère la convection et l'évapotranspiration, il peut être avantageux pour les déperditions lorsque les températures de l'air sont inférieures à celle du corps, comme il peut avoir des effets néfastes lorsque les températures de la peau sont inférieures à celle de l'air. De part leurs résistances les vêtements peuvent limiter les déperditions pendant le temps froid et augmenter l'échauffement tandis que leurs effets pendant la période chaude sont ambivalents. Le taux de métabolisme produit une chaleur qui est encore plus importante que celle des gains.

Jointement, l'évaluation du confort thermique dépend d'autres facteurs disant subjectifs tel que : Age, sexe, la forme du corps et l'acclimatation.

A côté du système physiologique thermorégulateur, l'individu répond à travers plusieurs comportements à son environnement thermique, à qui il s'acclimate après une certaine durée (Givoni, 2003). L'utilisateur n'est pas un récipient « passif » subissant des stimuli thermiques dans des chambres expérimentales mais comme un acteur actif qui développe des actions d'adaptation afin d'atteindre le confort (Kitous et al, 2006).

La multiplicité des paramètres influant sur le confort thermique rend son évaluation très compliquée. C'est pourquoi on remarque le peu de travaux concernant ce sujet.

Selon De Dear (2003) le confort extérieur a toujours eu la moindre attention à cause de :

- Les gens passent la majorité de leurs temps à l'intérieur.
- Le confort est directement lié à la productivité (lieux de travail).
- L'extérieur est encore plus difficile à maîtriser.
- La propriété n'est pas vraiment déterminée comme l'intérieur.

Malgré tout, l'objectif de chaque conception urbaine est l'aboutissement à des espaces plus ou moins confortables. Ceci ne peut être acquis sans la compréhension de tous ces facteurs afin de les surmonter et prédire le résultat de leurs interactions.

Dans un environnement peu ventilé, le bilan thermique est directement influencé par les échanges radiatifs exercés par les surfaces environnantes (sol, paroi, composants minéraux et végétaux). En d'autres termes, le bilan radiatif dépend du climat et de la morphologie du lieu déterminée par la forme tridimensionnelle des bâtiments ainsi que les espaces qu'ils créent.

La morphologie peut être alors définie par :

- La géométrie des bâtiments.
- Les matériaux de construction.
- L'eau et la végétation (éléments composants).

Elle peut être caractérisée par des indicateurs physiques tels que le rapport hauteur/largeur entre le bâtiment et la rue ou le facteur d'ouverture au ciel « SVF », exprimé selon le rapport entre la quantité de radiations hémisphériques environnantes dérivées à partir des photos appelées « Fish eye » prises en se dirigeant vers le point de zénith.

Rapporter à leurs couleurs (albédo) et leurs propriétés thermiques, les matériaux jouent un grand rôle sur les échanges radiatifs.

Cependant le choix des matériaux obéit à des considérations purement techniques et économiques. Des études sur l'îlot de chaleur urbain : « phénomène essentiellement nocturne qui fait que la température de l'air observée dans une zone bâtie est significativement plus élevée que celle observée dans les zones rurales environnantes », ont révélé une grande part de responsabilité des matériaux dans la prolifération de ce phénomène augmentant ainsi le degré d'inconfort.

En outre, l'absence de la végétation et la minéralisation généralisée dans les espaces extérieurs ont accru cet écart du fait qu'une grande quantité de radiations absorbées est restituée sous forme de chaleur sensible.

Grâce à son pouvoir évaporatif, l'arbre peut réduire une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur latente. Généralement le bilan d'énergie d'un arbre peut être résumé comme suit :

25 % réfléchi, 5 à 15 % transmis (en été pour un arbre caduc), partiellement absorbé par photosynthèse (5 %), émis comme chaleur sensible (10 à 15 %) et comme chaleur latente par évapotranspirations (40 %).

Sans dispenser les facteurs psychologiques et socioculturels difficilement contrôlables, l'évaluation du confort thermique est impérativement liée à la combinaison de tous ces paramètres.

Basée sur les conditions météorologiques, l'équation de l'équilibre thermique ainsi que les paramètres propres aux individus : vêtement et activité, des indices de confort thermiques extérieurs ont été conçus. La majorité entre eux était inspirée des indices du confort intérieur. Certains d'entre eux se sont basés sur l'équation de l'équilibre thermique de Fanger d'autres sur le modèle allemand MEMI¹, modèle très avancé dans la thermo physiologie. Bien que ces indices aient essayé de remédier à plusieurs contraintes les standardisations étaient inévitables.

A côté des indices, le confort extérieur peut être évalué subjectivement à partir des investigations basées sur des entretiens. Les conditions climatiques sont mesurées simultanément aussi bien que l'habillement et l'activité exercée. Les corrélations obtenues en fonction des paramètres climatiques et la sensation thermique exprimée peuvent être transcrites sous forme d'équations de confort.

- Alors, comment définir les conditions de confort à partir du croisement des **données météorologiques** avec les données de la **morphologie urbaine** ?
- Comment aboutir à des **méthodes d'évaluation de confort** thermique simples, abordables et qui peuvent être facilement utilisées par les concepteurs ?
- Comment équilibrer le **bilan radiatif** pour atteindre un seuil plus ou moins proche des conditions de **confort** ?
- Comment intégrer la **dimension morphologique et climatique** dans la formation d'urbanistes et d'architectes ? Quelles sont les **indicateurs morphologiques** les plus pertinents ?

Hypothèses de la recherche :

L'amélioration de la qualité des espaces extérieurs, dépend essentiellement des ambiances thermiques générées. Pour concevoir un environnement thermique extérieur confortable, les concepteurs ont besoin d'outils d'évaluation performants afin de pouvoir prédire avec plus de précision le degré de confort généré.

L'intégration de ces outils dans la conception architecturale durant la phase amont de projets ainsi que dans l'aménagement d'espaces existants permet d'améliorer les conditions du confort thermique.

Ces outils permettent en premier lieu de simuler le bilan thermique qui est directement influencé par les échanges radiatifs exercés par les surfaces environnantes (sol, paroi, composants minéraux et végétaux).

¹ **IMEM**:instationay munich, energy-balance model

Objectifs de la recherche :

L'évaluation du confort extérieur est un élément essentiel pour l'amélioration de la qualité des espaces extérieurs et l'amortissement du degré de surchauffe enregistré dans les centres urbains selon plusieurs études.

En effet, à l'extérieur l'homme est soumis à des échanges radiatifs entre son corps et les surfaces environnantes à qui en revient le rôle le plus important dans l'évaluation du confort thermique extérieur.

Basé sur ces considérations l'objectif de ce travail est :

- La détermination des composants thermiques les plus significatifs influant sur le confort thermique et la prédiction du comportement du corps humain vis-à-vis de ces composants.
- L'intégration des différents aspects du confort thermique pour la caractérisation climatique des formes urbaines et la prédiction du degré de confort correspondant.
- La définition d'un modèle d'évaluation du confort thermique à partir du contexte étudié.
- L'amélioration d'autres méthodes de simulation numériques en introduisant une approximation très proche du modèle du réel.

Méthodologies de la recherche :

L'objectif de ce travail s'articule autour de la définition des outils d'aide à la prédiction du niveau du confort généré dans les espaces extérieurs dans un état précoce du projet. Il se basera sur les modalités physiques et perspectives du confort thermique dans les espaces extérieurs. La problématique du confort thermique est abordée sous l'angle du comportement thermique du milieu physique et la réaction physiologique, psychologique ou comportementale des usagers.

Pour répondre à nos objectifs on a adopté la méthode descriptive basée sur le traitement des paramètres climatologiques de manière essentiellement statistique, et la méthode physique qui s'appuie sur la modélisation selon les étapes suivantes :

1. Des investigations qui consistent en la prise des mesures des différents paramètres climatiques selon deux stratégies :
 - a. Mesure de la température de l'air, l'humidité relative, vitesse du vent et la température du thermomètre globe à travers les espaces publics suivants : La place du 19mai56, cours de la révolution, la place George Ishak, la place FLN, le jardin des frênes, le jardin 8mai45 et la place de Sidi Achour. Ces campagnes de mesures ont été accompagnées par des interviews adressées aux différents usagers selon l'approche statique.
 - b. Mesure de la température de l'air, humidité relative et la vitesse du vent selon une dynamique de parcours à travers plusieurs axes des quartiers suivants : La vieille ville d'Annaba, le centre-ville, le quartier champs de mars, la Menadia, la cité 8mai45 et la cité Sidi Achour.
2. Calcul des indicateurs morphologiques les plus significatifs, déduits de nos recherches bibliographiques.
3. Conception de notre modèle empirique « TEP », température effective perçue, suite au traitement des données collectées par le programme statistique SPSS, et à partir de la régression linéaire multiple.

4. Croisement des données tirées des parcours avec les indicateurs morphologiques calculés et la formulation de quelques modèles linéaires.
5. Evaluation du confort thermique par la simulation à travers l'utilisation de deux modèles physiologiques :
 - a. Une mise à jour du modèle COMFA suite aux recherches antérieures et le développement d'un nouveau modèle COMFA+* en utilisant Matlab.
 - b. Le calcul de l'indice du confort « PET » (température physiologique effective) grâce aux deux modèles : Envi-met et BioMet
Ces deux indices ont été calibrés grâce aux données collectés durant nos investigations.

Ainsi le travail sera réparti comme suit :

Chapitre I

L'architecte doit connaître les bases des phénomènes physiques produits dans le milieu urbain. Ces bases sont nécessaires pour une prise de décision pertinente dans les phases en amont du projet. Elles se traduisent par une bonne compréhension de la composante énergétique ainsi que ses manifestations (chaleur, mouvement, etc.) et leurs conséquences sur l'individu (confort thermique). Ainsi le premier chapitre regroupera toutes les notions relatives aux échanges énergétiques au niveau de la ville. Il traitera les différents bilans radiatifs, énergétiques et hydriques, l'écoulement de l'air ainsi que toutes les modifications portées sur ces bilans suite aux changements des propriétés des surfaces dans le milieu urbain.

Chapitre II :

La conception architecturale et urbaine conditionne les transferts énergétiques et les ambiances générées en fonction des traitements des limites des formes urbaines. Elles exigent une bonne maîtrise des contraintes énergétiques et leurs interactions avec les autres composantes du projet. Ainsi le deuxième chapitre discutera l'environnement thermique des espaces extérieurs et toutes ses propriétés physiques et morphologiques. Il regroupera les recherches qui ont concerné la caractérisation thermique des formes urbaines. En outre, quelques indicateurs morphologiques seront présentés accompagnés par leurs impacts sur le climat.

Chapitre III

Notre recherche vise à caractériser les différentes formes d'interaction entre l'individu et son environnement thermique. En effet l'être humain répond à cet environnement par les différents mécanismes physiologiques liés au système de régulation et psychologiques adaptatifs selon l'expérience de chaque personne. De la sorte, ce chapitre traitera un ensemble de méthodes qui ont été utilisées afin d'évaluer le confort thermique extérieur, ainsi que leurs avantages et leurs limites.

Chapitre IV

En règle générale le pouvoir prédictive de la climatologie urbaine ne peut être atteint qu'à travers une rigueur méthodologique, basée sur une détermination adéquate des surfaces urbaines et de leurs propriétés physiques, la maîtrise des différentes échelles, l'observation, l'interprétation et la modélisation. Dans cette logique, notre méthodologie de recherche s'appuiera sur des investigations

et des interviews ainsi que sur des modèles numériques afin de réunir tous les aspects du confort thermique.

Chapitre V :

Ce chapitre présentera l'analyse statistique des données collectées pendant l'investigation ainsi que le développement du modèle empirique de l'étude TEP (température effective perçue).

Il comportera la définition du cadre général de la recherche, le déroulement des investigations et des entretiens effectués. Ensuite, le traitement et l'interprétation des données tirées des entretiens et l'impact de chacune sur l'appréciation du confort. L'aboutissement au modèle empirique et les différents tests statistiques qui lui sont associés.

Chapitre VI :

Ce chapitre englobera l'analyse des données climatiques à l'échelle des quartiers (échelle locale), mesurées pendant une journée type d'été (1^{er} juillet). Il présentera les différents parcours ainsi que les résultats obtenus des campagnes de mesures. Le croisement des indicateurs morphologiques avec les paramètres climatiques relevés (température de l'air, humidité relative et vitesse du vent), la température moyenne radiante calculée et l'indice du confort empirique TEP. Comme il contiendra les modélisations des données collectées à travers la régression linéaire afin de tester le pouvoir prédictif des variables morphologiques.

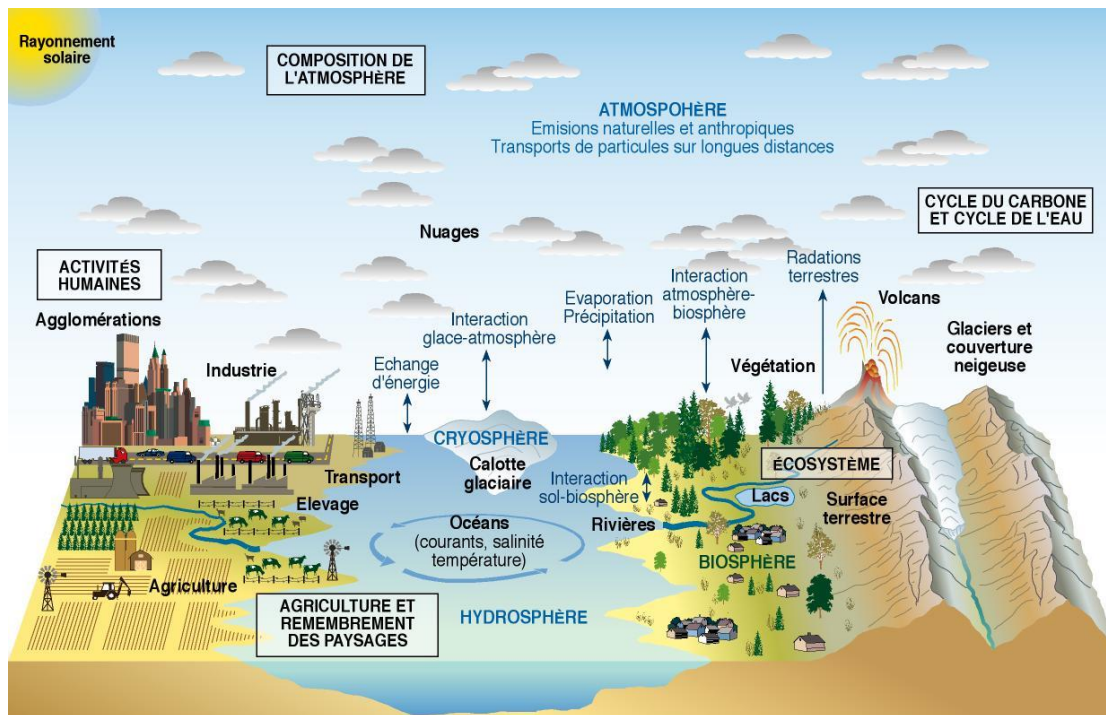
Chapitre VII :

Le présent chapitre traitera la relation entre les indicateurs morphologiques à l'échelle des espaces extérieurs (échelle micro) à travers la simulation numérique basée sur un modèle descriptif du réel. Cette méthode prend progressivement une grande importance dans le processus de conception urbaine et architecturale. Il comprendra le développement du modèle COMFA+* et toutes les modifications portées sur le modèle initial. Les résultats obtenus du nouveau programme ainsi que les résultats du deuxième indice physiologique employé PET (température équivalente physiologique) seront également présentés. Les indices de confort seront par ailleurs calibrés en fonction des investigations réalisées. Comme il contiendra la modélisation des indicateurs morphologiques et la définition des différentes relations linéaires.

Ceci conduira à l'établissement des recommandations et des guides pour la conception des espaces extérieurs confortables et surtout praticables.

CHAPITRE I

Microclimat, morphologie urbaine et interactions énergétiques



1.1. Introduction :

La climatologie urbaine s'inscrit dans les préoccupations de la climatologie locale, qui étudie les relations entre le climat et l'environnement et se différencie ainsi de la climatologie synoptique, longtemps favorisée par les géographes-climatologues qui privilégient les relations entre le climat et la dynamique atmosphérique (Charabi & al, 2002). L'accélération du rythme de l'urbanisation ces dernières décennies, a ouvert à cette discipline un nouveau champ de recherche, relatif aux modifications climatiques induites par la ville.

En effet, le climat joue un grand rôle dans la conception urbaine et architecturale et doit être intégré dans la formation des architectes et des urbanistes. La négligence de ce paramètre dans la planification urbaine était l'une des causes principales de la dégradation du climat urbain et l'apparition des problèmes liés au confort et au bien-être.

Selon Givoni (1989), La température extérieure, la vitesse du vent et le rayonnement solaire sous lesquels est exposé un bâtiment ne ressortent pas de la climatologie synoptique régionale, mais du microclimat généré par la « structure » de la ville, et principalement du quartier où se situe ce bâtiment.

Frommes (1982) a cité plusieurs exemples sur les conséquences de la négligence de la climatologie urbaine dans la planification à travers plusieurs villes. Dans le cas de la ville de Stuttgart, en Allemagne, un couloir de ventilation naturelle dans le centre-ville (situé dans un bassin d'une vallée) a été bloqué par un immense bâtiment transversal, qui a causé la propagation du gaz d'échappement, de la poussière et des inversions. Des immeubles de grandes hauteurs situés présomptueusement, créant ainsi des turbulences au niveau du sol. Les piétons ne pouvaient plus rester en bas, et la santé des personnes souffrant des maladies cardiovasculaires était mise en danger.

En Suède, il était nécessaire de construire un accès souterrain dans une tour afin de protéger les occupants, et en particulier les personnes âgées et leur permettre d'accéder à leurs appartements. En Grande-Bretagne, des turbulences pareilles ont causé la mort d'un individu.

Toujours cité par Frommes, dans la ville d'Emmertsgrund (Allemagne), une nouvelle ville de 73 ha de superficie et d'une densité de 420 habitants par hectare était planifiée sur les versants de cette région. Une telle densité n'était possible qu'avec une hauteur importante des bâtiments, conséquence, des rues étroites et moins d'espaces ouverts avec très peu de végétation.

Les bâtiments étaient situés le long d'un axe, appelés "l'axe de la vie urbaine », formant une muraille qui empêchait l'air frais nocturne de bondir en bas de la colline. La végétation ne représentait que moins de 1/16 de la superficie. Le reste des espaces ouverts était pavé en pierre ou en béton. Les bâtiments étaient de couleur foncée (capacité thermique maximale) conduisant ainsi, à l'accumulation de la chaleur pour un minimum d'ensoleillement. La température de surfaces des bâtiments atteignait 55°C, et 63°C.

Quant à Oke (1984), il soulignait que la climatologie urbaine peut devenir une science plus prédictive. Ses conclusions peuvent être d'une utilité directe pour la planification et la conception urbaine, alors que la réalité montre combien l'application des résultats de la climatologie urbaine à la

conception urbaine reste limitée. Ce dernier constat est repris par Golany invitant les concepteurs urbains à prendre leur responsabilité et à fournir des formes urbaines adaptatives basées sur l'étude du climat local. L'impact des formes urbaines sur le microclimat urbain ainsi que le potentiel des apports en énergies gratuites est néanmoins négligés dans l'étude de la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle des quartiers (Huang & al. 2010).

La climatologie seule ne peut être efficace que si elle est accompagnée par des connaissances en biologie, physiologie et en physique du bâtiment (Frommes, 1982), en 1976, le projet d'un grand bâtiment multifonctionnel (commerces, bureaux, appartements) a été développé à Zurich, en Suisse, par une équipe interdisciplinaire : architecte, climatologues, et ingénieur en construction et climatisation. On a pu éliminer complètement le recours à l'air conditionné grâce à un choix judicieux de la disposition et l'orientation des bâtiments, le choix des matériaux de construction, un bon dimensionnement du vitrage, etc. Une réduction significative de 50% était obtenue dans les coûts d'investissement et d'exploitation (50%).

L'intégration du climat urbain dans l'aménagement, l'urbanisme et l'architecture exige l'acquisition de certaines connaissances en climatologie, ainsi que, la maîtrise des différents phénomènes physiques qui correspondent à l'impact des formes urbaines sur le microclimat. Le présent ce chapitre expose quelques éléments de base de la climatologie urbaine, les différents processus radiatifs, énergétiques et dynamiques ainsi que l'impact des actions menées sur le climat.

1.2. Les méthodes de recherche en climatologie urbaine :

Dans le domaine général du climat urbain, il est nécessaire de développer le pouvoir prédictif de la climatologie urbaine. En effet, les relations doivent être établies sous forme de lois, de formules, règles, directives, modèles et autres techniques capables de produire des prévisions fiables ou d'estimations des conditions climatiques futures dans les sites urbains. Les méthodes employées sont présentées comme suit (OKE, 1984):

1.2.1. Méthodes empiriques :

D'une part, elles sont fondées sur des conditions réelles et d'autre part elles sont limitées à un endroit précis où les données ont été recueillies.

1.2.2. Les modèles physiques :

Utilisation des souffleries, des maquettes pour simuler des modèles d'ombre et de transfert de chaleur en utilisant une source lumineuse convenablement orientée. Le coût de ces études est considérablement élevé.

1.2.3. Les modèles numériques

Des modèles contrôlés au laboratoire, Ils donnent la possibilité d'exercer un contrôle sur toutes les données d'entrée souhaitées et de suivre leurs impacts.

Il est indispensable de valider ces modèles bien que, dans certains cas les données appropriées sont difficiles à évaluer dans le domaine standard de la climatologie ou inexistantes.

En règle générale le pouvoir prédictive de la climatologie urbaine ne peut être atteint qu'à travers une rigueur méthodologique, basée sur une détermination adéquate des surfaces urbaines et de leurs propriétés physiques, la maîtrise des différentes échelles, l'observation, l'interprétation et la modélisation.

Selon Oke (1984), à l'heure actuelle il n'y a pas des prescriptions ou des exigences pour caractériser une station d'observation en milieu urbain, ou des directives concernant l'exposition des instruments, ni pour aider à concevoir un réseau d'observation en milieu urbain. Sans une certaine forme de standardisation on ne peut pas comparer les données obtenues.

Il est clair que les meilleures connaissances en aérodynamique urbaine permettront des avancées dans les prédictions respectives de la diffusion des polluants, de l'amplification des phénomènes sonores, des déperditions énergétiques, du confort piétonnier des espaces extérieurs. Le problème principal est celui de la structure des flux correspondants à l'intérieur de cette zone délimitée par la canopée urbaine liée à la hauteur et à la densité des constructions et des obstacles naturels qui circonscrivent l'espace urbain (Peneau, 1995).

1.3. Phénomènes physiques à l'origine de la formation du climat urbain

1.3.1. Echelles d'analyse utilisées en climatologie urbaine :

Avant d'aborder la présentation des processus physiques à l'échelle des espaces extérieurs, il est nécessaire de préciser les différentes échelles d'analyse utilisées en climatologie urbaine. Ce concept d'échelle est très important pour la compréhension des interactions entre les éléments de surface et la couche atmosphérique adjacente.

Les géographes ont souligné cette importance primordiale, à la fois spatiale et temporelle, dans la compréhension des climats urbains (Grimmond, 2004). Les variations spatiotemporelles sont attribuées à un grand nombre de facteurs à savoir le bilan radiatif, la circulation atmosphérique et océanique, occupation du sol, relief, et autre. L'impact de chaque facteur dépend de l'échelle spatiale considérée.

Au niveau horizontal du sol, les surfaces présentent un patchwork d'éléments, tels que les jardins irrigués et les pelouses, les espaces verts non irrigués, et les zones revêtues ayant des caractéristiques radiatives, aérodynamiques, thermiques et hygrométrique contrastées. Ces différents éléments de surface ont des bilans énergétiques diversifiés qui génèrent des contrastes dans leurs caractéristiques, et conduisent à des échanges radiatifs et d'advection à petite échelle. Ces unités morphologiques fondamentales peuvent être regroupées hiérarchiquement. Les murs et les parties situées entre les bâtiments définissent le canyon urbain (UC). Ces canyons et les toits des bâtiments adjacents définissent les îlots, qui à leurs tours définissent les quartiers, et finalement la ville. La climatologie urbaine peut répondre à cette hétérogénéité et complexité, soit explicitement, en termes de

cartographie détaillée de la morphologie urbaine, ou dans l'interprétation des observations à des échelles combinées (Arnfield, 2003).

Les mouvements de l'atmosphère reflètent la répartition et la conversion des énergies. Commenant par le rayonnement solaire reçu en courte longueur d'onde Terre-atmosphère, puis convertie en chaleur. Energies potentielles et cinétiques dans les systèmes de circulation dont la taille est variable. Cette cascade d'énergies est traduite selon différentes échelles du climat. La définition de la taille de ces échelles génériques varie selon les auteurs. Oke (1978) a présenté quatre niveaux. La particularité de son analyse est que les différentes échelles climatiques sont imbriquées (figure 1.1). Il souligne que le macroclimat (climat d'échelle global) influe sur le microclimat (la plus petite échelle). Il indique également que la durée de leur impact et la variation de l'atmosphère sont différentes. Pour un niveau d'échelle élevé l'atmosphère variera plus lentement que pour un niveau réduit (Villery, 2010). Ainsi, le climat urbain est étudié selon différentes échelles horizontales et verticales (Oke, 2004, 1978) que nous définissons comme suit :

1.3.2. Echelle horizontale :

a. Micro échelle :

Au sein de chaque méso-climat, il y'a des variations sur des distances allant de quelques dizaines de mètres à cause des changements du type de sol, la végétation et d'aspect. La surface du terrain exerce un contrôle très important sur le flux d'air, températures, précipitations et l'humidité, plus particulièrement quelques milliers de mètres en bas de l'atmosphère. Le contrôle de l'impact des surfaces sur les écoulements d'air peut être d'origine anthropique ou naturel (Chandler, 1976). Les températures de surface et de l'air peuvent varier de plusieurs degrés à travers de très courtes distances, et même des millimètres. Elle s'étend sur une distance de moins d'un mètre à des centaines de mètres. En effet, à faible distance il peut être observé des différences de températures de quelques degrés et le flux d'air est également peut être perturbé par le moindre objet (figure 1.1).

b. L'échelle locale :

Elle représente l'échelle des stations météorologiques standards. Elle considère l'impact des éléments du site tels que la topographie et exclut les effets produits à l'échelle micro. Dans les zones urbaines, cela se traduit par la désignation du climat des quartiers avec des unités urbaines similaires (unité architecturale, couverture de la surface, taille et espacement des bâtiments, activité, etc.)

Le principe est d'allier les caractéristiques des effets microclimatiques découlant de la zone source proche du site (Schmid, 2002). Elle s'étend sur un à plusieurs kilomètres (10^2 à 5×10^4 m).

c. Méso-échelle :

Généralement elle s'étend sur des dizaines de kilomètres. Une seule station ne suffit pas pour représenter cette échelle. La méso-échelle (10^4 à 2×10^5 m) correspond à la zone influencée par la présence d'une agglomération.

d. L'échelle macroclimat (continentale):

Elle concerne les zones régionales. Leurs caractéristiques se répètent dans les latitudes largement similaires et les positions continentales. Elles établissent les attributs de premier ordre du climat d'une région, comme le régime saisonnier des températures et des précipitations. Parmi les définitions des grandes régions climatiques les plus indiquée est celle proposée par Koppen. Au sein de chaque climat régional il y'a des variations à méso-échelle d'un endroit à cause des contrôles climatiques exercés par la topographie locale, y compris l'altitude, la morphologie de surface, la proximité à une surface d'eau, etc. Les phénomènes météorologiques sont enregistrés à l'échelle de la planète sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres. En termes de temps, les évolutions considérées se produisent sur des durées de quelques jours à quelques semaines. Cette échelle est également appelée échelle synoptique.

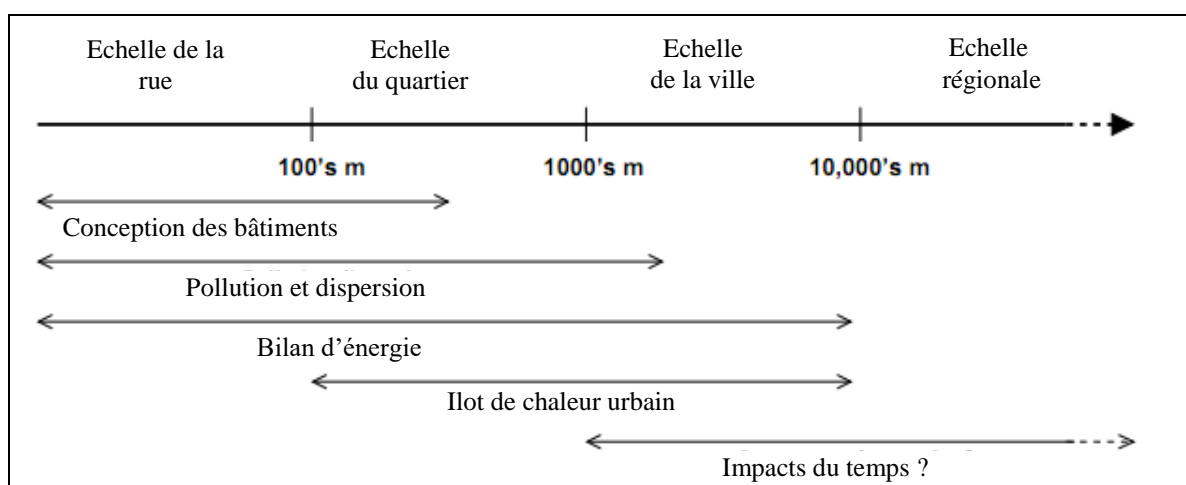


Figure 1.1. Schématisation de la relation des différents thèmes de la climatologie urbaine et leurs relations avec les échelles spatiales appropriées (D'après Harman, 2003).

L'importance relative des échelles climatiques dans la conception urbaine et architecturale varie selon les différentes échelles d'intervention (Tableau 1.1). Il est à signaler que les échelles d'intervention dans notre recherche englobent : l'échelle locale et la micro-échelle.

Tableau 1.1: Interdépendance entre les différentes échelles climatiques et leur incidence sur les actions d'aménagement et les projets construits.

	Macro-échelle (échelle régionale)	Echelle locale (y compris l'urbain)	Micro-échelle
Planification régionale	Dominant	Important	Moins important
Urbanisme	Important	Dominant	Important
Choix du site et étude du bâtiment	Important	Important	Dominant

1.3.3. Echelles verticales :

1.3.3.1. L'atmosphère urbaine :

L'étude de l'atmosphère en milieu urbain est très importante pour la compréhension des mécanismes de transport de la pollution d'origine anthropique, et les différents phénomènes liés à la présence de la ville et leurs influences sur le microclimat et le bien-être. Malgré le progrès scientifique dans ce domaine de recherche, ceux qui sont intéressés par la forme urbaine et les processus atmosphériques qui lui sont attachés, sont encore à la quête d'élucider les dimensions fondamentales associées à chacune de ces échelles, spatiales et temporelles (Grimmond, 2004).

1.3.3.2. La couche limite atmosphérique (CLA)

En météorologie, la couche limite atmosphérique (Chatelet & Lovat, 2015) est la partie de l'atmosphère qui est en contact avec la surface terrestre (sol, océan). Elle présente la partie inférieure qui subit l'influence directe des processus terrestres et dans laquelle que l'on rencontre, principalement, la plupart des échanges de température, de masse ou de quantités de mouvement. Elle se situe dans la troposphère, son extension verticale est très variable selon le type de surface, paramètres météorologiques (vent, température, humidité, insolation), l'heure, la saison, avec un ordre de grandeur de 500 m à 1500m. L'amplitude de cette extension va guider la dispersion des aérosols, notamment en milieu urbain dans le cas des polluants atmosphériques. Elle est composée de trois sous-couches :

- la sous-couche rugueuse : le vent est affecté par les éléments de surface.
- la sous-couche inertielle : le vent a un profil logarithme en conditions neutres.
- la couche d'Ekman : fortement influencée par l'effet de Coriolis, la surface de frottement et du gradient de température. Comme elle peut être influencé par le cisaillement.

Le transport de masse et de chaleur dans CLA est assuré par la vitesse moyenne longitudinale du vent et le phénomène d'advection. Dans cette partie de l'atmosphère il existe une stratification thermique qui peut être à l'origine d'une production d'énergie cinétique turbulente. La turbulence peut être d'origine dynamique, liée à l'action du vent sur le sol, ou thermique (phénomène convectif) liée au gradient de température ainsi que les variations du rayonnement solaire, diurne et nocturne, été et hiver (Vinçont, 1999).

1.3.3.3. Les particularités de la CLA urbaine

Au-dessus des agglomérations se développe « une couche urbaine » (urban boundary layer, dans la littérature anglaise) à cause de la rugosité des surfaces. Sa hauteur dépend des paramètres de surface, de l'extension de la ville et des conditions atmosphériques. En modifiant fortement les caractéristiques physiques de la surface (albédo, rugosité, imperméabilité, etc.), les zones urbanisées altèrent profondément les échanges de masse et d'énergie entre la surface et l'atmosphère et

contribuent ainsi à la création d'une nouvelle couche limite, plus compliquée que celle qui caractérise les zones naturelles (Najjar, 2007).

Cette couche se distingue de la couche limite de la planète par sa complexité due à des caractéristiques et processus particuliers (figure 1.2). La principale cause de perturbation au sein de l'environnement urbain est les bâtiments de formes et de hauteurs variables. Ils introduisent une grande quantité de surfaces verticales, des éléments à forte rugosité, des matériaux artificiels, et des surfaces imperméables. Elle commence au niveau des toits, sa partie inférieure est « La couche de surface » ; c'est une zone turbulente où les flux verticaux de chaleur et d'humidité sont quasi constants. Elle est surmontée d'une « couche mixte », l'humidité et la température potentielle tendent à demeurer constantes mais les advections horizontales sont importantes. A cause de la rugosité de la surface de fortes turbulences mécaniques locales sont produites à cause des bâtiments et cellules de convection d'intensité très variables au-dessus des ouvertures des groupements de maisons y rendent la diffusion horizontale de la chaleur ou des particules très complexes (Hufty, 2001). Cette dernière peut prendre la forme d'un dôme par vent faible (< 3 m.s⁻¹) ou d'un panache urbain par vent un peu plus fort (figure 1.3).

La spécificité de la CLA (Menut, 1979) urbaine peut être décrite en termes de différences avec la CLA rurale. Elles se présentent sous forme dynamique et thermique (tableau 1.2).

Tableau. 1.2 – Comparaison entre la couche limite atmosphérique dans le milieu urbain (U) et rural (r) (d'après Menut, 1979).

Paramètre	Urbain	Rural	Urbain/Rural
Vent moyen (jour)	$ U _{(u)} <$	$ U _{(r)}$	
Vent moyen (nuit)	$ U _{(u)} >$	$ U _{(r)}$	
Hauteur de rugosité dynamique	$z_{0m(u)} >$	$z_{0m(r)}$	10-20
Albédo	$A_{(u)} <$	$A_{(r)}$	0,7
Emissivité	$\epsilon_{(u)} <$	$\epsilon_{(r)}$	0,9
Température de surface	$T_s(u) >$	$T_s(r)$	1,25
Hauteur de rugosité thermique	$z_{0h(u)} >$	$z_{0h(r)}$	10-20
Flux de chaleur sensible	$Q_H(u) >$	$Q_H(r)$	1,2-2

La présence importante d'aérosols en milieu urbain tend à réduire le flux solaire incident, de l'ordre de 10 à 20 % (en fonction des sites d'études, selon Oke (1987). A ces différences, on ajoute des influences d'un milieu sur l'autre comme le 'panache urbain', qui entraîne les polluants en dehors de la ville, et peut soumettre des milieux ruraux environnants à une climatologie locale urbaine. Lorsque le vent est faible, une bulle d'air se forme, entretenue par des cellules convectives d'air chaud, il s'agit du dôme urbain.

L'hétérogénéité horizontale des quartiers, à l'échelle d'un kilomètre, avec parfois des transitions à travers de fortes rugosités et/ou de température, peut générer une série de couches limites internes. Leurs superpositions augmentent l'hétérogénéité de la basse couche atmosphérique. (Piringer & Joffre, 2005)

Lors de ses premières études, Oke (1978) a distingué deux couches atmosphériques différentes au-dessus des villes : la couche de canopée urbaine, qui correspond à la couche atmosphérique située

entre le sol et le niveau des toits, et la couche limite interne qui se superpose à la couche de canopée urbaine.

Ses études l'amènent à distinguer trois autres sous-couches (Oke, 2004) : la sous-couche rugueuse, la sous couche inertielle et la couche de mélange.

Selon Roth la couche limite urbaine (UBL) est la couche comprise entre le sol et le sommet de la couche limite. Portion de la couche limite atmosphérique dont les caractéristiques sont influencées par une zone urbaine. Phénomène agissant de l'échelle locale à l'échelle méso. Elle comprend toutes les autres couches (figure 1.2).

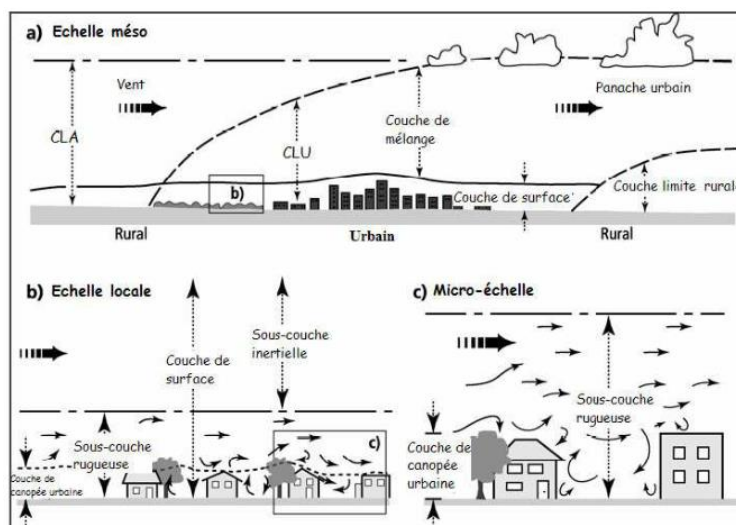


Figure 1.2 : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c) (d'après Oke, 1987).

1.3.3.4. La canopée urbaine (UCL – Urban Canopy Layer)

Zone comprise entre le sol et la hauteur moyenne des principaux éléments de rugosité (bâtiments et arbres), dans laquelle se déploie l'activité humaine et où se situe la plupart des sources de polluants et des récepteurs (hommes, végétations et matériaux). Elle est contenue dans la sous-couche rugueuse, où l'écoulement est perturbé par l'interaction des sillages créés par les éléments rugueux plus ou moins hauts (Leroyer, 2006).

Son climat est déterminé par la nature de son environnement, notamment la géométrie urbaine et les matériaux.

La couche de canopée (UCL) est composée des rues et diverses dispositions de bâtiments de différentes hauteurs, de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres (échelle microclimat). Le réseau de rues induit une canalisation partielle du flux au niveau inférieur, alors que les éléments de forte rugosité induisent l'apparition d'une sous-couche rugueuse épaisse au-dessus d'UCL (Piringer et Joffre, 2005).

Elle est extrêmement fractionnée par la présence des bâtiments. Elle est plus prononcée dans les zones très denses, et discontinues dans les zones suburbaines, comme elle subit les plus fortes

transformations climatiques, puisqu'elle est en contact étroit avec les éléments urbains. Elle est influencée non seulement au niveau bas (par les éléments qui constituent le sol), mais aussi latéralement par les murs des bâtiments (Najjar & al.2005).

1.3.3.5. La sous-couche de rugosité (RSL – Roughness Sub-layer) :

Également appelée couche de transition, couche inter-faciale ou couche de sillage ; Comprend UCL. Mécaniquement et thermiquement influencé par des longueurs scalaires, associés à la rugosité. De hauteur Z_0 , avec une extension plus importante que pour les couches limites classiques, occupent les premières dizaines/centaines de mètres au-dessus de la surface (Pringer & joffre, 2005).

1.3.3.6. La sous-couche inertielle (CFL) :

Egalement appelée couche de flux constant CFL. On en sait très peu sur cette couche dans les zones urbaines, probablement à cause des hauteurs limitées des tours de mesure qui ne peuvent pas aller jusqu'à la sous-couche inertielle. Elle est située au-dessus de la sous-couche rugueuse et s'étend jusqu'au sommet de la couche de surface. Les flux turbulents verticaux sont approximativement constants avec la hauteur (Piringer & Joffre, 2005).

Dans des conditions instables, il est possible que, la profondeur du RSL dépasse la profondeur de la LFC et aucune couche de ce type n'existe. Ainsi, le problème qui se pose au-dessus des villes est que la sous-couche inertielle peut être très réduite voire même inexistante dans certaines conditions (Leroyer, 2006).

1.3.3.7. La couche de mélange (ML) :

Les propriétés de turbulence sont probablement indépendantes de la rugosité de surface. Elle est surmontée d'une couche qui peut être importante en raison d'un couplage amélioré entre les deux surfaces urbaines, rugueuses et chaudes et la ML, ainsi que la grande disponibilité relative d'énergie cinétique turbulente (TKE).

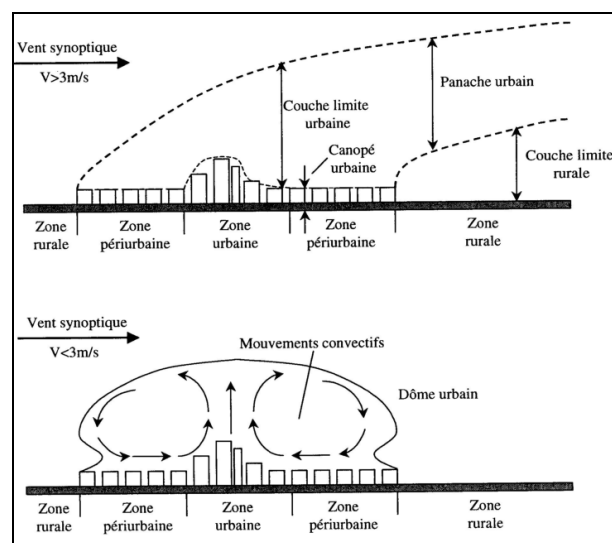


Figure 1.3 La structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vitesses supérieures et inférieures à 3m/s (d'après Mestayer & Anquetin, 1995)

1.4. Les paramètres de rugosité urbaine :

Dans un milieu urbain chaque mur, chaque surface crée un microclimat qui se fait sentir sur une certaine distance créant ainsi une variabilité spatiale des paramètres. Cette variabilité spatiale persiste au-dessus du niveau moyen des toits jusqu'à une certaine altitude, où la turbulence atteint une situation normale.

Dans les villes les échanges verticaux de mouvement, de chaleur et de l'humidité se produisent dans la canopée urbaine (UCL) (Figure 1.4) et non pas au niveau d'une surface plane (le cas des zones rurales).

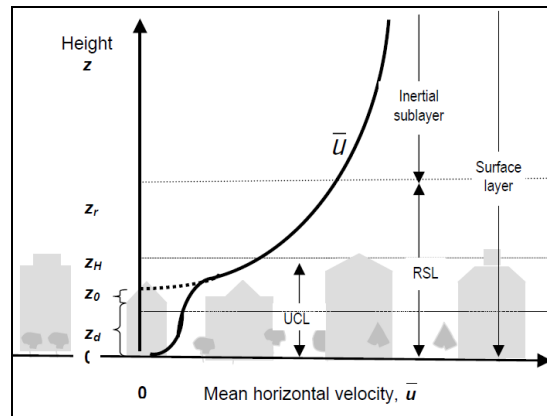


Figure 1.4 Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain, d'après (Oke,2006).

Les effets du microclimat des surfaces individuelles et obstacles persistent à courte distance par rapport à leur source, ensuite ils sont mélangés et atténués par des tourbillons turbulents. La distance avant que l'effet soit obstrué dépend de l'ampleur de l'effet de la vitesse du vent et de la stabilité de la CLA (stable, neutre ou instable). Ce mélange se produit selon les deux plans horizontal et vertical. Les effets horizontaux peuvent persister jusqu'à quelques centaines de mètres. Sur le plan vertical, les effets des caractéristiques individuelles sont discernables dans la sous-couche de rugosité (RSL), qui s'étend à partir du niveau du sol jusqu'à la hauteur de mélange Z_r , où l'action de mélange est complète. Des estimations en règle générale et des mesures sur terrain indiquent que Z_r peut être moins de $1.5z_H$ (Z_H est la hauteur de la canopée urbaine) dans un site dense et homogène, et supérieure à $4Z_H$ dans un site éclaté. (Grimmond & Oke, 1999; Rotach, 1999).

La rugosité aérodynamique des villes est exprimée par la longueur de rugosité Z_0 , et la hauteur de déplacement Z_d , elle dépasse pratiquement tous les éléments contenus dans les zones rurales. Ces paramètres sont essentiels pour la compréhension des processus qui se produisent dans les couches atmosphériques urbaines (traînée de surface, contrainte de cisaillement, profil du vent et caractéristiques de la turbulence), ainsi que les phénomènes climatiques urbains comme le cisaillement, les mouvements verticaux induits, la profondeur de la couche limite urbaine et dispersion des polluants au-dessus de la canopée urbaine (Arfield, 2003).

Selon Grimond et Oke (1999), deux approches sont disponibles pour évaluer Z_d et Z_0 : l'approche morphologique (géométrique) reliée aux caractéristiques aérodynamiques des surfaces, et l'approche météorologique basée sur les observations météorologiques.

Bien que les méthodes morphologiques soient plus faciles à utiliser, elles ont l'inconvénient de se baser sur des relations empiriques issues de souffleries où les éléments de rugosité sont simples et le flux d'air est constant et régulier. Ces conditions se différencient de celles de la ville où le vent change fréquemment en vitesse et direction, et les éléments de rugosité (Bâtiment et arbres) sont irréguliers.

Les méthodes météorologiques peuvent être appliquées pour tous les types de surfaces et à n'importe quelle vitesse du vent. Leurs inconvénients résident dans le coût et les difficultés dans l'installation des tours (stations) de mesures dans les villes.

La formulation morphologique la plus simple consiste à évaluer Z_d et Z_0 en fonction de la hauteur moyenne de la canopée Z_H (figure 1.5).

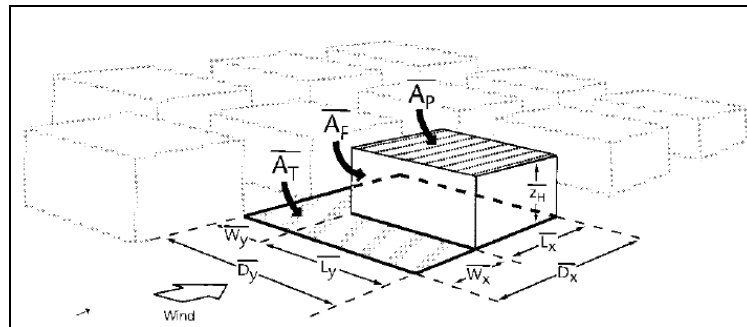


Figure 1.5 Caractéristiques de surfaces pour une morphologie urbaine régulière en blocs (Grimmond & Oke 1999).

$$\begin{cases} Z_d = f_d Z_H \\ Z_0 = f_0 Z_H \end{cases} \quad (\text{eq.1.1})$$

f_d et f_0 sont des coefficients empiriques où $f_d \sim 0,7$ et $f_0 \sim 0,1$ (Grimmond & Oke 1999)

Une autre expression est développée par Lettou (1969) où Z_0 et Z_d peuvent être évalués comme suit :

$$Z_0 = H_b (S/S1) \quad (\text{eq.1.2})$$

où :

H_b : hauteur moyenne des bâtiments, S : Surface verticale construite (en profil), $S1$: Surface moyenne d'un lot (Surface de l'îlot divisée par le nombre "n" des éléments rugueux dans l'îlot)

$$Z_d = Z_0 x - (H_b + Z_0) \\ x \ln x = 0.1 (H_b)^2 / (Z_0)^2$$

Comme ils existent des tableaux de paramétrage de Z_d et Z_0 qui utilisent les paramètres $\lambda_p = A_p/A_T$ et $\lambda_f = A_f/A_T$.

A_p est la surface des bâtiments projetée sur le sol et A_f est la surface frontale des bâtiments exposés au vent et A_T est la surface totale de l'étude.

Quant aux études expérimentales, Rooney (2001) a fourni un exemple sur la détermination de ces paramètres pour Birmingham, Royaume-Uni. Grimmond et al (1998) les ont évalués grâce aux anémomètres pour quatre zones suburbaines dans les villes nord-américaines. Les problèmes particuliers associés à ces mesures dans l'environnement urbain créent des difficultés pour de nombreuses méthodes classiques, et aucune conclusion n'a pu être atteinte. Des techniques ont été

proposées pour estimer ces paramètres critiques à partir des propriétés géométriques des constructions. Ces valeurs peuvent être obtenues à partir des tableaux des valeurs typiques (tableau 1.3).

Tableau 1.3 : Valeurs typiques de rugosité et autres propriétés aérodynamiques des zones urbaines homogènes ordonnées selon la hauteur et la densité (d'après Grimmond & Oke, 1999).

Forme de la surface urbaine	$\overline{Z_H}$ (m)	$\overline{Z_d}$ (m)	$\overline{Z_0}$ (m)
Hauteur et densité faible : Résidentiel, maison individuelle, un à deux niveaux, jardin, petit arbre, Mixtes- maisons avec petites boutiques, petites industries, quelques arbres.	5-8	2-4	0.3-0.8
Densité moyenne et élevée Résidentiel- deux à trois niveaux mitoyens ou espacés, maisons semi attachées et des maisons en bande, rues larges, moins de cinq niveaux, Mixtes- maisons avec des magasins, industries légères et écoles.	7-14	3.5-8.0	0.7-1.5
Densité importante Résidentiel- mitoyen, six niveaux, blocs et rangées Equipements, centre-ville.	11-20	7-15	0.8-1.5
Les tours Bâtiments à plusieurs niveaux, en blocs denses et complexes	>20	>12	>2.0

1.5. Stations météorologiques :

Pour étudier le climat aux échelles fines, il est nécessaire d'aborder le milieu dans sa globalité et de définir l'influence des différents éléments de surface susceptibles de modifier la météorologie locale. Les approches de ces phénomènes à partir des réseaux météorologiques apportent des résultats trop approximatifs. En effet, les stations météorologiques sont disposées suivant une maille moyenne de 30 km et sont "plus représentatives du climat régional que du climat local et du microclimat" (Guyot, 1997). L'analyse des données des réseaux météorologiques pour déterminer le climat local ne permet pas d'évaluer l'influence des caractéristiques de surface sur les variables atmosphériques (sauf si la station est disposée à proximité). Cela engendre une source d'incertitude importante ne permettant pas de répondre à des problématiques de climatologie à des échelles fines (Fichet et & Quénol, 2007).

1.6. La turbulence dans la couche urbaine :

Les injections de chaleur et d'humidité dans l'atmosphère et la forte capacité thermique des matériaux ont une grande influence sur le bilan énergétique. Ce changement produira la convergence du vent horizontal et des mouvements verticaux du vent chaud au-dessus de la ville, augmentant ainsi la couche de mélange.

Dans la canopée urbaine l'écoulement est très influencé par les bâtiments. Dans la couche rugueuse l'écoulement s'ajuste à ces obstacles. Cet effet disparaît dans la couche inertielle (Tableau 1.4).

Les recherches antérieures sur la turbulence étaient basées beaucoup plus sur l'évaluation du phénomène au-dessus d'une surface lisse et homogène. Etant donnée, la majorité des surfaces au-dessous de la couche limite urbaine sont rugueuses (Roth, 2000) actuellement, plusieurs recherches

se sont concentrées sur l'étude des interactions entre l'atmosphère et les surfaces complexes. Bien que cet axe ne fût pas universel, plusieurs chercheurs ont comparé les spectres de turbulence dans les zones urbaines et suburbaines avec ceux dans les zones rurales. Un examen complet et perceptif de la turbulence dans l'atmosphère urbaine est fourni par Roth (2000).

Tableau 1.4 : La turbulence selon les différentes échelles urbaines.

Echelle régionale (100-200km)	affectée par la zone urbaine ; Ilot de chaleur urbain, précipitations, panache de polluant, ...
Ville (10 -20 km)	affectée par l'allure moyenne des bâtiments ; Dispersion autour d'un ou groupe de bâtiments, canopée urbaine, large obstacle, chaleur et humidité provoqué par l'activité humaine.
Quartier (1-2km)	Etude du transport de polluants dans la canopée ; vent locaux (différent d'un quartier à l'autre en fonction l'agencement et la hauteur des bâtiments).
Rue (100-200m)	étude de l'écoulement dans la géométrie de la rue (prise en compte des bâtiments, rue, intersections...).Brise de pente, échelle du piéton, turbulence,

1.6.1. Ecoulement d'air à l'échelle d'un quartier :

Dans cette échelle il est important d'étudier l'écoulement dans la canopée urbaine. La couche limite rugueuse dans laquelle l'écoulement est spatialement hétérogène selon le sens horizontal (à cause des obstacles), s'étend jusqu'à Zr.

A cause de la forte rugosité, le contact de la grande vitesse d'écoulement avec les obstacles provoque une grande force de traînée sur les premiers éléments de rugosité rencontrés, et une divergence de l'écoulement. Après, l'écoulement de l'air se ralentit pour s'équilibrer avec la vitesse au-dessus de la canopée urbaine.

1.6.2. Ecoulement d'air à l'échelle d'une rue d'un bâtiment (A l'échelle du canyon urbain)

Le canyon urbain peut être considéré comme une juxtaposition de surfaces verticales (les murs) et horizontales (la rue) avec différentes orientations. Chacune de ces surfaces, tout en interagissant avec les autres, possède des bilans radiatifs et d'énergie caractérisés par une temporalité et une amplitude propre. Cette variabilité spatiale intra canyon et son évolution diurne dictée par la géométrie, sont à l'origine de la création d'une dynamique microclimatique interne propre au canyon (Najjar, 2007).

L'écoulement dans la rue est assimilé à un écoulement cisailé dans une cavité rectangulaire.

Lorsque le vent dominant s'écoule autour des bâtiments perpendiculairement à une des façades, différentes zones perturbées peuvent être distinguées sur la façade au vent, une zone de surpression, sur les côtés et la partie supérieure un décollement et une couche limite turbulente, sur la façade sous le vent, une zone de dépression turbulente.

Pour un obstacle isolé en site homogène trois zones principales d'écoulement perturbé sont définies : La zone de recirculation frontale, la zone morte ou bulle de sillage et la zone de sillage perturbé (figure 1.6).

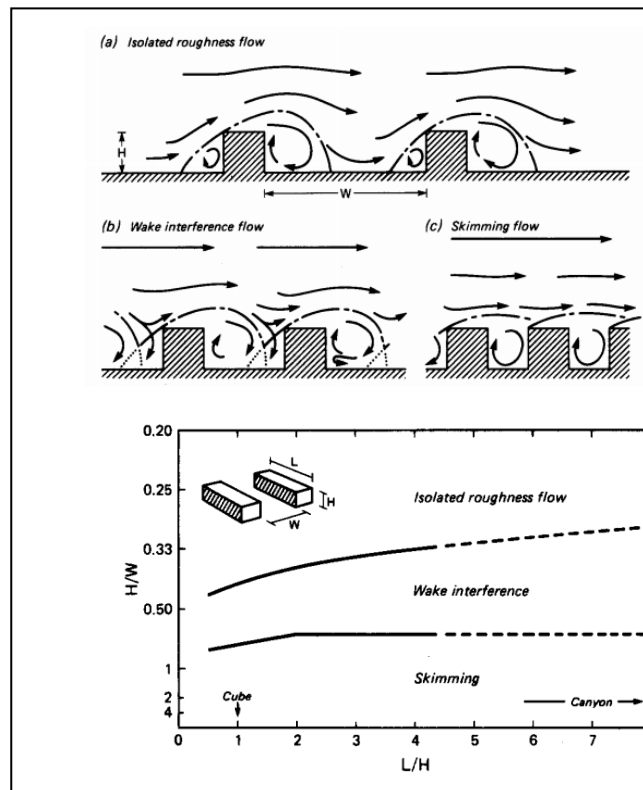


Figure 1.6 : Seuil divisant l'écoulement en trois régimes en fonction de la forme du bâtiment (L/H) et la distance du prospect (H/W) (D'après Oke, 88).

Description de l'écoulement dans une rue :

- Ecoulement à rugosité isolée.
- Ecoulement à interférence de sillage.
- Ecoulement rasant.

Pour les rues type canyon de hauteur « H » et de longueur « L », le rapport d'aspect « H/L » traduit la rugosité du site et permet de prévoir ces différents écoulements dans le cas d'un vent transversal dans la rue (Oke, 86).

Cette approche est valable pour les géométries types canyon et ne permet pas de définir les écoulements pour les autres formes urbaines. D'autres méthodes empiriques ont été développées pour les autres formes urbaines (Hasker, 1984 ; Paradijk et al). Cependant, ces modèles empiriques ne tiennent pas compte des perturbations thermiques. En outre, des approches CFD sont aussi parfois utilisées bien que difficiles à employer (URBAT, 2004).

1.7. Système énergétique et transfert de masse :

1.7.1. Le bilan d'énergie urbain :

1.7.1.1. Modification du bilan radiatif de la ville

Le climat urbain résulte des échanges d'énergie (radiatifs, thermiques et hydriques) entre les surfaces et l'atmosphère, ainsi que des interactions aérodynamiques entre la canopée et l'atmosphère. Le premier objectif des modèles urbains de bilan énergétique des surfaces, est de déterminer les flux de

chaleur et d'humidité qui vont conditionner le comportement thermo-dynamique de l'atmosphère urbaine, à des échelles pouvant aller d'une centaine de mètres à quelques kilomètres.

En effet, l'étude du climat à l'échelle de la ville, ou à plus grande échelle, nécessite donc de représenter certaines spécificités du milieu urbain qui vont avoir une influence sur le vent, la température et l'humidité de l'air, tel que : la morphologie urbaine, la présence de surfaces imperméables, la prédominance des surfaces bâties par rapport aux surfaces naturelles, les propriétés physiques des surfaces (albédo, émissivité) et des matériaux (conductivité et capacité thermiques).

En effet, le bilan radiatif d'une surface exprime la quantité de rayonnement absorbée par cette surface et la quantité de rayonnement émise vers l'atmosphère. Il peut s'écrire de la façon suivante :

$$Q^* = L_{\downarrow} - L_{\uparrow} + (1 - \alpha) K_{\downarrow} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (\text{eq.1.3})$$

Où

α est l'albédo du sol,

L_{\uparrow} le rayonnement de grande longueur d'onde émis,

L_{\downarrow} le rayonnement atmosphérique descendant,

K_{\downarrow} le rayonnement solaire global reçu sur une surface horizontale,

Et Q^* le rayonnement net.

- Rayonnement net (Q^*)

Le flux radiatif net (Q^*) inclut le rayonnement net de courtes longueurs d'onde (Flux incident, flux réfléchis) et le rayonnement de grandes longueurs (L_{\downarrow}). La surface du sol reçoit une certaine quantité de rayonnement descendant du domaine infrarouge L_{\downarrow} , émis par les éléments présents dans l'atmosphère (air, vapeur d'eau, gaz carbonique, nuage, aérosols, etc.).

- Rayonnement thermique ascendant (L_{\uparrow})

La paroi considérée émet un rayonnement de grande longueur d'onde L_{\uparrow} (domaine infrarouge) qui dépend de deux éléments intrinsèques de la surface : Sa température et son émissivité. En milieu urbain, les matériaux ont de manière générale des températures de surface plus élevées que les matériaux naturels voisins, ainsi le rayonnement thermique ascendant est plus important en zone urbaine, particulièrement en milieu de journée, quand les matériaux ont eu le temps de se réchauffer.

Le flux radiatif de longue longueur d'onde dépend également de la température et de l'émissivité des surfaces environnantes (ciels inclus) et de leur rapport de vue par rapport à la surface considérée (Musy, 2004).

- Rayonnement solaire incident (K_{\downarrow}) :

Le rayonnement solaire (rayonnement visible et proche infrarouge) subit lors de son passage à travers les couches atmosphériques une double atténuation due aux phénomènes d'absorption et de diffusion.

La vapeur d'eau agit principalement sur l'absorption et les aérosols présents dans les basses couches de l'atmosphère agissent à la fois sur l'absorption et la diffusion. Au passage des nuages, le rayonnement solaire subit une absorption relativement faible dans l'infrarouge et une très forte diffusion de toutes les longueurs d'onde (Sacré, 1983).

Le rayonnement solaire incident est évalué à partir de données macro-climatiques d'ensoleillement global, direct et diffus. Ces données sont obtenues soit à partir des formules de calcul nécessitant la connaissance de la latitude et la déclinaison, l'heure en temps solaire vrai (T.S.V) et des connaissances sur la fraction d'ensoleillement ou la nébulosité et le trouble atmosphérique ; les données géométriques du lieu permettent de déterminer les zones recevant le rayonnement direct et le pourcentage du diffus reçu sur chaque élément de surface à toute heure de la journée.

Rayonnement solaire réfléchi (αK_{\downarrow})

Le rayonnement solaire réfléchi (αK_{\downarrow}) est donné par l'albédo de la zone urbaine (α) qui dépend à la fois de la géométrie du cadre bâti et des matériaux de construction.

1.7.2. Le bilan d'énergie des surfaces urbaines :

Le bilan énergétique exprime l'équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente (issu du bilan hydrique), le flux de chaleur sensible (convection au niveau des surfaces) et le flux de chaleur par conduction dans les sols et à travers l'enveloppe des bâtiments (stockage).

Les modèles de bilan énergétique des surfaces sont à base empirique ou à base physique s'appuyant sur un principe commun : le rayonnement net qui résulte du bilan radiatif des surfaces est réparti en flux de chaleur sensible et latente, et en flux de chaleur stockée qui traduit les échanges de chaleur par conduction dans les matériaux et le sol (URBAT, 2004) L'apport d'énergie provient initialement du soleil (K_{\downarrow}) et l'atmosphère (L_{\downarrow}) et des rejets de chaleur dus aux processus anthropiques de combustion, de métabolisme et de rejets thermiques (QF). Ces trois termes sont à l'origine de processus radiatifs et de flux de chaleurs sensible et latente. Ces transferts de chaleur se produisent selon trois manières : par conduction au sein des matériaux, par convection et par rayonnement (de grandes longueurs d'onde).

Le bilan d'énergie d'une surface s'écrit comme suit :

$$Q^* = QH + QE + QG \quad (\text{eq.1.4})$$

Où : Q^* est le rayonnement net, QH et QE Flux de chaleur sensible et latent respectivement, et QG flux de chaleur par conduction du matériau qui constitue la surface

- Le flux turbulent de chaleur sensible (QH) :

Ce flux varie en fonction de la température de surface, de la température de l'air à proximité de la surface et d'un coefficient d'échange surfacique. La rugosité de la surface peut également être un paramètre à prendre en compte.

- Le flux turbulent de chaleur latente :

Le flux de chaleur latente dépend de la différence entre le contenu en eau de la surface et l'humidité spécifique de l'air à proximité de la surface.

- Le flux conductif :

Le flux conductif dépend de la température de surface, de la nature des matériaux à savoir leurs caractéristiques thermiques (conductivité thermique, capacité calorifique et la masse volumique (Musy, 2004).

Le comportement QG d'une surface simple peut être évaluée en utilisant un capteur de flux de chaleur ou en mesurant le taux de la durée de changement de température si la capacité calorifique du substrat est connue (Arnfield, 2003).

Les effets du climat urbain sont dus à des modifications dans les échanges de chaleur de masse et la quantité du mouvement due à l'urbanisation. Selon Oke (Oke 1988) dans les villes, ces effets sont fortement liés aux échanges de surface/atmosphère et leur variabilité spatiale, et proposa d'évaluer l'équivalent de cet énergie au sommet d'un volume imaginaire (Figure 1.7).

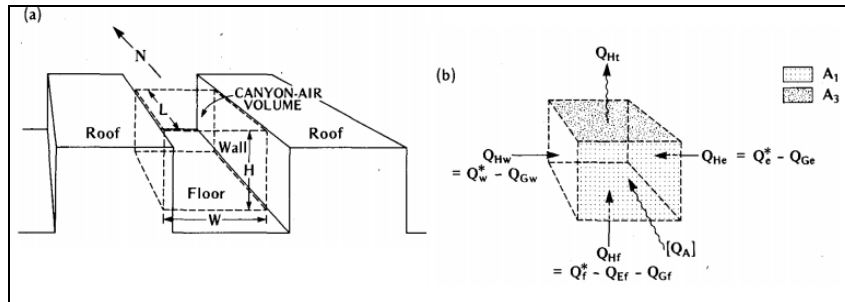


Figure 1.7 : L'équivalent de l'énergie au sommet d'un volume imaginaire (D'après Nunez & Oke, 1977).

L'équation du bilan d'énergie de ce volume s'écrit comme suit:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (W.m^{-2}) \quad (eq.1.5)$$

Où

Q^* est le rayonnement net, Q_F le flux de chaleur anthropique produit par les processus de combustion, de métabolisme et de rejets thermiques (industries, transports, habitats, etc.), Q_H le flux turbulent de chaleur sensible, (l'énergie qui chauffe l'air). Q_E le flux turbulent de chaleur latente, (l'énergie repris / libéré avec le changement de phase de l'eau, soit avec l'évaporation et la condensation), ΔQ_S la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine (l'énergie qui chauffe et est stockée dans le tissu urbain), ΔQ_A le flux de chaleur advectif (transport horizontal, mouvement latéral de l'énergie dans ou hors la zone).

Il est à noter que, dans certains modèles, la valeur de Q_F est implicitement incluse. Par exemple, les modèles de simulation du bilan énergétique de Terjung et Louie (1974), Mills (1993) et Arnfield (2000b) ont incorporé des températures internes constantes qui reflètent la contribution de l'énergie d'origine anthropique dans le chauffage et le refroidissement des espaces de vie. Comme on peut l'estimer à partir d'une équation qui présente la somme de l'ensemble des sources dégageant de la chaleur :

$$Q_f = Q_v + Q_b + Q_m \quad (eq.1.6)$$

Q_v est la chaleur émise par les véhicules, Q_b la chaleur émise par les sources fixes (bâtiments et industries) et Q_m la chaleur émise par le métabolisme des êtres vivants. D'une manière générale, les flux de chaleur d'origine anthropique varient selon la localisation de la ville, le moment de la journée et les jours de la semaine, et aussi selon la saison car ils sont généralement plus importants en hiver qu'en été (Greuillet & Galsomiès, 2013).

Asaeda et Ca (1993) ont développé un modèle numérique pour étudier le rôle de transport de chaleur et d'humidité à la fois dans le sol exposé et le sol couvert par l'asphalte et le béton. L'étanchéité du sol par la couche imperméable a réduit l'évaporation, conduisant à l'augmentation des températures de surface et un mouvement ascendant du QH même pendant la nuit. L'accroissement de la profondeur de la couche a augmenté QG pendant la journée et a produit une régression de chaleur pendant la nuit (Arnfield, 2003).

1.7.3. Les modèles de bilan énergétique :

Si la représentation des phénomènes physiques urbains est relativement permise, celle des multiples interactions entre eux l'est moins. Cependant, les processus physiques (thermique, aérodynamique, hydrologie, rayonnement, etc.) impliqués dans le microclimat urbain et le comportement thermique des bâtiments ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres (Musy, 2012).

Les premiers modèles qui permettaient de simuler l'absorption des rayonnements de grandes longueurs d'onde par les tissus urbains et leur dissipation par convection, conduction, évaporation sont ceux de Terjung et al (1974). Malgré que les températures des surfaces obtenues dans des conditions climatiques calmes, ciel clair étaient proches des résultats expérimentaux, ces modèles ne tenaient pas compte des fluctuations de la température de l'air (Arnfield, 2003).

Grimmond et al, (1991) ont formulé le modèle « OHM » (*objective hysteresis model*) qui permet de prédire le flux de chaleur stocké par les surfaces urbaines, ce modèle était utilisé pour des surfaces type élémentaires, par Arnfield ainsi que sur des rues canyons.

Dans les données d'entrées (inputs), le modèle requière uniquement les types de revêtement et le rayonnement net global, comme il peut être amélioré pour inclure les émissions de chaleur d'origine anthropique, la forme en trois dimensions de la surface, et permettre des changements dans les sources des zones. Oke et al. (1992) et Grimmond (1992), en utilisant une base de données très détaillée des types de surfaces locales en trois dimensions, qui ont été échantillonnées dynamiquement pour fournir des coefficients de pondération appropriés pour le flux turbulent de la zone source.

Masson a proposé un modèle de bilan urbain surface-atmosphère à méso échelle (TEB) qui considère trois types de surfaces : Les toits, les murs et les routes (URBAT, 2004).

Le schéma de ville TEB permet de simuler les flux turbulents de surface en milieu urbain et peut contribuer à paramétrer une partie de la surface d'un modèle atmosphérique de méso- échelle. Il permet de paramétrer les échanges d'énergie et les échanges en eau (vapeur d'eau et neige inclus) entre les surfaces bâties et l'atmosphère. TEB peut fonctionner en parallèle avec le schéma ISBA (pour Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère), pour les espaces naturels, et des modules pour l'eau et la mer. L'ensemble compose le logiciel SURFEX. TEB simplifie considérablement la morphologie urbaine, il considère le milieu urbain comme un groupe de rues identiques où toutes les directions sont équiprobables (figure 1.8). Trois types de surfaces sont définies (mur, route, toit) et pour chacune d'elles, est calculé un bilan d'énergie surfacique et deux bilans d'énergie peuvent être ajoutés en cas de neige sur les toits et les routes (Colombert, 2006).

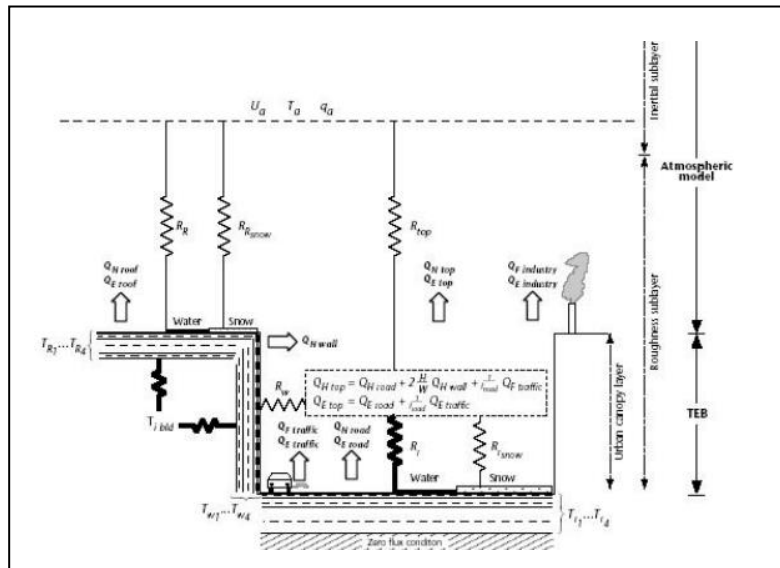


Figure 1.8: Les résistances aérodynamiques, les flux de chaleurs sensibles et latentes et les paramètres climatiques intervenant au sein du schéma TEB (Masson et al., 2002).

U_a est la vitesse du vent au premier niveau atmosphérique, T_a est la température de l'air, q_a est l'humidité de l'air (U_a , T_a et q_a sont imposés à une altitude référence fixée par l'utilisateur), Q_H est le flux de chaleur sensible, Q_E est le flux de chaleur latente, R est la résistance aérodynamique utilisée pour les échanges.

1.7.4. Les modèles d'énergie développés à l'échelle du fragment urbain

Parmi ces modèles, il y'a ceux qui calculent les flux solaires dans des géométries urbaines complexes : RayMan , SOLENE , SOLWEIG (Musy & al, 2012) . Ils permettent l'évaluation de la température moyenne radiante qui présente un bon indice du niveau du confort extérieur. Cependant, le modèle SOLWEIG s'affranchit du bilan thermique des parois en approxinant les températures de surfaces à partir de la température d'air et en fonction de l'exposition au soleil de la surface considérée. Ce modèle prend donc principalement en charge les phénomènes radiatifs et paramétrer les autres.

Comme il y'a un autre groupe de modèles qui permettent de calculer les différents bilans de masse, de chaleur et de quantité de mouvement, tel qu'ENVI-met, SOLENE-microclimat et « Couple de simulation ». Parallèlement, ils calculent les flux radiatifs, les températures de surface, le champ de vitesse du vent, le taux d'humidité et la température de l'air dans des géométries urbaines très complexes et en présence de végétation. Cette dernière est représentée sous forme d'un milieu poreux au vent et semi-transparent par rapport au rayonnement solaire. Les processus d'évapotranspiration et de photosynthèse sont exprimés dans les bilans de masse et de chaleur (Musy, 2006).

Ces modèles semblent similaires dans les applications qu'ils permettent, et se différencient dans leur mise en œuvre. L'équipe de développement d'ENVI-met a adopté la mise en place d'un modèle

complet qui requière l'intégration des modèles pour tous les phénomènes. Cette approche laborieuse se fait au détriment de certains sous-modèles. Par exemple, le rayonnement de grande longueur d'onde est approximé à partir d'une température moyenne de toutes les parois et le stockage de chaleur dans les murs n'est pas pris en compte.

Par contre, les développeurs de Solène Micro-Aclimat ont opté pour un couplage d'outils. Robitu a réalisé un couplage fort entre Solène (pour les aspects radiatifs et thermiques dans les parois et le sol) et Fluent (pour les aspects aérauliques) afin d'évaluer le confort dans les espaces extérieurs. Ce couplage fort, lourd en temps de calcul, était acceptable car les problématiques de confort en espace extérieur ne nécessitent pas de longues périodes de simulation. Bouyer a pu étendre les périodes de simulation à quelques jours en plus, en allégeant ce couplage grâce à la prise en compte uniquement du transport et de la diffusion de masse et de chaleur dans l'air.

Selon Robitu (2005), les outils de simulation du microclimat se diffèrent en fonction de l'échelle étudiée (figure 1.9). On distingue alors des modèles à base physique tel que SM2-U, TEB ou le modèle semi empirique Lumps qui permettent de représenter les échanges entre les surfaces urbaines à méso-échelle. Des modèles, similairement à base physique tel qu'Envi-met et Solène mais qui fonctionnent le plus à une échelle plus petite telle que l'échelle d'un quartier ou d'une rue.

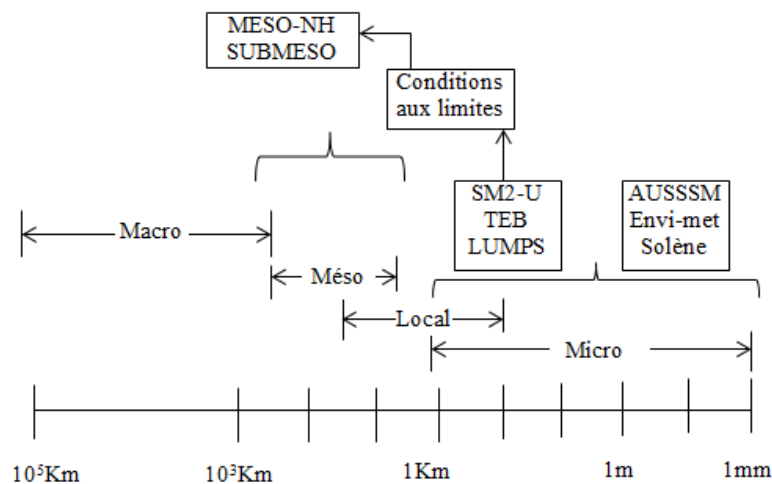


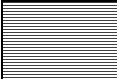
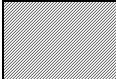

Figure 1.9 : Echelles spatiales et modèles de simulation correspondants (d'après Robitu,2005)

Le tableau 1.5 présente une comparaison entre les modèles : Envi-met, Solène, Narp-Lumps, TEB et FVM réalisée par Comlobert. D'après elle, ces modèles répondent le plus à la problématique de modélisation de la ville. TEB présente le modèle qui intègre le plus de paramètres. Cependant on trouve que seulement Solène et Envi-met qui peuvent donner une représentation fine du cadre bâti. La prise en compte de la végétation et le calcul du bilan hydrique est partielle dans Solène, alors qu'elle est entière dans Envi-met. Ainsi, le modèle numérique choisi pour ce travail est Envi-met. Il répond à nos besoins en termes de modélisation et à la finalité de notre étude.

Tableau 1.5 : Comparaison entre les modèles d'énergie (Colombert, 2008).

Paramètres	Envi-met	Solène	Narp-Lumps	SM2-U	TEB/ISBA (Surfex)	FVM
Représentation fine du cadre bâti						
Représentation entière de la ville						
Prise de compte de la végétation						
Prise en compte de flux de chaleur d'origine anthropique						
Prise en compte des caractéristiques des matériaux urbains						
Calcul du bilan d'énergie						
Calcul aérodynamique						
Calcul du bilan hydrique						
Microclimat au niveau de la rue						

Légende

	N'intègre pas ce critère		Intègre partiellement ce critère		Intègre ce critère
---	--------------------------	---	----------------------------------	---	--------------------

1.7.5. Modèles de bilan d'énergie à l'échelles des canyons urbains

Dans la climatologie urbaine peu de modèles empiriques qui ont traité le bilan d'énergie à l'échelle du canyon urbain. Les premières recherches, de Nunez et Oke (1977), portées sur un canyon orienté Nord-Sud ($AR = 0,86$) à Vancouver (Canada), ont montré que la synchronisation et l'ampleur des échanges d'énergie sur les différentes facettes différaient considérablement, selon le mode de réception et de perte de rayonnement, mais le bilan énergétique pour le système dans son ensemble est relativement souple et symétrique. Pendant le jour, le rayonnement net en haut du canyon est principalement dissipée en forme de flux de chaleur sensible vers l'UBL ci-dessus, avec $QH \approx 0.64Q^*$ à midi, la majorité du reste est dissipé vers le substrat. Le flux de chaleur latente provenant du sol du canyon et l'advection en profondeur sont d'autres composants secondaires du bilan. Pendant la nuit, QG et le rayonnement de longue longueur d'ondes s'équilibrent.

En revanche, la recherche de Yoshida et al. (1990-91) sur un canyon urbain (Kyoto, Japon), orienté Est-Ouest ($AR = 0,94$) a montré que pendant le jour, $QH \approx 0.35Q^*$ au sommet du canyon, alors que le reste est emmagasiné dans le tissu urbain.

Le modèle URBAN3 de Terjung et Louie (1974) a été largement utilisé dans les recherches sur le climat urbain. Ce modèle dépend de la structure des surfaces urbaines et des conditions météorologiques, il a contribué de manière significative à l'explication de la causalité des climats urbains. URBAN3 ne se limite pas au canyon, il simule le bilan d'énergie de tout le système urbain y compris les toits. Les flux de rayonnement sont traités théoriquement, en utilisant la géométrie de rayonnement et le concept du facteur de vue. Terjung et O'Rourke (1981) ont combiné ce modèle polyvalent avec le modèle « CANOPY » pour élucider le rôle de la photosynthèse et l'évaporation de la végétation au niveau de la rue et analyser la variation du bilan d'énergie, en fonction la structure de la ville. Les effets des rues, des parcs et des toits verts ont été comparés aux effets des structures non végétalisées pendant l'été et l'hiver et selon trois latitudes.

Le modèle CTTC (Cluster Thermal Time Constant) a été développé par Swaid et Hoffman (1989) où ils ont incorporé les effets des sources de chaleur anthropiques ainsi que les occultations dans le

contrôle du climat de la canopée urbaine. Une augmentation horaire de 55w/m^2 dans le bilan d'énergie était trouvée à cause du transport et l'utilisation de l'électricité. Les canyons orienté E/O ont contribué à une augmentation de 1 à 2.5K dans la température enregistrée à 20h. Cependant, ce modèle est soumis à un certain nombre d'hypothèses et contraintes physiques et se limite à des canyons dans des situations météorologiques particulières. Elnahas et Williamson (1997) ont amélioré ce modèle en élargissant son domaine d'utilisation pour comprendre d'autres conditions météorologiques. Les résultats obtenus du modèle semblent en bon accord avec ceux mesurés. Cependant, l'utilisation de certain nombre de paramétrage (tel que les coefficients d'échange, un modèle d'évapotranspiration, des multiplicateurs de vitesse du vent) peuvent limiter la généralisation de ce modèle (Arnfield, 2003).

Le schéma de Mills (1993) a combiné le modèle du vent de Nicholson, Le modèle du bilan radiatif du canyon de Arnfield et une nouvelle procédure pour évaluer le changement de température de l'air dans le canyon urbain. D'après Arnfield et Mills, le modèle a été trouvé satisfaisant pour prédire les températures de surface des facettes du canyon et le rayonnement net et de caractériser la forme du flux de chaleur sensible au sommet du canyon. Cependant, le mécanisme responsable de cet échange de chaleur (vortex) n'était pas apparent dans l'ensemble des données utilisées pour valider ce schéma (Arnfield & Mills, 1994). Les observations ont suggéré l'importance de l'advection en bas du canyon et la taille du flux au sommet du canyon.

1.8. Le bilan hydrique d'une surface:

Le bilan hydrique traduit les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux enterrés, les surfaces et l'atmosphère en période de temps de pluie ou en temps sec, et prend en compte la variabilité spatiale des caractéristiques de la surface du sol (imperméabilisation, présence de végétation), des propriétés hydrodynamiques des sols (perméabilité) et de la présence de réseaux enterrés qui constituent des lieux de drainage préférentiels dans le sol (Musy & al, 2012). Au flux d'évapotranspiration entre surface et atmosphère, correspond le flux de chaleur latente.

Le bilan d'eau urbaine s'écrit :

$$p + I = ET + D + \Delta S \quad (\text{eq.1.7})$$

où p la quantité des précipitations, I est l'adduction d'eau en ville, ET est l'évapotranspiration, D est assainissement, ΔS est le changement de stockage d'eau pendant une période donnée (Cleugh, 2012). Parmi les approches de modélisation du bilan hydrique urbain, deux approches se sont intéressées à l'évaluation de l'évapotranspiration comme :

1. SUES (Single-source Urban Evapo transpiration-interception Scheme, (Grimmond & Oke, 1991).
2. Aquacycle (Mitchell & al, 2001).

Aquacycle est un modèle continu qui représente les deux composants internes et externes du bilan : l'adduction d'eau ; l'eau pluviale et l'eau usée. SUES (Mitchell et al, 2007) est basé sur la simulation du bilan hydrique externe avec la composante d'eau introduite spécifiée. La rigueur de ce modèle réside dans la représentation de l'ET urbain comme une transition continue à partir de l'évaporation de la surface humide à l'évapotranspiration des surfaces partiellement sèches à la transpiration de la végétation urbaine. Ainsi, SUES représente non seulement l'ET urbain d'une manière bio-

physiquement raisonnable, mais aussi il représente la dynamique de l'interception et de l'évaporation à une échelle fine. SUES appréhende précisément le bilan énergétique urbain pour développer les simulations du bilan hydrique et pour établir un lien entre les effets du système d'eau sur les microclimats urbains et la consommation d'énergie.

Une simulation préliminaire de l'ET lors de l'application d'Aquacycle et SUES sur un bassin urbanisé à Canberra, en Australie a montré un accord adéquat entre les deux modèles et a montré qu'une brève description d'un système de logiciel intégré, tel que « Green scape Planner », facilite l'utilisation des modèles de bilan hydrique urbain et permet d'appuyer les propositions d'aménagement urbain (Mitchell & al.2008).

1.9. Evolution spatiale des paramètres climatiques :

L'influence d'une ville peut ainsi s'observer sur les paramètres climatiques suivants : la température, l'insolation, l'humidité, la pluviométrie et le vent.

1.9.1. Température et îlot de chaleur urbain :

La température de l'air dans une enceinte ombragée (mais bien ventilée) est connue sous le nom de la température ambiante, Elle est généralement exprimée en degrés Celsius (°C). La température sur un site donné dépend du vent ainsi que des facteurs locaux tels que l'ombrage, la présence de plans d'eau, l'exposition au soleil, etc.

La variation de la température de l'air dépend de la variation de la température de surface de la terre en contact avec l'air, selon la latitude, le moment de l'année, la quantité de nuages couvrant le ciel dans cette zone, et la topographie.

Selon Givoni (1998), la surface de la terre se chauffe en fonction du rayonnement solaire qui touche le sol sous forme de courtes longueurs d'ondes au cours de la journée. Tandis que la terre perd la chaleur sous forme de rayonnement en grande longueur d'onde vers le ciel selon un processus qui se déroule le jour et la nuit. Il est donc à considérer ce rayonnement en longues longueurs d'ondes parce qu'il présente le facteur le plus concerné par le processus de refroidissement à n'importe quelle région sur terre.

La manifestation la plus évidente du climat urbain est l'existence de l'îlot de chaleur urbain qui se traduit par une augmentation des températures en milieu urbain d'année en année et qui concorde avec l'intensification de l'urbanisation (URBAT, 2004).

Ce phénomène est connu depuis le 19ème siècle. Les observations sont généralement réalisées soit à partir de cartographies infrarouges télé-détectées, soit à partir de mesures issues de capteurs fixes disposés à des emplacements stratégiques (Claverie & al, 2011). Ces manifestations et ces causes ont fait l'objet d'une abondante littérature scientifique. Si la liste des processus responsables du phénomène est aujourd'hui bien établie, leur importance respective et leurs interactions restent d'autant plus difficiles à préciser à cause de l'interférence de l'effet de l'urbanisation avec d'autres facteurs environnementaux tels que la topographie, la végétation, la présence des surfaces d'eau (Charabi & al, 2002).

La pollution atmosphérique diminue le rayonnement solaire direct, augmente le rayonnement diffus et le rayonnement infra-rouge de l'atmosphère. Dans les espaces urbains, l'albédo de l'infra-rouge est inférieur à celui du visible. Ce phénomène s'explique par la forte absorption de l'infra-rouge par les

matériaux de construction. Deux conséquences en découlent : accumulation de chaleur dans les bâtiments (rythme diurne des températures décalé par rapport à la campagne, îlot de chaleur plus élevé la nuit grâce à la restitution de la chaleur emmagasinée pendant la journée) et température du substratum plus élevée dans le milieu urbain (Figure 1.10).

Pour élucider ce phénomène des mesures effectuées au centre-ville de Los Angeles ont montré une augmentation des températures maximales d'environ 2,5 °C entre 1920 et 1997 (Akbari et al. 2001). Cette évolution a conduit à l'observation d'îlots de chaleur urbains. En Californie, des relevés sur une trentaine de villes et des zones rurales environnantes (Akbari et coll. 2001) ont montré qu'avant 1940 les villes étaient plus froides, contrairement au phénomène actuel où la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la ville est de 2,5 °C en moyenne.

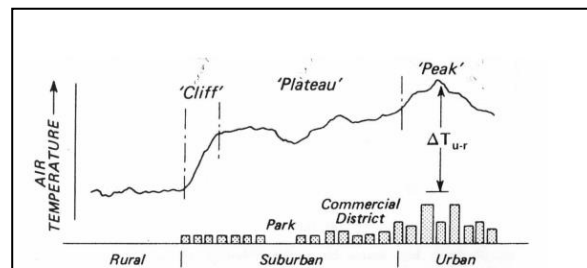


Figure 1.10 : Coupe d'un îlot de chaleur urbain (d'après Oke, 1978)

Dans la ville on peut distinguer trois îlots de chaleur :

- Les îlots de chaleur à la surface du sol : grâce à des lectures de rayons infrarouges émis et réfléchis par les surfaces, il est possible de déceler les endroits d'une ville où les surfaces sont les plus chaudes ;
- Les îlots de chaleur de la canopée urbaine, qui est la couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments, où l'essentiel de l'activité humaine se déroule ;
- Les îlots de chaleur de la couche limite urbaine, située au-dessus de la couche de la canopée. Les îlots de chaleur de la canopée urbaine et de la couche limite urbaine font référence à la température de l'air.

Rizwan et al. (2008) ont expliqué ce phénomène comme étant une réponse mutuelle de plusieurs facteurs dont certains sont contrôlables et d'autres incontrôlable. Ces derniers peuvent également être classés comme (Figure 1.11) :

- Des variables à effet temporaire, comme la vitesse du vent et la couverture nuageuse
- Des variables à effet permanent comme les espaces végétalisés, les matériaux des bâtiments et le facteur de vue du ciel.
- Des variables à effet cyclique comme le rayonnement solaire et les sources de chaleur anthropique (Rizwan et al., 2008).

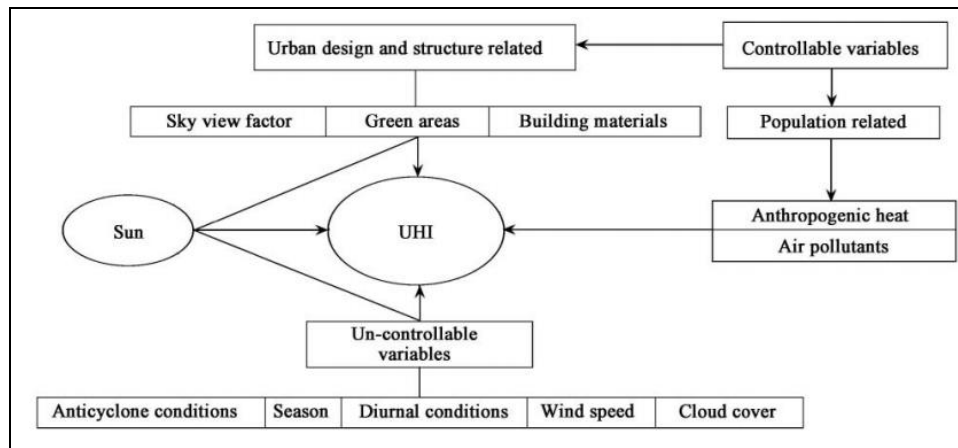


Figure 1.11 : Formation de l'îlot de chaleur urbain (D'après Rizwan et al. (2008)).

La figure 1.12 montre la répartition du bilan énergétique urbain, suburbain et rural dans une ville d'Europe centrale pendant l'été. On remarque que la quantité du flux de chaleur sensible Q_H est plus importante dans le centre urbain. Contrario, le flux de chaleur latente Q_E est plus important dans les zones rurales.

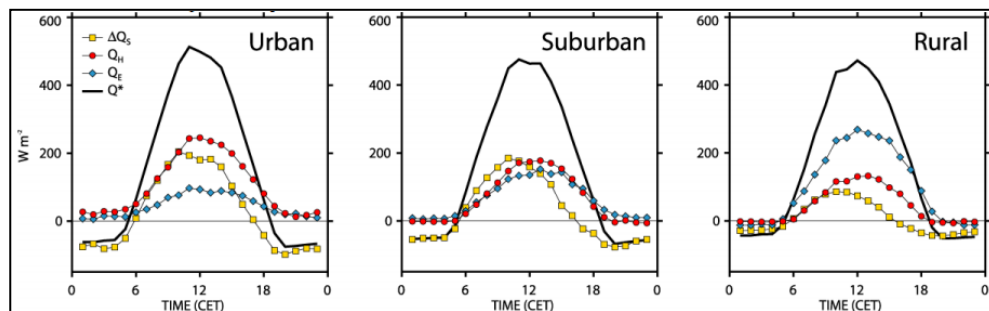


Figure 1.12 : Bilan d'énergie nocturne de trois sites : site urbain (Basel-Sperstrasse), site suburbain (Allschwil), et site rural (Village-Neuf), pendant un mois (de 10 juin à 10 juillet), (toutes conditions de ciel sont comprises) (D'après Pringer et al 2007).

1.9.2. Evaluation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain :

Les villes présentent une vulnérabilité particulière face au changement climatique et à la pollution atmosphérique compte tenu des fortes concentrations de population et des nombreuses infrastructures caractérisant leur territoire.

Selon Oke (1982,1987) est compilé par Arnfield (2003), parmi les considérations de ICU trois sont en relation avec les cycles annuels et journaliers :

- L'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est la plus grande dans la nuit.
- ICU peut disparaître pendant le jour, ainsi la ville peut être encore plus fraîche que les zones rurales.
- L'intensité ICU est mieux développée pendant l'été ou durant la période chaude de l'année (Wienert & al, 2013).

En effet l'ICU à une variabilité journalière récurrente, son intensité est en général plus forte la nuit que le jour. Dans la majorité des cas, le maximum d'ICU semble se situer quelques heures après le coucher du soleil puis l'ICU diminue rapidement après le lever du soleil. Son intensité diminue avec la vitesse du vent. On constate ainsi que l'ICU disparaît pour des vents supérieurs à 11 m/s. En présence d'un vent modéré (3 à 6 m s⁻¹), le champ de température prend la forme d'un panache étiré selon l'axe du vent. L'intensité de l'ICU diminue lorsque la nébulosité augmente. Les nuages interviennent en modifiant le refroidissement radiatif nocturne pendant lequel se forme l'ICU (ONERC, 2010).

L'intensité de l'UHI peut aussi augmenter avec l'augmentation de la taille de la ville et le nombre de population. Oke (1973) a démontré une forte relation entre la taille de la population et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à travers une recherche menée à 10 villes de St Lawrence Lowland dont la population varie de 1000 à 2 millions d'habitants (figure 1. 12).

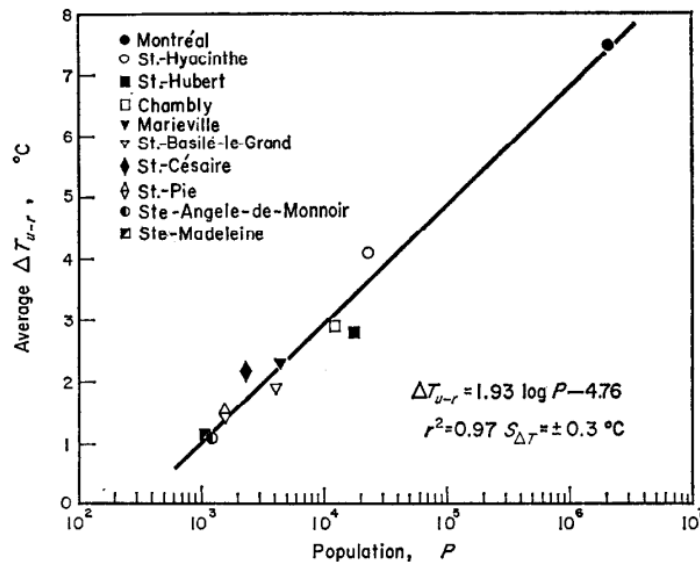


Figure 1.13: Relation entre l'amplitude moyenne observée ΔT_{u-r} et la taille de la population de la cité (P), pour 10 villes à St. Lawrence Lowland. (Vitesse moyenne du vent 2.3 m s⁻¹ et ciel clair), (Oke, 1973).

Dans une étude comparative entre trois sites urbains : site dense, habitat collectif et habitat individuel, effectuée à Gothenburg, Sweden pendant 18 mois on a trouvé que : les sites urbains étaient toujours plus chauds que la périphérie avec une différence maximale de 8°C enregistré au sein du site comparativement dense pendant les conditions claires. Cependant L'habitat collectif et les maisons individuelles montraient une différence de 4°C, comparés à la périphérie. Dans les journées claires les sites urbains étaient plus frais, phénomène îlot de froid, alors que pendant les journées couvertes ces sites étaient encore plus chauds avec une différence de 2.5 °C (Svensson & Eliasson, 2003).

Les modèles de simulation de refroidissement à l'échelle de la rue canyon de Oke (1981) présentent l'hypothèse que pour un ciel clair avec des conditions calmes et en l'absence significative du chauffage anthropique, l'intensité maximale ICU peut être liée à « l'ouverture » de la structure urbaine, représentée par AR du canyon ou le facteur de vue du ciel, puisque il contrôle la vitesse du refroidissement en limitant la perte de rayonnement en grandes longueurs d'onde nette au niveau de

la rue. Oke a pu montrer que ce concept était capable de décrire les intensités d'îlots de chaleur pour de nombreuses régions géographiques avec une grande précision. Cependant, ces relations ne peuvent pas prédire la description de la répartition spatiale des températures au sein d'une ville, même pour des conditions calmes, claires, en raison de plusieurs facteurs tels que les effets de l'interférence de l'admittance thermique et le dégagement de la chaleur anthropique.

Le rôle de l'ensemble des causes hypothétiques de l'îlot de chaleur de la couche limite urbaine a été exploré intensivement par Oke et al., (1991), qui concluent que les différences de géométrie et d'admittance thermique peuvent être approximativement d'une signification égale. Le dégagement de la chaleur anthropique de l'intérieur des bâtiments est aussi potentiellement important, mais il dépend de l'isolation du bâtiment.

Une conclusion très importante de cette étude est le rôle de l'admittance thermique dans la génération de l'îlot de chaleur rurale. Les sols humides possèdent des valeurs d'admission thermiques qui ne sont pas différentes de celles des matériaux des constructions typiques dans les zones urbaines denses, ce qui peut expliquer les petits (et négatifs) intensités ICU trouvées pour les endroits tropicaux humides.

1.9.3. L'impact de l'urbanisation sur les températures de surfaces :

L'îlot de chaleur urbain défini par une augmentation dans la température de surface engendrée par un changement dans les propriétés physiques de la surface (ex : albédo, émissivité, capacité thermique, conductivité, inertie thermique), couvert du sol (végétal, présence d'eau, imperméabilité des surfaces), structure urbaine, utilisation du sol, chaleur anthropogénique et la pollution de l'air (Oke, 1984). Le résultat est une grande différence dans la température de surfaces enregistrée dans la ville comparée à celles enregistrées dans la périphérie.

A Beijing (Chine), dans l'objectif d'évaluer l'impact de l'urbanisation sur la distribution des températures de surfaces du sol (L.S.T) et les flux engendrés, des observations à l'aide des thermomètres et des images infrarouges. Des différences importantes ont été trouvées. On a enregistré une valeur de 6 à 12°C entre les surfaces minéralisées et les espaces végétalisés, une valeur moyenne de 3 à 6°C entre les zones urbanisées et les zones rurales (Wenhuikuang & al, 2015).

1.9.4. L'humidité et les précipitations :

L'humidité de l'air, soit la quantité d'humidité présente dans l'air, est généralement exprimée en termes d'« humidité relative ». Elle est définie comme le rapport entre la masse de vapeur d'eau dans un certain volume d'air humide à une température donnée, et la masse de la vapeur d'eau dans le même volume d'air saturé à la même température, normalement exprimée en pourcentage.

Les précipitations comprennent l'eau sous toutes ses formes : la pluie, la neige, la grêle ou la rosée. Elle est généralement mesurée en millimètres (mm) à l'aide d'un pluviomètre.

L'îlot de chaleur urbain entraîne une baisse dans l'humidité relative, par contre, l'humidité absolue tend à augmenter (au plus chaud, rejet de vapeur d'eau par les usines).

Plusieurs recherches ont montré que le climat de la ville est plus sec que la périphérie, cependant il peut être plus humide pendant la nuit, Sacré a mentionné une différence de l'ordre de 2 à 3 mmB comme elle peut baisser en fonction du vent.

L'impact de l'urbanisation sur l'humidité et les précipitations est signalé à travers plusieurs recherches, à titre d'exemple, l'agglomération parisienne. Une interaction éclatante entre la circulation atmosphérique générale et une circulation locale a été détectée, l'hiver est devenu plus doux, le brouillard a disparu, les pluies sont moins fréquentes, le soleil brille plus longtemps. L'été devient plus chaud, plus insupportable, coupé de temps à autre par des orages violents (Escourrou, 1990).

Dans une étude menée à la métropole de Warri, au Nigeria, les effets urbains sur la quantité et l'intensité des précipitations étaient examinés. Les données utilisées ont été générées à partir des mesures de la quantité et la qualité des pluies. Les résultats ont montré que les précipitations dans la zone urbaine étaient de 18% plus élevées que les zones rurales, et considérablement variables (20%). La qualité de l'eau de pluie était généralement plus faible dans la canopée urbaine que dans les campagnes (Efe, S.I, 2010).

Similairement, une étude sur le régime des précipitations durant la période chaude (Mai-Septembre) a été menée à Ankara (Turquie). Les données recueillies au niveau de la station météorologique à caractère urbain d'Ankara (AMS), et celles de la station météorologique à caractère rurale de Car Esenboga (EMS), ont été analysées statistiquement afin de comprendre les tendances des précipitations par jour. Les résultats ont révélé une augmentation dans le nombre de fortes précipitations ($\geq 12,5$ mm/jour) avec le développement de l'urbanisation d'Ankara. Cette différence est équivalente à 50% entre le nombre de fortes précipitations dans la zone urbaine et dans la zone rurale (Cicek & Turkoglu, 2005).

Une comparaison entre les quantités de précipitation enregistrées durant la période (1998- 2000), dans les villes : Atlanta, Georgia ; Montgomery, Alabama ; Nashville, Tennessee ; and San Antonio, Waco, and Dallas, a montré : une augmentation moyenne d'environ 28% dans les taux mensuels des précipitations dans la partie sous le vent qui s'étend de 30-60 km de la métropole ((Shepherd et Pierce, 2002), avec une légère augmentation de 5,6% à travers la métropole. La vitesse est supérieure à 51% dans les parties sous le vent. Les variations en pourcentage sont liées à une zone de contrôle en amont. Il a été constaté également que les taux de précipitations maximales dans la zone d'impact dépassent la valeur moyenne dans la zone de contrôle en amont de 48% -116%. La valeur maximale est généralement enregistrée à une distance moyenne de 39 km de la lisière du centre urbain ou 64 km du centre de la ville. Cette recherche a des implications sur les prévisions météorologiques, la planification urbaine, la gestion des ressources en eau, et un témoignage de l'impact de l'homme sur l'environnement et le climat.

Bornstein et Lin (2000), plus récemment, ont trouvé que les grandes structures comme des groupements de bâtiments pourraient agir pour créer une zone de bifurcation qui oriente les tempêtes autour des villes.

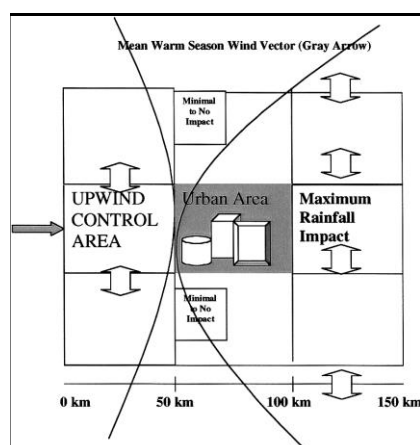


Figure 1.14 : Système théorique de coordonnées utilisées pour définir le contrôle en amont, et de la zone d'impact maximale d'UHI-précipitations. Flèche grise représente la moyenne des vents dominants et définit l'axe de référence du système de coordonnées (Bornstein & Lin, 2000).

Des observations sur une période de 13 ans étaient portées sur l'effet de l'urbanisation sur l'humidité absolue et relative à Edmonton (Canada), les résultats ont révélé à l'exception des mois d'hiver, les sites urbains enregistrent des humidités relatives inférieures aux zones rurales avec une moyenne de 10% de différence pendant les nuits d'été.

En matière d'humidité absolue, la ville est plus sèche le jour et plus humide la nuit. En hiver, les humidités relatives et absolues sont plus importantes en sites urbains à cause du mouvement vertical et la combustion des sources de vapeur d'eau tel que la fonte des glaciers (Hage, 1975).

De même Charciarek a trouvé à « Lodz » que les humidités relatives étaient bien importantes dans la zone rurale comparé au centre-ville, la différence moyenne dépasse 11% et les maximales apparaissent la nuit pendant la période chaude de l'année.

Les villes sont plus humides la nuit et plus sèche le jour, comparées aux alentours à Chicago (Illinois), la différence entre la pression de vapeur et le point de rosé entre l'urbain et le rural était positive la nuit et négative pendant les soirées d'été (Ackerman, 1987).

Un excès de pression de vapeur était trouvé dans la ville Szeged en Hungary, (cité par Unger) comparé à la campagne pendant toute l'année et spécialement en été. Cette différence était expliquée par la présence des surfaces d'eau dans la ville (rivière, espace vert irrigué) et l'aspect tempéré de la zone). Suite à leur recherche à Beijing, Liv et al, ont trouvé une importante influence de l'urbanisation sur la température relative et la pression de la vapeur, la différence annuelle moyenne était de 1,76°C, 6,3% et 1,5475 hpa respectivement. Une influence importante était détectée à 02h, 8h, 20h, elle s'est réduite à 14h (Weidon Liv & al.).

1.9.5. Impact de l'urbanisation sur le rayonnement solaire et l'insolation:

Les aérosols dans l'atmosphère peuvent modifier le rayonnement incident de deux manières : en appauvrissant le rayonnement global et en modifiant le rayonnement direct et le rayonnement diffus sur les sites urbains.

Dans les zones rurales où la concentration des aérosols anthropogéniques n'est pas importante la réduction dans le rayonnement direct est directement compensée par le rayonnement diffus, les polluants photochimiques qui dépendent du rayonnement UV dans leur formation affectent la qualité de l'énergie solaire reçue.

Des mesures de la quantité du rayonnement UV à Los Angeles ont montré une nette distinction entre les sites urbains et ruraux en fonction de la concentration des polluants. Pendant 47 jours sans nuages, le site urbain (El Monte) a reçu une moyenne de 29% de moins en rayonnement UV et 11% de moins en énergie solaire. A St Louis, les différences faisaient le ¼ des résultats trouvés à Los Angeles. Le modèle de diffusion photochimique utilisé pour quantifier la sensibilité des niveaux d'ozone ont révélé que l'intensité du rayonnement solaire avait un effet important sur les niveaux d'ozone calculés (Peterson & Flowers, 1976).

Lorente et al. (1994) ont mesuré les distributions spectrales à travers des milieux turbides à Barcelone. Des changements importants dans la partie du faisceau ultraviolet (UV) du spectre ont été notés (> 25%), avec compensation de l'augmentation des UV diffus. Jacovides et al. (1998) ont trouvé des résultats similaires pour Athènes, en Grèce, et ont noté que le rayonnement UV-B est plus atténué que le rayonnement longue longueur d'onde UV-A. Également Le rayonnement photosynthétique actif est considérablement appauvri dans des conditions atmosphériques très pollués, des réductions de plus de 18% dans le rayonnement global dans certains cas ont été constatées (Arnfield, 2003).

La disposition du site est un facteur clé affectant la viabilité d'un bâtiment solaire passif. Les constructions très élevées peuvent bloquer la lumière naturelle et réduire les gains solaires. Ils peuvent également réduire le potentiel du refroidissement passif en réduisant les flux de ventilation et en piégeant la pollution. La figure 1.15 montre que pour une obstruction de 10°, la lumière du soleil est reçue presque tout l'hiver. Par contre, pour celle de 40°, le soleil d'hiver est obstrué avec un risque de surchauffe pendant l'été.

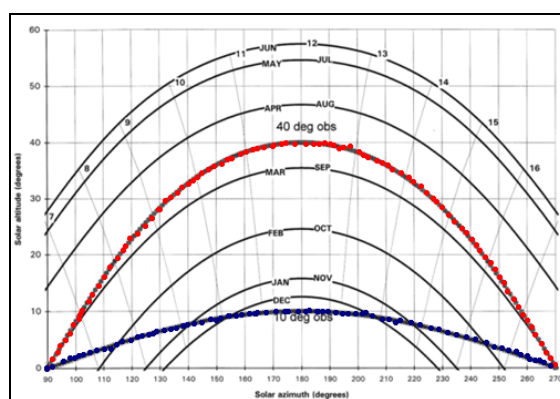


Figure 1.15 : Diagramme solaire : Latitude 55° montrant l'impact des obstructions sur l'ensoleillement (D'après Littlefair, 1998).

L'aménagement conventionnel des maisons individuelles (figure 1.16), nécessiterait 7899 kWh/an pour le chauffage des locaux. Cette quantité est réduite à 7499 kWh/an en intégrant des éléments passifs. Cependant, avec le plan réaménagé sur la base du solaire passif, par Stillman & Eastwick-Field, cette quantité est réduite à 6899 kWh/an, à une modération de plus de 10% (Littlefair, 1998).

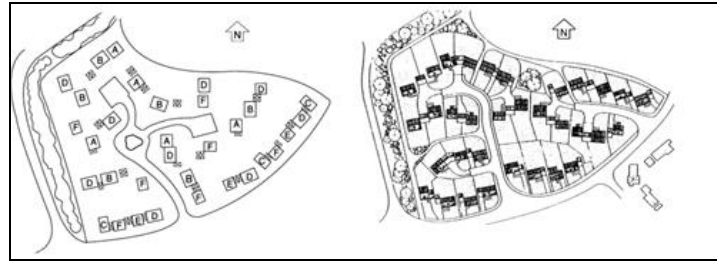


Figure 1.16: Conception du plan de masse sur la base du solaire passif (Littlefair, 1998).

Une étude comparative menée au Caire sur la quantité de rayonnement G reçu au niveau des rues dans un site urbain et site rural sur une période de 1969-2006, a révélé que les sites urbains reçoivent une quantité inférieure aux sites ruraux. La quantité annuelle s'est considérablement réduite d'un maximum de 21,93 et de 22,62 Mjm^{-2} pendant 1970 et d'une valeur minimale de 17,57 et de 17,87 Mjm^{-2} pendant 2004 et 2007, avec un ratio de 0,09 et 0,1 Mjm^{-2} par an pour les sites urbains et ruraux respectivement (Rabaa, 2009).

1.9.6. Vent et « brises de campagne »

La ventilation naturelle en milieu urbain est fortement réduite. Les sites urbains ont une grande influence sur l'écoulement du vent et le transport des polluants. Plusieurs études ont montré à travers des mesures faites dans les stations sises généralement à côté des aéroports, en dehors de la ville et d'autres dans les centres urbains que la vitesse du vent dans une zone urbaine est bien inférieure à celle des zones rurales. Cette diminution a été attribuée à la grande rugosité aérodynamique de la surface (Bornstein & Johnson, 1977).

Les raisons du développement des vents sont multiples et très complexes. La raison principale, cependant, est la distribution inégale du rayonnement solaire dans le monde entier. Le rayonnement solaire fort provoque aussi des vents thermiques locaux irréguliers. Cela est dû à l'air qui est chauffé près du sol et monte de temps en temps sous la forme de bulles.

Les études sur le vent dans la planification architecturale et urbaine sont rarement effectuées en raison des exigences de la maîtrise élevée des techniques scientifiques des simulations CFD et des tests en soufflerie. En effet l'utilisation correcte des simulations CFD dépend d'une bonne connaissance en mécanique des fluides, le choix des dimensions du volume de la simulation, conditions limites, résolution de la grille, modèle de turbulence, etc.

La réduction importante dans la vitesse du vent était observée dans les canyons urbains. Il s'avérerait que le flux d'air est réduit au 1/10 dans les canyons urbains par rapport à une situation sans obstacles. L'orientation du canyon avait une influence sur l'importance de cette diminution (Santamouris, 2001).

La forme urbaine, avec ses immeubles et l'importante rugosité du sol, ont aussi, un impact sur la vitesse du vent et la turbulence. Ainsi, pour une même hauteur d'environ 20m, prise à partir du niveau du sol, on observe une réduction d'environ 20 à 30% dans la vitesse moyenne du vent en ville

comparé à un milieu rural. En revanche, la turbulence est accrue de l'ordre de 50 à 100% (Sacré, 1983).

Tableau 1.6: Les valeurs acceptables de P_{max} relatives au vent et confort (Willemsen & Wisse, 2007).

P_{max} In % hours per year	Grade	Activity = Traversing	Activity = Strolling	Activity = Sitting
< 2.5	A	Good	Good	Good
2.5 - 5	B	Good	Good	Moderate
5 - 10	C	Good	Moderate	Poor
10 - 20	D	Moderate	Poor	Poor
>20	E	Poor	Poor	Poor

Les architectes et les urbanistes n'ont pas besoin de connaître la vitesse exacte du vent à chaque point pour concevoir des espaces publics confortables, mais ils ont besoin de connaître les zones protégées du vent et celles qui seront exposées et par conséquent elles vont créer l'inconfort pour les piétons. Une importante densité urbaine avec des immeubles hauts et homogènes créent un effet de protection contre le vent. Reiter (2007), a démontré que la vitesse du vent dans la périphérie d'une zone urbaine est ralentie sur une distance de 200m dans le sens du vent et de 50m dans la direction perpendiculaire au vent.

Des études dans de nombreuses villes, ont montré que la vitesse moyenne du vent est généralement plus faible dans les zones urbaines que dans les zones rurales. Les mécanismes responsables d'accélération dans les zones urbaines sont probablement liés à une combinaison des brises de terre associés aux circulations d'îlot de chaleur, et un flux de l'élan à la surface, suite à la turbulence thermique et mécanique accrue.

Une étude numérique sur la variation de la vitesse du vent effectuée à Ghardaïa a montré que la distribution des vitesses change considérablement selon la forme des constructions et la configuration urbaine qui agissent comme des brises vent. La vitesse de l'air à l'intérieur du tissu urbain était plus faible que celle observée au niveau des limites du lot.

Dans une étude menée à Lodz (Pologne) la différence moyenne de la vitesse du vent en milieu urbain était de 30 à 40% inférieure à celle des zones rurales particulièrement pendant la journée. La différence maximale enregistrée à midi et la minimale pendant la nuit. La décélération de la vitesse pendant le jour est expliquée par la forte rugosité des sites urbains. Cependant cette différence varie en fonction du vent régional et des conditions météorologiques.

1.9.7. La brise de mer

La circulation thermique qui domine près d'une ligne de côte à basse altitude, est un vent de terre nocturne, lorsque la température de surface de la mer est plus élevée que la surface continentale, et un vent de mer diurne dans le cas inverse.

Les systèmes de brise de mer et de brise de terre interagissent lorsqu'une ville est située près de la côte, ce qui est le cas pour la ville d'Annaba. A l'aide de simulations numériques 2D de la ville de Tokyo (avec un modèle hydrostatique), Yoshikado (1992) montre que la présence d'un îlot de chaleur urbain au-dessus d'une ville côtière renforce la brise de mer, depuis son apparition le matin jusqu'à son stade de développement maximal au milieu de l'après-midi. La pénétration de la brise de mer est également retardée dans ce cas. Au niveau du front de brise de mer la vitesse verticale est alors accrue. Il met en évidence la stagnation du front de brise de mer sur le bord de la ville (du côté opposé à la mer) pendant un peu plus de deux heures (entre 13 h et 15 h), avant qu'il ne reprenne sa progression vers l'intérieur. L'îlot de chaleur urbain empêche la dispersion des polluants émis dans la ville, retardant leur transport dans les terres. Si une ville est située un peu en retrait par rapport à la mer, l'ICU a le temps de se développer avant l'arrivée de la brise de mer. Dans le cas contraire la brise de mer sera prépondérante et contrera l'augmentation de la température au-dessus de la ville.

1.9.8. Effet de la pente

Les reliefs majeurs qui affectent un site sont les montagnes, les vallées et les plaines. Il est important de comprendre le relief du site car la température varie avec l'altitude. La topographie peut modifier considérablement la dynamique de l'écoulement. Cependant, les effets thermiques induits par l'orographie conduisent aussi à des circulations particulières ; au début de la journée, les flancs des collines exposés au soleil plus tôt que le fond de la vallée, se réchauffent plus vite. Le gradient de température créé amène l'air frais du fond de la vallée à gravir les pentes. C'est ce que l'on appelle les vents anabatiques, dont les vitesses n'excèdent pas 1 m/s (Leroyer, 2006). Au contraire, en début de nuit, ces mêmes pentes se refroidissent plus vite, ce qui conduit les vents catabatiques à dévaler la pente vers le fond de la vallée sur 2 à 20 m d'épaisseur, avec une intensité plus forte que pour le schéma inverse (entre 1 et 5 m/s).

1.9.9. Les plans d'eau :

Les plans d'eau peuvent être sous la forme de mers, de lacs, de rivières, d'étangs, ou de fontaines. Puisque la chaleur latente de la vaporisation de l'eau est relativement élevée, il absorbe une grande quantité de chaleur à partir de l'air ambiant pour l'évaporation, qui soulève également le niveau d'humidité.

L'efficacité thermique des points d'eau dans une ville dépend de leur taille. Les fontaines qui sont de petites surfaces d'eau isolées ne refroidissent pas suffisamment l'air. En revanche, de grands jets d'eau ont des effets notables sur l'humidification et le refroidissement de l'air. L'étude du cas par cas, est cependant nécessaire pour dimensionner la superficie des points d'eau et viser une réelle efficacité (Greuillet & Galsomiers, 2013).

1.10. Conclusion :

Le pouvoir prédictif de la climatologie urbaine peut être développé grâce à des modèles et autres techniques capables de produire des prévisions fiables ou d'estimations des conditions climatiques futures dans les sites urbains. Ce pouvoir ne peut être atteint qu'à travers une rigueur

méthodologique, basée sur une détermination adéquate des surfaces urbaine et de leurs propriétés physiques, la maîtrise des différentes échelles, l'observation, l'interprétation et la modélisation.

Le concept d'échelle est très important pour la compréhension des interactions entre les éléments de surface et la couche atmosphérique adjacente. Il est défini horizontalement et verticalement.

Chaque ville est structurée et aménagée différemment ayant un climat particulier appelé climat urbain. Ce dernier est influencé par des phénomènes dynamiques dû aux variations spatiales de l'intensité et de la direction du vent et des phénomènes thermiques due aux variations verticales de la densité de l'air.

Il présente le résultat des échanges d'énergie (radiative, thermique et hydrique) entre les surfaces et l'atmosphère, et les interactions aérodynamiques entre la canopée et l'atmosphère. Des modèles radiatifs et hydriques ont été conçus pour caractériser ces phénomènes physiques.

Le premier objectif des modèles urbains de bilan énergétique des surfaces, est de déterminer les flux de chaleur et d'humidité qui vont conditionner le comportement thermo-dynamique de l'atmosphère urbaine, à des échelles pouvant aller d'une centaine de mètres à quelques kilomètres.

Les modèles hydriques traduisent les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux enterrés, les surfaces et l'atmosphère en période de temps de pluie ou en temps sec, et prenant en compte la variabilité spatiale des caractéristiques de la surface du sol et des propriétés hydrodynamiques des sols.

Qu'il s'agisse des impacts climatiques ou énergétiques de l'urbanisation, les approches par simulations permettent de tester des hypothèses d'aménagement, en particulier l'utilisation de techniques alternatives, ce que l'expérimentation de terrain ne permet pas toujours. Il est donc nécessaire de disposer de modèles à la fois robustes et capables de simuler des configurations urbaines réalistes. Envi-met est l'un des modèles qui permet une représentation fine du cadre bâti, en prenant en compte l'effet de la végétation et les caractéristiques thermiques des matériaux de construction.

L'influence d'une ville peut s'observer sur plusieurs paramètres climatiques. La manifestation la plus évidente du climat urbain est l'existence de l'îlot de chaleur urbain qui se traduit par une augmentation des températures en milieu urbain d'année en année et qui concorde avec l'intensification de l'urbanisation.

Ce phénomène est engendré par un changement dans les propriétés physiques de la surface (ex : albédo, émissivité, capacité thermique, conductivité, inertie thermique), couvert du sol (végétal, présence d'eau, imperméabilité des surfaces), structure urbaine, utilisation du sol, chaleur anthropogénique et la pollution de l'air.

Ces manifestations et ces causes ont fait l'objet d'une abondante littérature scientifique. Si la liste des processus responsables du phénomène est aujourd'hui bien établie, leur importance respective et leurs interactions restent d'autant plus difficiles à préciser à cause de l'interférence de l'effet de l'urbanisation avec d'autres facteurs environnementaux tels que la topographie, la végétation, la présence des surfaces d'eau.

CHAPITRE II

Caractérisation morpho-climatique des espaces extérieurs



2.1. Introduction :

La forme d'une ville est le résultat d'agencement de plusieurs composants spatiaux et sociaux qui permettent de décrire ses réseaux, ses espaces construits, ses espaces libres en termes géométriques, topologiques et hiérarchiques en deux et trois dimensions voire en incorporant la profondeur temporelle que comporte toute la ville.

La question du lien entre morphologie urbaine et la consommation d'énergie n'est pas récente. Elle a d'abord émergé, dans les années 1980 et 1990, à partir des travaux sur le transport, comme ceux de Newman et de Kenworthy (1991) qui mettaient déjà l'accent sur le lien entre la densité urbaine et l'usage de l'automobile. Suite à leur étude sur 32 métropoles, ils ont démontré une croissance exponentielle de la consommation du fuel avec la diminution de la densité. Leurs conclusions présentaient un agrément irréfutable en faveur de la densification des aires urbaines et de la « ville compacte » (Allain, 2004).

Au constat de ce manque d'investissement par les sciences sociales, Maïzia conteste la nécessité, de prendre en compte la morphologie urbaine d'un quartier et les caractéristiques architecturales d'un bâtiment pour évaluer sa performance énergétique, dans une problématique de développement durable (Maïzia, 2007).

Le bilan énergétique d'un bâtiment, même pris isolément, dépend fortement de la configuration physique du voisinage plus ou moins immédiat. Il dépend fortement des dimensions formelles des bâtiments et des espaces dans lesquels ils s'inscrivent. Ainsi les études de typo-morphologie urbaine semblent les plus appropriées pour mettre au jour ces caractères spécifiques de l'espace urbain. Typifier pour décrire et expliquer les paysages permet facilement de typifier pour quantifier les consommations. Elles reposent sur la construction de classes d'objets, bâtiments et espaces environnants immédiats, et emploient les mêmes techniques d'information pour automatiser les opérations de calcul (Mindjid, 2007).

2.2. Morphologie urbaine et forme urbaine :

La morphologie urbaine est l'étude de la forme physique de la ville, de la constitution progressive de son tissu urbain et des rapports réciproques des éléments de ce tissu qui définissent des combinaisons particulières, des figures urbaines (rues, places et autres espaces publics, etc.) (Allain, 2004).

D'après, Adolphe (Adolphe, 2001) et comme citer par Doherty et al, malgré que les deux termes morphologie urbaine et forme urbaine sont parfois considérés substituables dans la littérature, ils sont généralement traités à des échelles spatiales différentes. La morphologie urbaine parfois se réfère au tissu urbain et traite les différentes configurations spatiales des bâtiments, leurs formes et dimensions, ainsi que leurs influences directes sur les microclimats intérieurs et extérieurs et sur la consommation d'énergie à des échelles très fines.

La forme urbaine reflète la genèse de la ville, elle est définie par les différentes formes d'occupation des structures industrielles, commerciales et résidentielles ainsi que leur densité (Doherty & al).

En effet, La notion de la forme urbaine recoupe des définitions multiples et revêt des sens différents selon les approches et les champs disciplinaires Bourgel les considère comme un monde flou où se côtoient les constructions matérielles et les pratiques concrètes (Bourgel, 2000). Les formes urbaines évoluent en fonction des nouvelles pratiques et approches qu'induisent des principes renouvelés de planification urbaine (Certu, 2007).

A travers cette étude on tentera de s'aligner avec la définition du dictionnaire d'urbanisme qui considère la « morphologie » comme étude des formes ainsi nous essayerons de s'emparer de cette confusion entre les notions de « morphologie » et de « forme urbaine ».

D'après le séminaire international sur les formes urbaines (ISUF), (Moudon, 1997):

La forme urbaine est définie à travers trois éléments fondamentaux : Les bâtiments et leurs espaces ouverts correspondants, parcelles et les rues. Elle est étudiée à travers plusieurs niveaux de résolution dont quatre qui sont les plus significatifs : Bâtiment/Parcelle, Îlot/Rue, la ville et la région.

La compréhension de la forme urbaine dépend de la morphogénèse qui seule peut expliquer les différentes transformations subies par ces différents éléments.

2.3. Espace public/ espace extérieur :

Les espaces publics font l'objet d'un regain d'intérêt (STU). Actuellement les villes sont devenues plus conscientes de leurs rôles dans la compétition économique et leurs importances dans l'affirmation de l'identité comme facteur de cohésion.

Les espaces extérieurs présentent le support des activités culturelles, politiques et sociologiques. Ils sont définis comme étant une partie du sol non couverte et accessible aux public.

Les espaces extérieurs comme opposés aux espaces publics (qui peuvent englober les bâtiments publics) présentent le corpus de notre recherche, ils reflètent le niveau de la qualité de la vie politique, sociologique et culturelle.

L'espace public présente trois niveaux de lecture. La lecture morphologique permet de comprendre la forme urbaine, la lecture pittoresque qui met en évidence les différentes qualités paysagères et la lecture historique permet de déchiffrer les tracés du passé qui constituent la trame de la composition urbaine.

Du point de vue historique, l'agora grecque et le forum romain et les places religieuses présentent le point de départ des activités démocratiques, ils présentent le symbole de la sphère publique dans la littérature moderne. D'autres récits historiques s'en passent de ses modèles classiques aux places médiévales qui contenaient une variété d'activités socio-économiques et loisirs. Les places de la renaissance reflétaient un passage à d'autres valeurs singulières et privatives. Les squares conçus exclusivement pour entourer des zones résiduelles sont apparus. Les parcs urbains dédiés à la distraction sont apparus au 19^{ème} siècle.

La lecture morphologique est décrite selon trois critères : topologique, géométrique et dimensionnels. En fonction de sa topologie, un espace extérieur peut être fluide (espace libre sans encombrement), statique (espace petit ou fermé), incite ou dynamique (canalisé et incite au déplacement) (figure 2.1).

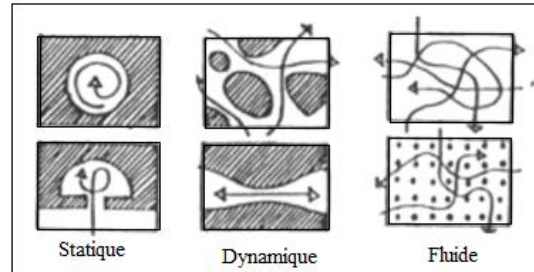


Figure 2.1 : Lecture morphologique des espaces extérieurs.

2.4. Typologie des espaces extérieurs :

La compréhension de la structuration des espaces et de formes urbaines qui en résultent implique le croisement de plusieurs données. Le croisement de cartes topographiques et géographiques permet la compréhension des grandes lignes directrices du tracé. Les données historiques permettent de construire une image globale qui associe la connaissance des plans et celle du terrain (Pannerai, 1986). En effet la compréhension de la structure urbaine passe inéluctablement par la connaissance de son histoire.

Al-Hagala (2008) et Campbell (2001) ont classé les espaces extérieurs en fonction de leurs formes physiques comme suit :

- Espace vert : Caractérisé par la présence d'eau et de la végétation.
- Espace minéral : consiste en les places, les squares qui abritent généralement les fonctions civiques.

Leurs fonctions sont les suivantes :

1. Structurelle : Renforcer l'identité en aidant à établir le sentiment d'appartenance ou de propriété.
2. Ecologique : Réduction de l'effet de la pollution, recyclage d'eau, réduire la pollution sonore.
3. Environnementale : Promouvoir le DUD par le contrôle d'eau (Perméabilité du sol) et réduire la consommation énergétique des bâtiments.
4. Educatif : Constitue des salles de classes en plein air pour les écoles, les établissements scolaires et groupes d'intérêts spéciaux.

Pièrren Lavedan les a classés selon :

1. Les fonctions : place de rassemblement, place monumentale et place de trafic.
2. Leur emplacement : place de jonction qui relie entre la ville et ses extensions, la place porte qui articule entre les différentes parties de la ville et les places conçues de toutes pièces qui peuvent être situées à n'importe quel endroit de la ville.

3. La structure : les places triangulaires, les places carrées ou rectangulaires, circulaires et irrégulières.

Les classifications de Silte et Zucker et Krier sont d’une importance particulière. D’après Silte et suite à l’analyse de plusieurs villes Européennes, la combinaison des principes artistiques tel que : L’enclos, l’effet de masse, la forme et monuments peut produire trois types de places : en turbine, en profondeur et en largeur.

Cette classification a été élargie par Zucker en cinq types : Fermé (closed), directionnel (dominated) organisé autour d’un ou plusieurs éléments dominants, nucléaire (nuclear) formé autour d’un centre ou autour d’un monument, groupé (grouped), composé de plusieurs espaces et amorphe (amorphos), constitue de forme éventrée et illisible. Selon lui l’espace extérieur peut correspondre à deux ou plusieurs types (Stanley & al, 2012).

Krier (1979) a regroupé l’ensemble des espaces ouverts en deux types : Rues et places en se basant principalement sur la géométrie.

Malgré que plusieurs recherches considèrent que la forme est le moyen le plus déterminant pour classifier les espaces extérieurs, la fonction de l’espace relève d’une grande importance pour certains espaces tel que les aires de production alimentaire et proposa une classification qui englobe la forme et la fonction selon le tableau suivant (Stanley & al, 2012) :

Tableau 2.1 : Formes et fonction des espaces extérieurs selon l’échelle géographique approprié (D’après (Stanley & al, 2012).

		Ville	Intermédiaire	Résidence
Forme	Aires de transport	Port, aéroport, Gare...etc.	Stations de transit, aire d'embarquement.	Aires de stationnement, allées.
	Rues	Boulevards	Rues	Rues piétonnes, allées, cheminement.
	Place	Les grandes places	Petite place du quartier	Cour intérieure
Fonction	Espace de récréation	Stades, culture verte, potager.	Aire de jeux, moyens sportifs.	Cour de la maison, espace de jeux.
	Espace résiduel	Éléments naturels, aire semi-sauvage.	Limites, transition.	Espace marginalisé, entrée de bâtiments.
	Parc et jardin	Parc et jardin	Jardin institutionnel, petit parc et cimetières.	Jardin de maison.
	Aires de production végétale	Verger, domaine agricole	Pâturage, jardins communautaires.	Potager de cuisine, petite horticulture.

Dans le cadre de ce travail le choix des cas d’étude était orienté en fonction des considérations géométriques traduites à travers la variété des formes urbaines. On trouve les places, les enclos et les cours. L’approche historique nous a été inévitable vu que ces formes urbaines ont été évolués à travers le temps et présentent un témoignage des différentes périodes qui sont succédées dans la ville d’Annaba.

2.5. Morphologie urbaine et microclimat :

D'après Lévy, la forme urbaine est complexe polymorphique et polysémique et présente un caractère systémique. Elle est constituée d'une diversité de registres interdépendants entre eux et qui s'articulent pour produire la forme unitaire globale (Lévy, 2005). Selon lui, la forme urbaine peut être étudiée selon cinq registres. Elle peut être étudiée à travers la forme du tissu (Etude du : parcellaire/viaire/espace libre/espace bâti, constitutifs de tout tissu, en rapport avec le site) ou à travers la forme des tracés (plan organique/plan géométrique ; plan orthogonal/plan radioconcentrique). La morphologie est également sociale puisqu'elle étudie la répartition des divers groupes sociaux, démographiques, ethniques, les types de famille, ou la distribution des activités et des fonctions dans la ville. La forme urbaine est considérée comme forme du paysage urbain (texture, couleur, matériaux, styles, gabarits, etc. du bâti et des espaces publics). La forme urbaine est une forme bioclimatique où l'espace urbain est aussi appréhendé dans sa dimension écologique avec ces variations selon le type de tissu (ouvert/fermé/semi-ouvert), l'orientation du site (eau, relief, végétation) et de plus en plus en lien avec la mobilité (La forme compacte face à la forme étalée) et les ambiances (confort bien être), (CERTU, 2007).

Notre étude traitera la dimension bioclimatique des formes urbaines. Elle tentera de mettre en exergue la relation entre la morphologie urbaine et le microclimat.

Cette relation se rapporte aux formes tridimensionnelles, à l'orientation et à l'espacement des bâtiments dans une ville qui jouent également un rôle dans la formation des îlots de chaleur urbains (USEPA, 2008). Les rues étroites peuvent nuire à la bonne ventilation des centres urbains, car ils créent des canyons où s'accumule et reste emprisonnée, la chaleur occasionnée par le rayonnement solaire et les activités humaines (Coutts & al, 2008). En effet, la réduction du facteur de vue du ciel limite les pertes radiatives nettes des bâtiments et des rues (Pigeon & al, 2008). De plus, la morphologie urbaine peut également influencer la circulation automobile et encourager ainsi les apports de chaleur et de pollution de l'air (Oke, 1988).

En effet, aucune surface de sol n'est complètement plane. Les surfaces sont composées d'un certain nombre d'éléments rugueux à savoir le relief, les arbres et divers objets qui modifient leur aspect planimétrique. Ces éléments sont encore plus importants dans le milieu urbain, ainsi la ville est considérée comme étant un volume d'air construit (OKE 1987). La surface urbaine constitue une interface d'échange spécifique avec l'atmosphère. Selon la nature des surfaces (morphologie, types de sol et matériaux) les propriétés physiques des différentes surfaces (Benzarzour, 2002).

Jusqu'à très récemment, ces paramètres climatiques n'étaient plus très considérés par les urbanistes comme le signalait Adolphe & al. (2002). Les acteurs de planification sont aujourd'hui dépourvus d'outils et de données de base indispensables pour intégrer la dimension climatique selon ses trois échelles fortement imbriquées allant du climat régional, du méso-climat (à l'échelle de l'agglomération), et du microclimat (à l'échelle du bloc).

Alors que les climatologues et géographes se sont penchés plus particulièrement sur la formation du climat urbain, les architectes se sont intéressés à l'impact des conditions climatiques et environnementales sur les bâtiments. Parallèlement, les architectes sont focalisés initialement sur les

questions de confort intérieur et sur les besoins énergétiques. Pour améliorer ces conditions, ils se sont ouverts progressivement sur l'environnement extérieur du bâtiment (Ali-Toudert, 2005).

Dans une étude menée par Eliasson (2000), afin de démontrer quand et comment intégrer le climat dans la planification urbaine, plusieurs données ont été collectées à travers trois sites au Suède accompagnées par des questionnaires et des interviews adressées aux différents acteurs impliqués. Les résultats de la recherche ont dévoilé une introduction non structurée de la variable climatique dans la planification malgré l'intérêt porté au climat. Cela est relié essentiellement à plusieurs facteurs certains d'ordre technique et conceptuel d'autres d'ordre politique et commercial. Ces résultats ont amené à la mise en évidence de l'importance du rôle des climatologues urbains dans la fourniture des méthodes et des outils convenables ainsi que sensibiliser non seulement les planificateurs mais aussi les décideurs et le public.

2.6. Morphogenèse urbaine et climat urbain :

La prise en compte du climat dans le choix des formes urbaines n'est pas récente, en effet certaines techniques du bioclimatisme présentent un prolongement d'un savoir faire hérité du passé. Parmi les exemples tirés des registres de l'antiquité les observations de Tacite. Elles portées sur des parties de Rome qui devenaient excessivement chaudes durant l'été et les rues élargies étaient devenues moins saines qu'auparavant. Inspirer de ces observations, Palladio recommandait dès lors que les rues soient « larges et amples » dans les villes au climat froid, étant donné que ces rues seraient ainsi plus « agréables, commodes et belles ». Par contre, dans les villes au climat chaud (comme Rome), des rues « étroites et bordées de maisons hautes » seraient plus « saines ». Ces écrits étaient manifestement inspirés de ceux de Vitruve qui était tout particulièrement concerné par la question du vent et la manière de le contrôler en adoptant une orientation particulière lors de la constitution de nouveaux établissements humains (Teller, 2000).

Les villes anciennes ont été souvent construites autour d'un axe aligné avec quelques lignes de référence spatiales définies par exemple par la direction du lever du soleil qui a eu lieu le jour de la fondation. Ce type de planification urbaine était probablement plus dicté par les besoins rituels que par des considérations climatiques. Cependant, comme il apparaît dans les livres de Vitruve, les conséquences climatiques de l'orientation du bâtiment dans la ville et leurs variations avec les latitudes ont également été connues. (Compagnon, 2000)

La configuration urbaine peut contrôler la vitesse du vent et le régime des températures. Dans les villes ancestrales, la ligne d'horizon présentait une ligne droite horizontale. Dans un climat chaud et sec, les toits sont plats avec des hauteurs similaires de 2 à 3 étages, l'ensemble formait une grande " plate-forme ". Cette forme protège des vents forts avec peu ou sans obstacle. Cependant pour la ville moderne, la silhouette est formée par un ensemble de bâtiments de différentes hauteurs qui brisent l'écoulement des vents forts et les dévient en fonction des rues (Glony, 1995).

Vers la fin du 19^{ème} siècle le droit du soleil au bâtiment a regain beaucoup d'intérêt, l'orientation des bâtiments avait des buts hygiéniques et de salubrité publique la lutte contre la tuberculose. Elle sera ensuite recherchée comme une condition essentielle pour le confort des nouveaux logements générant ainsi de nouvelles formes urbaines (Lucan, 2012).

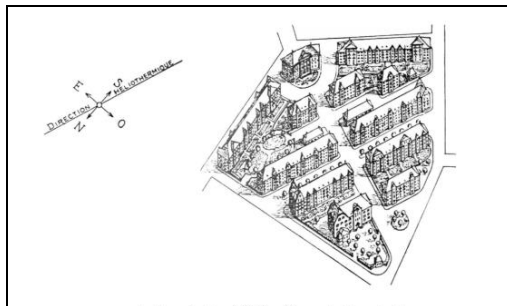


Figure 2.2 : Réorganisation scientifique de l'îlot selon l'axe thermique.

Plusieurs tentatives de règlements et de planification ont commencé autour de 1900 aux Etats-Unis. A cette époque, des études similaires ont également été menées en Europe.

Le principe de l'orientation solaire des habitations était considéré comme quasi scientifique par l'un de ses plus fervents défenseurs et propagandistes Augustin Rey. En 1928, il considérait que les bâtiments doivent être orientés selon un axe Sud dévié vers l'ouest afin de favoriser les valeurs héliothermiques de la deuxième moitié de la journée étant donné que la température qui est plus élevée l'après-midi que le matin. Dans les années 1920, les avants-gardes architecturales, allant de Walter Gropius à Le Corbusier se sont emparés de ce principe. Parfois ils le simplifient en demandant que les bâtiments d'habitations soient traversant et simplement orientés Nord/Sud avec les séjours dormant vers l'ouest et les chambres vers l'Est.

Les conséquences de l'adoption de l'axe héliothermique sont une rupture par rapport aux règles d'alignement sur rue ou de fermeture des îlots.

Patrick Chavannes, pour le plan guide des Grouses de l'opération de Seine-Arche à Nanterre, parlera de « morphologie héliotropiques » en le définissant comme suit :

« Le premier axe qui permet d'améliorer les performances solaires de la forme urbaine est « l'héliotropisme » cela pourrait se traduire par la faculté de la forme urbaine à laisser passer le soleil vers les espaces qui ont le plus besoin (Lucan, 2012).

Cependant avec l'augmentation du niveau de vie et le développement rapide des services de construction (par exemple, le chauffage central, éclairage électrique) ont rendu l'ensoleillement et l'éclairage naturel les questions moins considérées, jusqu'à la première crise du pétrole en 1973. Depuis lors, plusieurs études ont été consacrées au microclimat urbain et ses relations avec la consommation d'énergie. (Compagnon, 2000)

2.7. La performance thermique à travers la théorie des trois âges de la ville :

Basé sur des critères strictement morphologiques, Christian de Portzamparc avança la théorie des trois âges de la ville :

a) La ville de l'âge I :

Présente la plus longue période, couvrant plusieurs millénaires. Elle reflète la ville historique « multiséculaire » marquée par une structure linière de rues qui sont bordés soit de maison mitoyennes soit d'hôtels séparés. Dans cette période l'îlot est fermé, continu, peut être considéré comme « un bloc » de bâtiment unique signifie qu'il est devenu l'entité à partir de laquelle se dessine la ville. La parcelle et le type d'immeuble qui lui correspond sont donc subordonnés à la logique de l'îlot.

Selon lui la médina est une ville de l'âge zéro d'avant l'invention de la rue. Elle est Constituée de cellules agglomérées. L'air et la lumière y sont pris sur l'intérieur, par le patio, et des couloirs qui permettent de passer de cellule en cellule.

Cet âge correspond à la ville compacte chez Glony, selon lui, à côté de l'avantage qu'offrait cette disposition dans la sauvegarde des terres agricoles et la défense, cette morphologie s'est efficacement adaptée à la rigueur du climat. L'histoire des établissements humains dans la Méditerranée, le Moyen-Orient, et en Asie centrale ont accumulé un bon répertoire d'expériences qui dataient de plus de cinq mille ans et qui englobaient l'évolution de cette forme urbaine (Glony, 1995).

De nombreux urbanistes et politiques ont choisi de promouvoir la ville compacte : dans une logique de développement durable, maîtriser l'étalement urbain suppose de « refaire la ville sur la ville » et de densifier la ville.

Un tissu urbain compact est généralement étroit et profond. Il protège les espaces publics (rues, places ou cours intérieures) contre la pénétration des rayons solaires et génère des ombres qui augmentent ainsi le confort thermique de ces espaces. Cependant, par temps calme pendant la période chaude, ces espaces favorisent le phénomène du piégeage radiatif augmentant ainsi les températures de surface et de l'air et le risque d'inconfort. Ce piégeage radiatif est dû aux multi-réflexions des rayons solaires par les surfaces urbaines, à la réduction de l'albédo et à la diminution du facteur de vue du ciel.

Toutefois, ce piégeage peut être diminué grâce à la ventilation naturelle. En effet, la forme des rues en canyon continu et profond dans ces tissus compacts favorise l'effet aérodynamique de canalisation et ainsi le renouvellement d'air. Ce renouvellement est optimisé lorsque le vent est parallèle à l'axe des rues et qu'il a une vitesse suffisamment élevée pour créer un effet de canalisation (Athamna, 2012).

b) La ville de l'âgeII :

Elle commence avec l'apparition de l'urbanisme au sens moderne du terme, développée au xx^e siècle et qui a bouleversé la ville de l'âge I. L'îlot éclate en édifices discontinus et autonomes ; le tissu urbain se désagrège, indifférent au contexte, la ville perd alors son identité et son urbanité. Plusieurs exemples peuvent être regardés comme des modèles théoriques pour comprendre la déconstruction

de l'îlot. Les mitoyennetés verticales ont remplacé les mitoyennetés horizontales (urbanisme de dalle, les bâtiments formaient avec la circulation une même structure, mégastructure).

Les formes urbaines isolées et dispersées des grands ensembles constituent des géométries isolées et multiplient les surfaces exposées aux fluctuations climatiques. Les matériaux de surface jouent un très grand rôle sur les échanges radiatifs variables en fonction de leurs inerties et réflectivités. Cependant, l'espacement entre bâtiments favorise la ventilation et compense continuellement la hausse des températures d'air et de surface et assure le rafraîchissement des espaces grâce à la convection. Cette vitesse produite par les formes bâties peut augmenter provoquant ainsi des effets aérodynamiques indésirables et créant des perturbations qui entraînent des accélérations d'air ainsi que de nombreux mouvements tourbillonnaires notamment au pied et à l'angle des immeubles. Ces écoulements nuisent aux conditions du confort du piéton et au bon fonctionnement des espaces extérieurs.

c) **La ville de l'âge III (la ville d'aujourd'hui),**

Elle est absolument hétérogène, réfractaire à tout modèle normatif. Portzamparc a développé son modèle de troisième âge à partir de l'« îlot ouvert » ou « îlot libre », « rue ouverte ». À partir d'une grille traditionnelle, chaque îlot découpé ne serait construit qu'avec « 60 % de bâtiments alignés en bord de parcelles, le reste de la périphérie devant rester ouvert, perméable et constituant des cours, des jardins, des vues... ». Les îles faites d'une diversité d'architecture afin d'éviter l'effet de monotonie.

Ils défendaient l'hypothèse d'une « ville variée » avec des typologies hétérogènes mais répétitives.

En effet, la recherche architecturale et urbaine aujourd'hui aborde la question de mixité morphologique en quelque sorte comme complément de la mixité programmatique, comment associer des programmes qui requièrent des dispositifs particuliers, donc comment s'approprier positivement le problème de l'hétérogénéité des constructions (Lucan, 2012).

Quand à Levy, il propose aussi de rompre avec la ville âge III. Pour lui cette ville présente l'âge de confusion, d'interrogation et de contradiction dans lequel nous nous trouvons, et on doit dépasser ses pratiques et ses apories théoriques. C'est pour une IV ville qui faudra repenser (Levy, 1999).

2.8. Les échelles d'intervention sur la forme urbaine et éléments de classification :

Les échelles spatiales des études varient entre : La ville, le quartier, le groupe d'îlot (voisinage), l'îlot et le bâtiment (Salat, 2011).

La caractérisation de la relation entre la morphologie urbaine, le climat et confort extérieur est étroitement liée à l'échelle géographique et varie entre « échelle micro/locale » qui représente l'échelle des espaces publics, « échelle méso » qui représente l'échelle des quartiers, et l'échelle « macro » qui représente l'échelle de la ville. Ces trois échelles sont étroitement interreliées (Luc, 2009). Notre investigation se développera selon les deux premières échelles.

En outre, le développement durable exige une stratégie cohérente qui applique les outils de planification et de conception à l'échelle appropriée et veille à ce que les actions à une échelle donnée ne seront pas contrariées à une autre. C'est pourquoi il est utile de distinguer les différentes

échelles au niveau duquel les décisions urbaines sont mises en œuvre et les objectifs climatiques de chaque échelle (Mills, 2006).

Le présent tableau (tableau 2.1) présente un résumé des outils (en gris et en diagonale) qui peuvent contrôler le climat à travers les différentes échelles à savoir : échelle du bâtiment, échelle d'un groupement de bâtiments et échelle des villes. Chaque outil est appliqué à une échelle donnée, dévoile un impact sur le climat et conditionne les décisions prises dans d'autres échelles (Mills, 2006).

Tableau 2.2 : Outils de contrôle du microclimat urbain selon les différentes échelles (d'après G. Mills, 2006).

Objectif	Impacts	Limites		
		Bâtiments	Groupement de bâtiments	Ville
Confort intérieur	Bâtiments	Situation Matériaux Conception (ex, forme, orientation...)	Ensoleillement et ventilation Qualité de l'air	Bâtiments Règlement
Confort extérieur et santé	Groupement de bâtiments	Changement du climat local Emission Matériaux /Surfaces Dimension bâtiments Ecoulement d'air Ombre	Implantation des bâtiments Aménagement extérieur Matériaux et surfaces Dimension et orientation de la rue	Recommandations : Densité Hauteurs Occupations des sols et espaces verts
Utilisation d'énergie Qualité de l'air Protection des extrêmes	Ville	Efficacité énergétique Qualité de l'air Effet du climat urbain	Mode et intensité du flux de déplacement Efficacité énergétique Qualité de l'air Effet du climat urbain	Zoning Extensions Forme et transport

Les quartiers urbains peuvent aussi être classés en fonction des caractéristiques des surfaces à partir des cartes ou des photos aériennes. L'utilisation des méthodes numériques offre la possibilité de décerner les différentes formes d'occupation des sols et présentent une source d'une importance progressive.








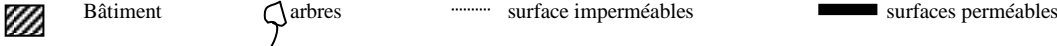
En réalité, et selon Stewart, Chandler (1965) était le premier à avoir proposé une classification des sites dans une ville en fonction des paramètres climatiques. Il a divisé Londres en 04 zones distinguées en fonction de leurs propriétés physiques et les formes du bâti. Suivi par Auer (1978) où il a classifié la ville de Saint Louis en 12 zones en se basant sur le couvert végétal et les propriétés du bâti (Stewart & Oke, 2012).

En se basant sur les aspects météorologiques Ellefsen (1991) a établi une classification de 10 villes nord-américaines en 17 Zones urbaines en fonction de la géométrie urbaine et les matériaux de construction. L'objectif initial de cette classification était l'étude des pluies acides et leurs relations avec la structure et les matériaux urbains (Pringer).

Également et selon les directives de OMM, Oke (2004, 2008) a divisé la ville en 7 entités homogènes baptisées "Zone climatique urbaine" qui varient du semi-rural jusqu'à la zone la plus dense, distinguée en fonction de : leur structure urbaine (espace bâti et non bâti), revêtement (perméabilité),

texture (matériaux), métabolisme (les activités humaines), et le potentiel du changement de surface (Stewart et Oke, 2012).

Tableau 2.3 : Zones climatiques urbaines (UCZ) (d’après Oke 2008).

Zones climatiques urbaines (UCZ)	illustration	Rugosité	Prospect	% Bâti
1-Développement intense, en milieu urbain, immeuble de grande hauteur isolé avec revêtement. Ex : Tours du centre ville		8	>2	>90
2-Développement intense, grande densité avec des bâtiments de 2 à 5 étages, isolés ou jumelés, souvent en brique ou en pierre Ex : vieille ville.		7	1.2-2.5	>85
3-Urbanisation importante, moyenne densité avec maisons en bandes ou isolées, maisons, magasins et appartements Ex : L’habitat urbain.		7	0.5-1.5	>70
4-Forte urbanisation, faible densité avec de grands immeubles bas, parkings pavés, ex: centre commercial, entrepôts,		5	0.05-0.2	75-95
5-Moyennement urbanisé, banlieue de faible densité avec des maisons de 1 ou 2 étages par exemple: logement suburbain,		6	0.2-0.5 >1 pour les grands arbres	35-65
6-Usage mixte, de grands bâtiments avec de grands espaces ouverts, Ex. Institutions telles que l’hôpital, l’université et aéroport		5	0.1-0.5 dépend des arbres	<40
7-Un développement semi-rural avec des maisons dispersées dans une zone naturelle ou agricole, par ex. Fermes, domaines		4	>0.05	<10
				

D’après Wilmers (1997), L’occupation des sols dans les zones urbaines a un effet important sur la dynamique du climat urbain. Les tissus urbains composés des espaces construits et des espaces ouverts peuvent être organisés en « poleotopes » de densités et de structures différentes. Ces « poleotopes » sont associés à des « climatopes » spéciaux formant des « poleoclimatopes ». Selon les propriétés morphologiques de ces structures urbaines, les effets microclimatiques correspondants peuvent varier de manière significative (Wilmers, 1990).

Les climatopes étaient dérivés en fonction du régime des vents, la température, l’occupation du sol, la structure des bâtiments, topographie, et la densité de la population. Ainsi, Wilmers (1991) a identifié neuf zones pour la ville de Hanovre, en Allemagne, en se basant sur la végétation, la structure de la surface, et l’utilisation du sol (Stewart & Oke, 2012).

Toutefois, il n’existe aucun système de classification universel (Pringer & Sylvain, 2005). Selon Stewart ces classifications ne sont pas exhaustives. Les paramètres sur lesquels étaient basées sont limités, comme elles ne peuvent pas être généralisées (Stewart & Oke, 2012) et proposa à son tour une méthode de classification en zones climatiques locales (LCZ) basée sur les étapes suivantes (figure 2.3) :

- 1 - Définir la zone d'influence.
- 2- La collecte des métadonnées du site.
- 3- La Sélection des zones du climat local (Stewart, 2010).

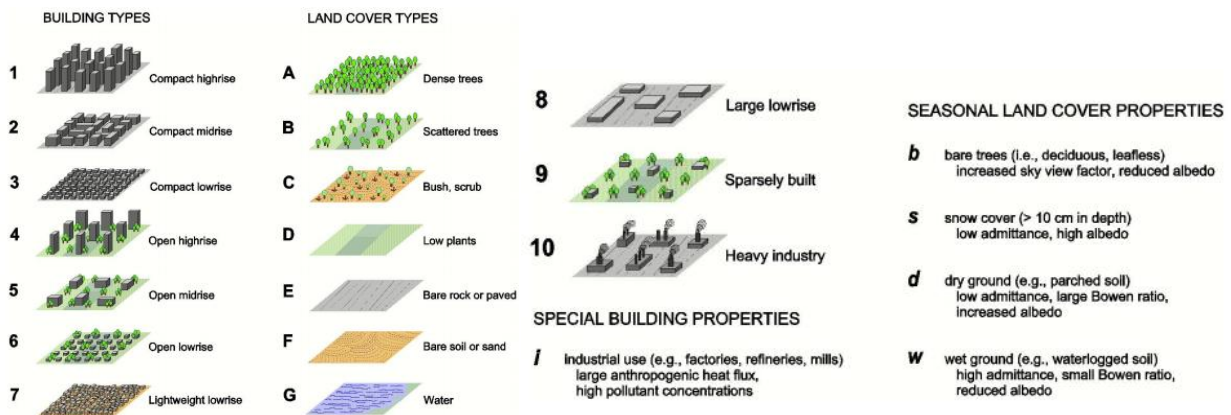


Figure 2.3. Méthode de classification en zones climatiques locales (LCZ)

2.9. Morphologie urbaine et élément de climat/ Eléments de méthodologie :

Les changements de température générés par les sites urbains influent sur la santé et le confort des personnes ainsi que la consommation d'énergie et la qualité de l'air. Il est donc important pour la planification urbaine de connaître les variations de température de l'air à travers les différentes formes d'occupation des sols pour les situations extrêmes et les conditions moyennes (Svensson & Eliasson, 2002).

La géométrie de la ville est un facteur essentiel de la particularité climatique du milieu urbain (Bourbia et al, 2005). Elle est souvent étudiée à travers l'analyse des rues canyons qui représentent un élément "clé" du tissu urbain. En effet, la rue occupe plus d'un quart des zones urbaines, ses caractéristiques morphologiques jouent un rôle important dans la création du climat urbain. Un canyon urbain se réfère à l'espace qui est formé par deux rangées généralement parallèles de bâtiments séparés par une rue et il crée l'unité de base des villes modernes.

La morphologie ou géométrie urbaine accroît l'absorption du rayonnement solaire du fait des multiples réflexions, réduit les transferts hors du canyon des flux de chaleur sensible et diminue les pertes de rayonnements infrarouges du fait de l'effet écran des murs des bâtiments. Elle influence ainsi le climat urbain et modifie l'albédo global de la ville en piégeant le rayonnement.

Bien que, ces éléments ont été largement étudiés, on est toujours à la requête des méthodes quantitatives concernant la meilleure configuration spatiale possible de la rue, sur des bases scientifiques, afin d'améliorer le confort thermique (Shishegar, 2013).

2.9.1. Phénomènes engendrés à l'échelle de la rue

Dans les recherches sur le confort extérieur la géométrie urbaine était souvent abordé sous l'angle de l'impact de l'orientation, le rapport Hauteur/Largeur (H/L) et le facteur de vue de ciel (SVF).

Todhunter P. E. (1990) a analysé le comportement énergétique des canyons urbains de géométries urbaines variables à l'aide du modèle numérique URBAN3. Les bilans énergétiques examinés étaient composés de six scénarios englobant une combinaison de l'orientation Nord-Sud, Est-Ouest, symétrique, asymétrique et alignée pour une journée chaude d'été. Le rayonnement solaire net et le flux de chaleur sensible, étaient montrés très sensibles à la variation géométrie urbaine (Todhunter P. E, 1990).

Swaid et al. (1993) sont considérés parmi les premiers chercheurs qui ont travaillé sur le confort thermique extérieur et sa relation avec la conception des rues. Les rues ont été étudiées en fonction du rapport d'aspect H/L qui varie entre 0,5 et 1, orientées Nord-Sud et Est-Ouest, et situées dans un climat méditerranéen. Les auteurs ont constaté que les conditions de confort sont plus sensibles au rapport H/L qu'à l'orientation de la rue. Le rapport d'aspect H/L = 0,5 présentait les meilleures conditions de confort comparé au rapport H/L= 1. L'orientation Nord-Sud des rues est toujours plus confortable indépendamment des rapports d'aspect des rues pendant toute la journée.

Une autre recherche menée par Bourbia et Awbi (2004) portée sur la comparaison des variations de températures entre un quartier traditionnel et un quartier contemporain dans la ville du désert présentant un climat chaud et sec d'El-Oued, en Algérie. Elle consistait en des mesures de températures de l'air et de surface ainsi que des simulations d'ombre en utilisant le code Shadowpack. Les résultats ont révélé que pendant la période estivale, les rues dans le quartier traditionnel (où le rapport hauteur largeur des bâtiments (H /L), est de 1.5 à 2 sont légèrement plus chaudes la nuit, et sont de 5 à 6 ° C plus froides le jour que les rues du quartier contemporain (où le rapport hauteur largeur des bâtiments est 0,5 à 0,6). La géométrie de la rue et le facteur de vue du ciel donnent de plus petites variations sur la température de l'air que sur les températures de surface.

Eliasson (1990/91, 1996) a également démontré une forte corrélation entre la géométrie urbaine, et plus particulièrement le facteur de vue du ciel, et la température de surface (Figure 2.4).

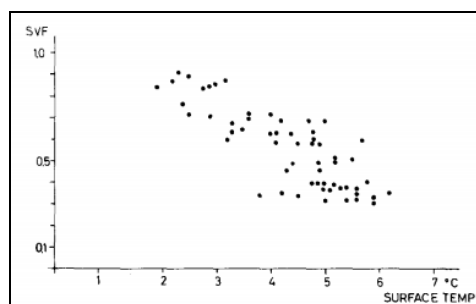


Figure 2.4: Relation entre le SVF et la température de surface, obtenus le 18 Novembre 1987 à 18 :00 et à 22 :00 dans une journée calme (D'après Eliasson 1990/1991).

Une autre recherche était menée par Eliasson à Göteborg (Suède) (1996) afin de mettre en évidence la relation entre la géométrie urbaine et les variations de températures sur une durée de 3ans.

Les mesures effectuées ainsi que la faible variation de température de l'air trouvée lors des études de cas montraient que la géométrie urbaine a une petite influence sur la variation de la température de l'air dans le centre-ville. La différence de température de l'air observée entre le grand parc et le centre-ville (4°C en moyenne) est du même ordre que la différence de température de l'air urbain-rural avec une moyenne de 3,5 à 6 ° C. Les différences entre la température en milieu urbain et celle en milieu rural présentent un bon indice de comparaison entre plusieurs villes, cependant il est difficile de les utiliser à l'échelle d'une seule ville. Une bonne compréhension de l'influence de la géométrie de la rue sur la température à travers de très courtes distances pourrait être plus intéressante, notamment pour la planification urbaine (Oke 1981).

Selon Elliasson, Les travaux sur terrain qui mettent en évidence l'influence de la géométrie urbaine sur la température à l'échelle micro sont rares. La plupart d'entre eux sont des études de cas, avec une période de mesure d'un ou de quelques jours seulement. Le profil des températures urbaines a également été simulé à travers des modèles physiques (Oke , 1981) et numériques de canyon urbain. Cependant ce qu'on reproche à ces études c'est la confusion entre la température de l'air et la température de surface.

Ainsi, elle a montré que, malgré le fait que la température de surface de la rue est influencée par la géométrie du canyon, la température de l'air est gouvernée par d'autres facteurs plus complexes et régionaux. L'absence d'un simple couplage entre les températures de surface et les températures de l'air dans le système urbain a été signalée par Goldreich (1985) et Roth et al. (1989). Des études récentes sur la relation de température de surface/température de l'air ont montré l'importance de la micro advection dans la canopée urbaine (par exemple Roth et al, 1989 ; Stoll et Brazel, 1992).

Oke et Maxwell (1975) ont montré que dans un canyon urbain, la perte de chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde d'une surface est équilibrée par un flux ascendant de chaleur stockée dans un temps calme avec des conditions météorologiques sans nuages (été). Arnfield (1990) a suggéré que cela peut être également applicable aussi lorsque la quantité de la chaleur anthropique est limitée. Les valeurs observées du rayonnement net de grandes longueurs d'ondes montrent une forte corrélation avec les valeurs calculées du facteur de vue de ciel dans différents endroits dans un canyon urbain (Nunez, 1974).

L'étude expérimentale menée par Turkbeyler et al (2011), sur le microclimat urbain généré à partir des tours à Londres a démontré que la disposition et l'orientation des bâtiments influent sur la variation du microclimat d'un endroit à un autre. La route bordée d'arbres était relativement la plus fraîche. La rue canyon ne recevait le rayonnement solaire direct que seulement pour une courte durée et a demeuré relativement fraîche. Les valeurs de température les plus élevées étaient enregistrées dans la rue non végétalisée. Il a été conclu que les bâtiments agissent contre leurs propres variables microclimatiques plutôt que les données météorologiques, leurs microclimats est ainsi affecté par d'autres bâtiments qui les entourent.

R. Giridharana et al (2007), ont mené une recherche sur des unités résidentielles côtières sises à Hongkong afin de discerner les variables morphologiques qui influent sur la variation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Les résultats montraient que ce phénomène atteignait une amplitude moyenne journalière et nocturne de l'ordre de 0.8 et 1.0 respectivement au cours de l'été entre les différentes unités. Cette amplitude atteint 1.5 et 1.41 respectivement pour les journées caniculaires

avec un ciel clair pendant l'été. Elle atteignait 2.1 et 1 respectivement à l'intérieur de ces unités. Les variables morphologiques : Albédo de surface (SA), le facteur de vue du ciel (SVF), l'altitude (ALT), la proximité de la mer (PHS), la hauteur totale au rapport surface totale (HA) sont apparus significativement reliés à la vitesse du vent (WV) et le rayonnement solaire (SRD) comparés aux autres variables tel que : la qualité du matériau de façade (QEM), le rapport entre les surfaces non résidentielles et les surfaces totales dans le projet (NRFD), le ratio entre les surfaces non résidentielles et les surfaces totales du tissu à moins de 300m (NRFAF), le ratio de la parcelle (PR) et le quotient de localisation (LQ)¹. Cette recherche a montré que l'atténuation l'IHU diurne et nocturne peut être obtenue grâce aux : Facteur de vue du ciel, l'albédo de surface, l'altitude, la végétation au-dessus de 1 mn de hauteur, le rapport entre la hauteur moyenne et le plancher, le quotient de localisation et la proximité de la mer. Ces paramètres peuvent être contrôlés à travers la planification urbaine et architecturale contrairement aux autres variables telles que la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Une grande interdépendance était aussi trouvée, entre les variables propres aux sites tel que le facteur de vue de ciel, l'albédo de surface, la végétation au-dessus de 1 m de hauteur et le rapport hauteur moyenne au plancher, et les variables environnantes telles que la proximité de la mer et le quotient de localisation.

2.9.2. Impacts de la morphologie urbaine sur les écoulements de l'air :

Pour Glony, la conception de l'environnement bâti spécialement les rues canyons est un facteur principal dans les modifications de flux d'air. Sacré (2003) a défini l'écoulement de l'air au niveau du sol, dans un site urbain comme le résultat d'interactions complexes entre le vent et les bâtiments. Ainsi La forme et la disposition de ceux-ci modifient l'écoulement incident en générant des régions à pression statique différente, autour des obstacles. Les gradients locaux de pression induisent alors des écoulements secondaires qui se manifestent par des zones de survitesse ou l'existence de rotors et de tourbillons.

Deux catégories d'obstacles doivent être étudiées en fonction de leur impact sur la vitesse locale du vent : les éléments étanches à l'air (ex : les bâtiments) et les éléments poreux (ex : les arbres). Signalons que les constructions forment des écrans permanents tandis que la végétation peut présenter des variations de porosité en fonction de la saison (Reiter.S, 2000).

Al-Sallal et Al-Rais ont étudié la performance de refroidissement passif via la ventilation naturelle et son impact sur le confort thermique en fonction du modèle adaptatif d'ASHRAE dans les contextes urbains modernes avec un climat chaud et humide de la ville de Dubaï. Trois cas ont été simulés dans la zone d'Al-Mankhool en utilisant la dynamique des fluides numérique (CFD). Le comportement général du vent autour des bâtiments et au niveau des piétons était étudié dans le cas d'un écoulement laminaire. Les deux autres cas consistent en la modélisation de la turbulence en hiver et en été. Les résultats obtenues ont révélé que : l'écoulement du vent diminue à la rencontre des bâtiments. Après l'air est canalisé dans les rues les plus larges. En atteignant les cours ouvertes, tels que les aires de stationnement et les parcelles non aménagées, il augmenta sa vitesse. Les valeurs maximales atteignaient 4,55 m/s en été et 5,06 m/s en hiver. Les vitesses étaient plus confortables dans les canyons les plus larges dont le rapport d'aspect est $AR = 1,75$. La vitesse du vent est restée

¹ $LQ = (PP/PR)/(PL/PT)$ où PP est la population dans la ville, PR population dans un rayon de 300m, PL population locale, PT population du territoire.

stable à des valeurs basses (0,51 m/s en hiver comparée à 1,52 m/s en été) avec des fluctuations limitées jusqu'à ce qu'elle rejoigne les cours d'eau ouvertes.

Priyadarsini et Wong (2005) ont constaté que l'implantation de quelques blocs de tours de grande hauteur (figure 2.5) permettra d'améliorer la vitesse de l'air lorsque l'écoulement de l'air est parallèle ou perpendiculaire au canyon ainsi que la réduction dans la température de l'air. En plaçant quelques tours hautes, la vitesse a augmenté à 90% et la température a diminué de 1°C dans le cas où le vent est parallèle au canyon. Dans les cas où le vent est perpendiculaire, la vitesse a augmenté de 10 fois et la température a diminué de 1,1 °C.

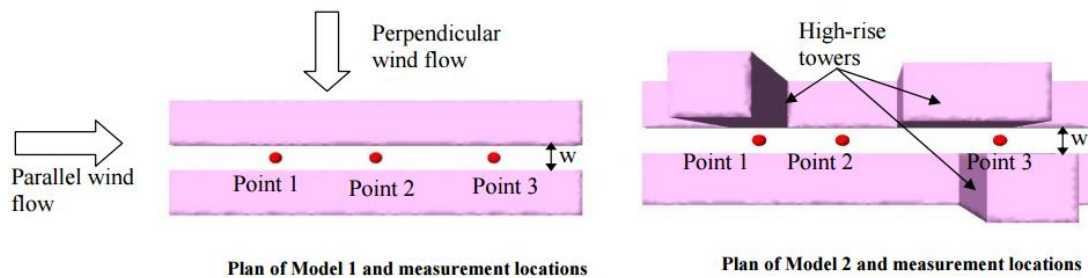


Figure 2.5 : Impact de l'introduction des tours sur le confort thermique (Priyadarsini, 2005)

Robins et Macdonald ont découvert que des sillages supplémentaires créaient un échange d'air supplémentaire et que des tourbillons en forme de U pouvaient se produire en projetant quelques bâtiments hauts avec les bâtiments environnants (Figure 2.6). En amont, les grands immeubles entraîneraient un écoulement vertical de la rue canyon vers la couche limite urbaine. Les bâtiments en aval créeraient un écoulement vertical supplémentaire à partir du niveau bas de la couche limite urbaine vers la canopée urbaine. En outre, la mise en place d'ouvertures adéquates entre les rues et les cours améliorera l'échange d'air à l'intérieur de la canopée urbaine (Shishegar, 2013).

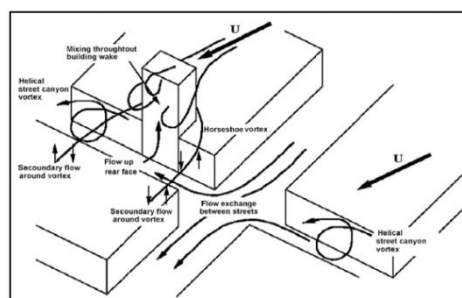


Figure 2.6 : Écoulement de l'air dans une intersection d'une rue avec un grand bâtiment indiquant les échanges entre la rue et les processus de mélange supplémentaires engendré à cause du grand bâtiment.

2.9.3. Impact de l'orientation sur l'écoulement d'air :

L'orientation de la rue joue un très grand rôle sur l'écoulement d'air. Pour les parties périphériques les rues qui sont alignées avec l'orientation des vents dominants sont soumises à une profonde pénétration du vent qui se dirige par la suite vers la ville. Dans un climat froid et sec, ce phénomène conduira à la baisse des températures et accélèrera le refroidissement de la ville, et accentue la consommation d'énergie pour le chauffage. Dans un climat chaud et sec, les vents sont chauds et

poussièreux pendant le jour et froid vers la fin de la nuit. Les maisons situées dans les zones périphériques consomment plus d'énergie pour le chauffage ou le refroidissement que ceux situées au centre -ville. Dans un climat chaud et humide, le vent est avantageux parce qu'il participe au refroidissement de la ville (Glony, 1995). Dans le cas de la présence des brises de mer, elles peuvent être très efficaces quand les rues sont conçues perpendiculairement au bord de la mer. Les rues étroites et sinueuses ralentissent le processus d'évaporation et ont une humidité relative plus élevée que les rues les plus larges dans la même ville (figure 2.7).

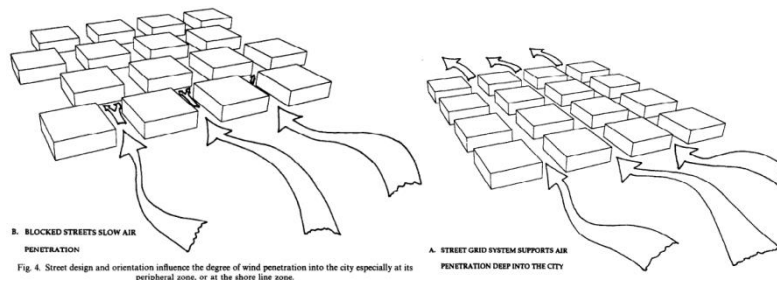


Figure 2.7 : Impact de l'orientation sur l'écoulement d'air (D'après Glony.G, 1995).

2.9.4. Echanges radiatifs et thermiques dans le milieu urbain :

En général, un tissu urbain compact tend à réduire la pénétration solaire dans les canyons étroits, mais peut entraîner un « piégeage » à la fois du rayonnement à courtes et longues longueurs d'ondes, ainsi que réduire la perte de chaleur par convection (Pearlmutter et al).

Les zones urbaines reçoivent une quantité du rayonnement à travers les façades des bâtiments, les toits et le sol. Les rues canyons contrôlent la quantité du rayonnement solaire reçu ainsi que le confort thermique des piétons (figure 2.8).

Les effets radiatifs urbains définissent des comportements physiques mettant en relation les configurations spatiales et le degré d'échange thermique radiatif.

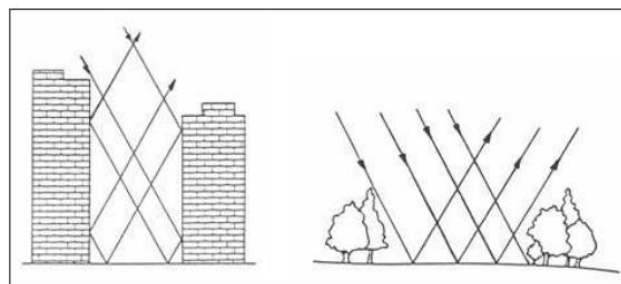


Figure 2.8: Le piège radiatif à l'échelle de la rue (Griffiths, 1976).

Les facteurs intervenant dans la caractérisation radiative des impacts sont: les surfaces, le ciel et le soleil. Ces manifestations sont exprimées de manière relative, et définissent le degré d'influence d'une transformation physique d'un milieu urbain. Les types d'influences ressortis se caractérisent soit par leurs aspects positifs (apports, contributions) ou négatifs (pertes). L'analyse d'impact repose

également, sur la définition de grandeurs physiques ou géométriques qui expriment cette évolution de situation radiative (Tirraoui, 2000).

Plusieurs études ont évalué l'impact de la géométrie de la rue et son orientation sur l'ensoleillement dans un canyon urbain (Arnfield, 1990) a étudié la quantité de rayonnement solaire reçu dans différents canyons urbains orientés E-O et N-S, en utilisant une méthode numérique pour toutes les latitudes et durant toutes les saisons. En outre, le rapport d'aspect du canyon H/W varie de 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 et 4.0. L'albédo uniforme est de 0,3 et 0,15 pour les murs et le sol, respectivement. L'évaluation des irradiances moyennes mensuelles a montré que le rapport H/W influence en premier lieu la quantité d'énergie solaire reçue par les bâtiments et le sol. En réduisant le rapport H/W, la quantité d'énergie solaire reçue par les surfaces de la rue augmente (Figure 2.9). Cependant, cette énergie n'est pas uniformément répartie sur les différentes surfaces de la rue. En effet, le sol reçoit plus de rayonnement solaire par rapport aux surfaces verticales (murs). Pour le même canyon urbain, il a trouvé que le rapport H/W influence le sol plus que les murs.

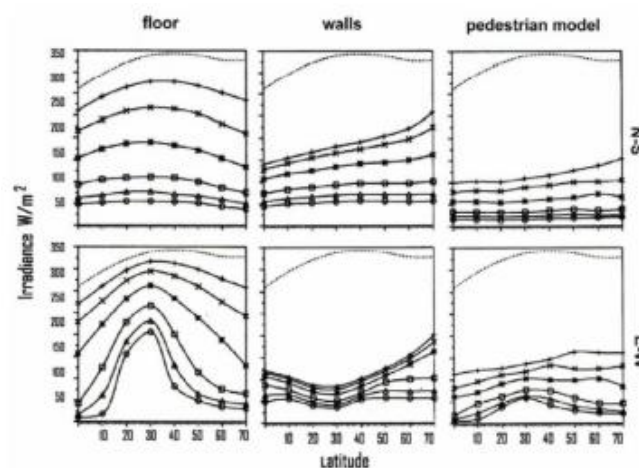


Figure 2.9 : Rayonnement mensuel moyen, juin, pour deux canyon orienté E-O et N-S avec de différents rapports d'aspect, les symboles +, x, *, □, Δ, ○ correspondent à H/W=0.25, 0.5, 1, 2, 3 et 4 respectivement (D'après Arnfield, 1999).

Dans cette étude Arnfield a découvert que l'orientation de la rue est la plus d'influence sur la quantité du rayonnement solaire reçue par les murs alors que le rapport H/W influence la quantité du rayonnement solaire reçue par le sol. De plus, l'impact de l'orientation est plus important en été qu'en hiver. Comme les murs de bâtiments orientés N-S (c'est-à-dire les rues E-O) sont protégés en été et exposés en hiver, le contrôle solaire saisonnier est plus facile pour cette orientation. Pour les latitudes les plus élevées, la position du soleil est plus basse en hiver et crée des obstacles très forts. Ainsi, la quantité du rayonnement est réduite pour les latitudes élevées et ceci est particulièrement évident pour l'orientation E-O. Les effets du rapport H/W et l'orientation des rues sur la réception de l'énergie solaire par le sol et les autres surfaces de la rue sont plus significatifs dans les latitudes 20°-40° pour les différentes saisons. Cela montre que dans les climats subtropicaux, la géométrie des rues joue un très grand rôle sur l'ensoleillement (Arnfield, 1999).

Dans une autre étude menée sur des rues plus larges, avec une bonne circulation d'air qui permet une très bonne ventilation surtout avec des bâtiments de différentes hauteurs.

Oke (1988) a essayé de trouver une « zone de compatibilité » entre les rapports d'aspect d'une ville hypothétique de latitude moyenne, avec un important rapport d'aspect H/W pour assurer la

protection contre l'excès de chaleur et un petit rapport d'aspect H/W pour améliorer la diffusion de la pollution et l'ensoleillement. Il suggère que l'intervalle de $0,4 < H/W < 0,6$ représente un compromis acceptable pour répondre à ces critères. Comme il a suggéré un autre intervalle pour la rugosité $0,2 < r < 0,4$.

Plusieurs villes de latitude moyenne connaissent des fréquences élevées de nuages en hiver, la quantité de rayonnement diffus pour la lumière du jour est également importante. Le critère conventionnel des spécialistes de la lumière du jour est qu'une H/W de 0,58 est approprié pour une latitude de 45° . Les rapports correspondants à 40° et 50° sont respectivement de 0,70 et 0,46 (figure 2.10). Par conséquent, Oke (1988) a conclu qu'un H/W d'environ 0,6 semble être une limite supérieure appropriée pour maintenir l'accès solaire dans une ville à une latitude de 45° .

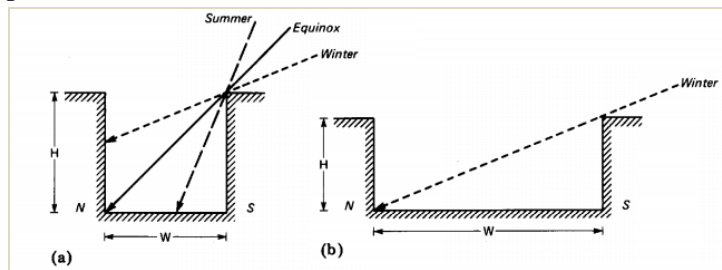


Figure 2.10: Angles d'incidence du rayonnement solaire direct à midi dans une rue E-O, pour une latitude $45^\circ N$.
(a) canyon avec $H/W = 1.0$; (b) $H/W = 0.40$.

N. Mohajeri et al. Ont essayé de démontrer l'impact des formes et des tailles des bâtiments, le tracé des rues, et la distribution spatiale des bâtiments et des rues sur le climat urbain dans 16 quartiers dans la ville de Genève (Suisse), les résultats montraient que la distribution des aires urbaines, les périmètres et les volumes des bâtiments suivent la loi de puissance, alors que les hauteurs des bâtiments suivent une distribution bimodale (deux pics). La formule de l'entropie de Gibbs- Shannon comme une mesure de la dispersion, était utilisée pour calculer les surfaces, le périmètre, le volume et l'entropie des hauteurs. Les résultats ont montré que les entropies ont de fortes corrélations positives ($R^2 = 0,43$ à $0,84$) avec les valeurs moyennes de ces paramètres. En revanche, il existe des corrélations négatives ($R^2 = 0,39$ à $0,54$) entre la densité de construction ou la compacité (occupation du site et le ratio volume-surface) et l'entropie des surfaces de construction, des périmètres et des volumes. La longueur de la taille des distributions calculées des rues montre des corrélations négatives ($R^2 = 0,70$ à $0,76$) avec le nombre de rues par unité de surface ainsi que la longueur totale de la rue par unité de surface (figure.2.11). Une corrélation négative entre la densité de construction et de rayonnement solaire ainsi qu'entre les densités de la rue et le rayonnement solaire. Par contre il existe une corrélation positive entre l'entropie de la longueur de la rue et le rayonnement solaire.

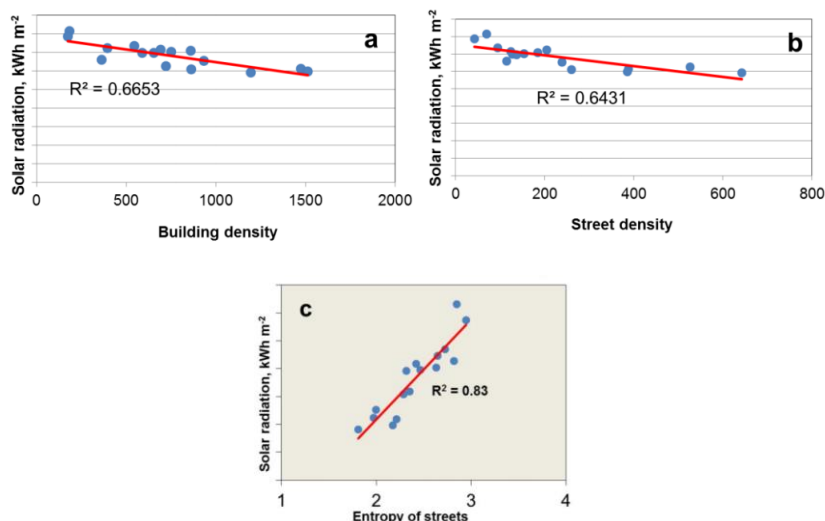


Figure. 2.11 : A) Variation de l'entropie longitudinale du réseau routier de Genève. B) Variation du rayonnement solaire annuel reçu à Genève. C) Corrélation entre le rayonnement solaire annuel reçu et l'entropie des rues dans les 16 quartiers de Genève.

La densité de construction et de rue joue un rôle important sur la production potentielle d'énergie solaire. L'étude menée à Genève a montré que les zones les plus dispersées de la ville reçoivent beaucoup plus de rayonnement solaire, et ont donc beaucoup plus de potentiel pour produire de l'énergie solaire, que les parties denses, où vraisemblablement les toits (Ou une partie d'entre eux) et plusieurs façades sont à l'ombre pendant une partie de la journée.

Néanmoins, la morphologie de la rue est rarement typiquement canyon. En effet de nouvelles formes, dérivées de la forme continue ont été étudiées par Ali-Toudert et Mayer : le profil avec des galeries, la forme asymétrique qui a une grande accessibilité au soleil et la forme asymétrique surplombante (Figure 2.12). Ces nouvelles formes ont été comparées avec la forme de référence afin d'étudier la relation entre leurs géométries, et les conditions microclimatiques ainsi que le confort thermique des espaces extérieurs. L'étude a été menée pour différentes orientations et le confort thermique a été évalué en fonction de l'indice de confort PET. Les résultats de l'analyse ont montré que le profil asymétrique génère des conditions thermiques plus stressantes que la rue typique, sauf très tôt le matin du fait de la grande ouverture vers le ciel. Les façades surplombantes sont plus confortables pour les orientations Nord-Sud et Nord-Ouest/Sud-Est. En plus, l'utilisation des galeries crée des zones ombrées et contribue à l'amélioration du niveau du confort.

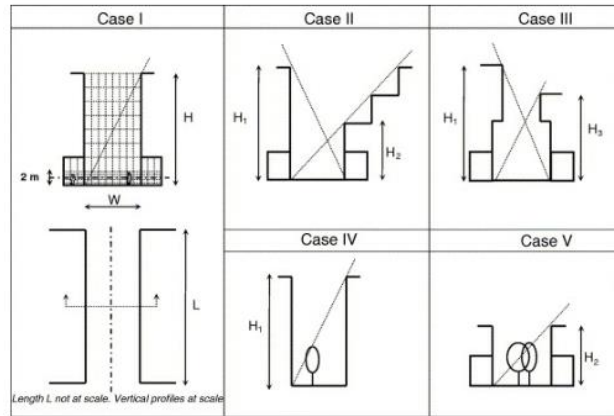


Figure 2.12. Les différents Profils de la rue (d'après Ali-Toudert).

Afin, d'évaluer l'impact de la géométrie de la rue sur le contrôle du rayonnement solaire Djenane et Bensalam (2005), ont examiné plusieurs géométries dans les régions chaudes et arides (figure 2.13). Deux variables ont été considérés : l'orientation de la rue : Est/Ouest, Nord-Est/Sud-Ouest et Nord-Sud, et la configuration géométrique de la rue en fonction du profil de la forme bâtie et le SVF.

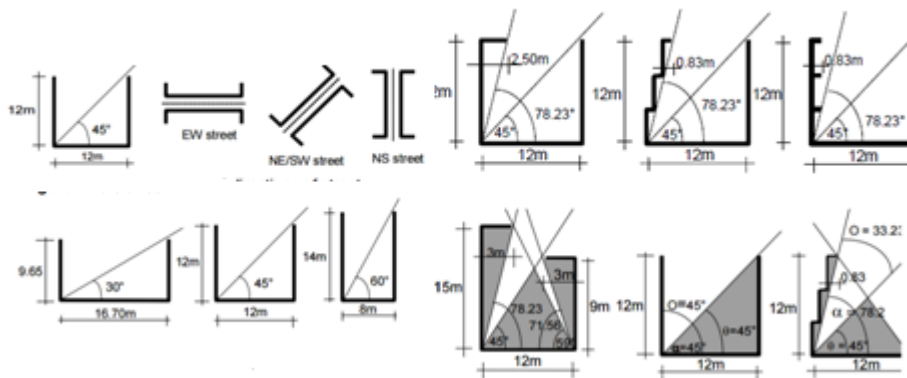


Figure 2.13 : Orientation, SVF et profil de la forme bâtie.

Le contrôle du rayonnement solaire ne se limite pas à l'impact du rapport H/W ou l'orientation. Ces deux indicateurs ne permettent pas de caractériser correctement l'influence de la forme de l'espace extérieur et ne donnent pas suffisamment d'informations sur les possibilités de modification du flux solaire incident à l'échelle de la rue. Cette étude a également montré l'influence de la forme spatiale par rapport à celle de l'orientation et laisse apparaître l'intérêt d'une qualification appropriée des propriétés spatiales de la rue assurant un suivi et une évaluation efficaces du rayonnement solaire incident. En conséquence, la définition de la forme spatiale d'une rue sur la base de son ouverture vers le ciel permet de mieux évaluer sa contribution au contrôle du rayonnement solaire incident.

2.9.5. Le rôle de la végétation

L'arbre joue un rôle d'humidificateur de l'air. L'eau absorbée par les racines est transmise aux feuilles. Une partie est utilisée dans la production de la sève et l'autre partie s'évapore dans l'atmosphère (transpiration).

Des études suggèrent que pour une ville avec une population d'environ un million, 10-20% de la superficie de la ville devrait être couverte par la végétation pour réduire efficacement les températures. Avec une couverture végétale de 20 à 50%, la température minimale de l'air diminue de 3-4 ° C, et la température maximale d'environ 5 ° C (Brown & De Kay, 2001).

Il est important de noter que contrairement aux dispositifs inertes, les arbres peuvent changer leur dimension et leur degré d'opacité pendant chaque saison, et aussi pendant leur durée de vie. Par conséquent, et même si les variations entre les arbres peuvent être considérées comme esthétiquement agréables, le concepteur doit être conscient du modèle d'ombrage produit. A savoir: 1) comment les modèles d'ombre peuvent être fournis en été quand il est nécessaire; (2) comment augmenter la pénétration solaire pendant la période hivernale lorsque c'est nécessaire; Et (3) quels sont les arbres fournissent ces effets désirés pendant la période pertinente de l'année (Andre Santos Nouri, 2015).

Limor Shashua-Bar et al (2012) ont utilisé l'indice du confort (PET) pour évaluer les niveaux de confort dans une rue typique d'Athènes. Quatre cas ont été étudiés: (1) l'augmentation de la zone de couverture de la canopée de l'arbre de 7,8% à 50%; (2) réduction du flux du trafic de deux voies à une seule voie, soit une réduction approximative de 1500 véhicules à 750 par heure; (3) augmentation de l'albédo des parois latérales adjacentes de 0,4 à 0,7 en utilisant des couleurs plus claires; et enfin; (4) augmentation du rapport d'aspect (proportions hauteur / largeur) de 0,42 à 0,66 en ajoutant deux étages supplémentaires (environ 6 m). Les résultats ont montré que le scénario le plus efficace est celui de l'augmentation du couvert végétale, qui a entraîné une diminution de 1,8 K pendant les heures les plus chaudes de la journée.

2.9.6. Matériaux de surface

Les propriétés thermiques et radiatives des matériaux utilisés en milieu urbain ont une incidence importante sur le bilan thermique de ce dernier. La réflectivité (ou albédo) des matériaux vis-à-vis du rayonnement solaire, tout comme leur émissivité, sont les paramètres radiatifs les plus importants.

Selon Setaih et al (2013), l'augmentation de la réflectivité d'un matériau de 0.25 peut réduire significativement sa température de 10°C, comme elle permet de garder sa surface fraîche sous le soleil et ainsi réduire le transfert de chaleur par convection.

La géométrie urbaine a une influence directe, sur l'albédo total de la ville. En effet, l'albédo total du système urbain dépend à la fois des albédos des matériaux qui le composent et de la géométrie du cadre bâti. Ainsi pour des bâtiments de même hauteur, l'albédo d'une surface ramifiée est plus faible que celui d'une surface plane composée du même matériau (Oke, 1988). Cet effet augmente avec la latitude, il est plus préféré pendant les saisons où le soleil est bas. De plus, il augmente avec

l'augmentation du rapport d'aspect H/W , comme il est plus important dans les rues canyons orientées Est-Ouest que Nord-Sud (Oke, 1988).

L'étude de Aida et Gotoh (1982), citée par Oke (1988), reliant l'albédo de différents canyons où $W1$ est la largeur des éléments de bloc et $W2$ est la largeur intérieure de la rue. $W1/W2$ est proportionnelle à $W1 / (W1 + W2)$, et donc à « r », pour un tracé régulier. La figure 2.14 montre que lorsque H/W est maintenu constant à l'unité, il y a un albédo minimum pour le système pour la valeur $\log (W1/W2) = -0.3$ à -0.6 . Cela signifie que dans les cas où l'on souhaite maximiser l'absorption, dans les régions à mi-latitude dans la saison froide, le rapport $W1/W2$ idéale est d'environ 0,5. Dans le cas des blocs de longueur semi-infinie la valeur de « r » sera proche de 0,33.

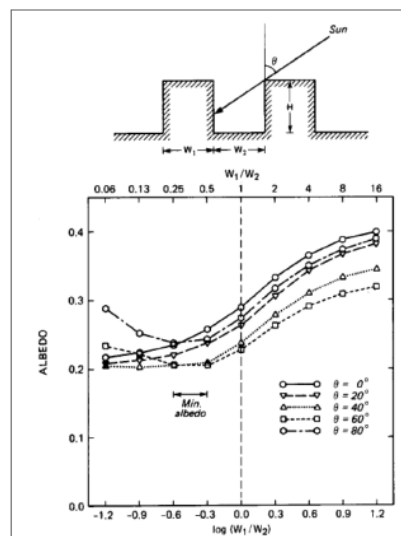


Figure.2.14 : Influence de la géométrie urbaine, décrite par le ratio $W1/W2$, et de l'angle du soleil θ sur l'albédo global. Fondée sur des simulations avec $H/W2 = 1,0$ (Oke (1988)).

Bien que l'absorption du rayonnement solaire augmente en réduisant les valeurs de l'albédo, cette augmentation n'atteint pas nécessairement le sol qui peut dans certains cas être à l'ombre. En effet Certains arrangements géométriques peuvent réduire l'absorption du rayonnement comparés à un site vierge (Oke 1988).

Yamashita et al. (1986) ont également mis en avant pour plusieurs villes de la banlieue ouest de Tokyo le fait que le facteur de vue du ciel est un indicateur pertinent pour qualifier l'effet de l'urbanisation sur l'intensité de l'îlot de chaleur. Cependant Paul Gut a mentionné dans son livre «Climate responsive building : appropriate building construction in tropical and subtropical regions » que l'effet de la réflectivité et la masse thermique des surfaces sur le confort thermique n'est pas toujours perceptible. Ce qui contredit plusieurs recherches qui ont recommandé l'utilisation des couleurs claires de surfaces pour maintenir la température de surface faible pendant la saison chaude. En effet malgré que les matériaux hautement réfléchissants sont susceptibles d'avoir un effet positif sur le confort thermique, le maintien de ces couleurs claires est difficile en raison de la poussière dans les climats chauds et secs. En outre, les couleurs trop lumineuses peuvent engendrer des problèmes d'éblouissement (El Hozayen.A, 2013).

2.9.7. Modèles élémentaires des formes construites génériques :

Les géométries présentées dans les travaux de climatologie urbaine pour décrire les surfaces bâties sont souvent réduites à des profils types des canyons définis par leur prospect. La ville est le plus souvent assimilée, dans les modèles de la climatologie urbaine, à un système de rues canyon. On considère ainsi que la forme urbaine peut être réduite à une agrégation de rues similaires ayant une forme linéaire avec une longueur infinie. Mais l'adoption d'un tel modèle simplificateur de la forme urbaine, considère une homogénéité parfaite de la forme urbaine : mêmes rues, symétrie parfaite des deux côtés de la rue, absence d'intersections et d'ouvertures latérales, etc. Le seul paramètre H/L du canyon (hauteur/largeur) suffit à décrire, dans ces cas, la forme urbaine. (Benzarzur, 2002).

Néanmoins, des études peuvent être appliquées sur des formes théoriques inspirées des formes urbaines existantes complexes qui peuvent aider à établir des guides qui serviront au design urbain où sur des cas existants.

En ce qui concerne la forme bâtie, Martin et March ont examiné un certain nombre d'archétypes (Figure 2.15) ; ce choix leur a permis de simplifier la complexité des tissus urbains. Le choix et la définition de ces archétypes simplifiés sont devenus très populaires dans les études génériques et ont été largement adoptés.



Figure 2.15: les formes de base génériques de Martin et March du gauche à droite : pavillonnaire, dalles, terrasse, terrasse-cours, pavillonnaire-cours et cours.

Les premières recherches sur les formes génériques ont été portées sur deux formes : cours et pavillons. Les cours ont été tirées des formes de constructions traditionnelles et les pavillons à partir des formes de constructions contemporaines, qui sont devenues populaires après le mouvement moderne.

En effet, l'approche de Martin et March est générale, il est admis que la réponse à la question "formes urbaines les plus optimales" ne peut être absolue. Avec la prise en compte des variables environnementales, aux plusieurs oppositions surgissent, ainsi les termes tels que « meilleur » et « optimum » incarnent des jugements de valeur qui résolvent ces conflits. Il y a des combinaisons presque infinies de différents contextes climatiques, des géométries urbaines, des variables climatiques et des objectifs de conception. Évidemment, il n'existe pas de solution unique ou des géométries universellement optimales". Malgré cela, il y a des types urbains prédominants qui sont associés à certains types de climat, tels que le type de cour avec le climat chaud-aride (Ratti et al, 2003).

Plusieurs recherches ont montré l'impact de la densité sur l'ensoleillement et l'éclairage. Cette influence se manifeste à travers les valeurs du coefficient d'emprise au sol et le coefficient d'occupation du sol (Huang et al.).

Yuan Huang et al ont comparé trois modèles élémentaires représentatifs d'un aménagement uniforme : quartiers de dalles, de pavillons et de cours (figure 2.16).

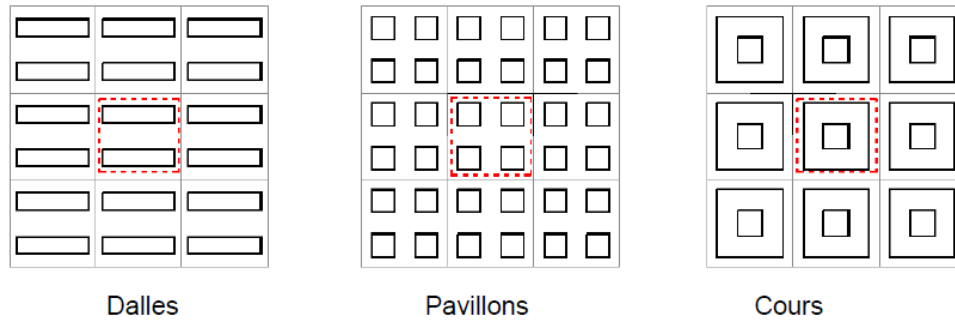


Figure 2.16 : Comparaison des consommations selon trois modèles élémentaires des formes urbaines (d'après Yuan Huang)

Le quartier de dalles était le cas le plus intéressant pour assurer une bonne performance énergétique solaire et l'augmentation de l'efficacité énergétique des bâtiments. Le quartier pavillonnaire est le cas le moins favorable. La comparaison est effectuée selon les paramètres suivants : Coefficient d'occupation des sols (COS), orientation de quartier, rapport entre la largeur des rues dans les deux directions et l'aménagement de formes urbaines, à travers ses dimensions horizontales et verticales.

Cheng et al. (2006) ont comparé entre quatre dispositions de construction (Figure 2.17) : (homogène, homogène), (homogène, hétérogène), (hétérogène, hétérogène) et (hétérogène, hétérogène).

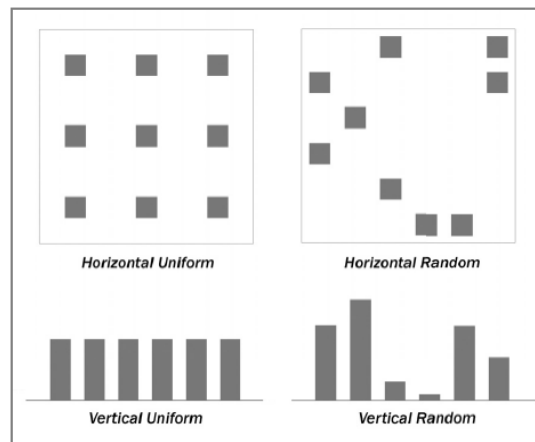


Figure 2.17: Vue de face et vue de dessous des quatre dispositions des constructions (d'après Cheng et al. 2006)

Le COS présentait quatre types de densité : 1.4 pour la densité faible, 3.6 pour la densité moyenne et 7.2 pour une densité forte. Quant à l'occupation au sol deux valeurs ont été prises 9% et 36%.

L'ensoleillement et l'éclairage étaient évalués en fonction du programme PPF qui se base sur la méthode Monte Carlo, le SVF par un modèle d'élévation digital DEM.

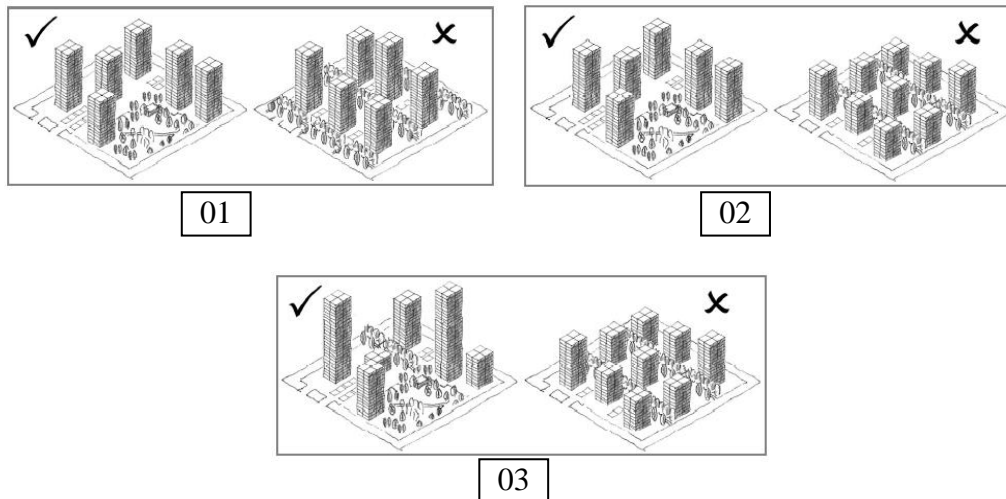


Figure 2.18: Comparaison entre les différentes formes d'occupations et les différentes hauteurs.

Les résultats de cette recherche ont montré que (Figure 2.18): Une implantation hétérogène est préférable à l'homogène. L'implantation des bâtiments hauts avec une faible empreinte au sol est préférable à celle avec des bâtiments bas et CES important. La variation dans les hauteurs des bâtiments est très recommandée.

D'après Ratti et al. (2003), l'utilisation des techniques innovantes pour l'analyse de l'environnement urbain en se basant sur le traitement d'image, offre une approche intégrée de la recherche dans la complexité du comportement environnemental du contexte urbain. La question des formes urbaines les plus optimales est directement liée à : la meilleure occupation du sol et la forme du bâtiment. L'occupation peut être liée à des paramètres quantifiables, tels que le potentiel de construction (rapport de la surface de plancher de la forme construite à la surface du sol) et la disponibilité de la lumière du jour. Dans leur analyse de l'impact des formes urbaines sur le climat aride, ces chercheurs ont examiné les paramètres suivants :

- Indicateur de la surface de l'enveloppe du bâtiment exposée à l'environnement extérieur. Il représente le rapport entre surface et le volume, obtenu en divisant la surface totale des bâtiments (façades+ les toits) par leur volume.
- La densité de l'ombre, un paramètre basé sur la détection des ombres sur le sol à intervalles horaires sur un morceau de ville pour une journée donnée de l'année. Le nombre moyen d'heures d'ombres est alors calculée à chaque point. Pour ce paramètre, une simulation de l'observation a été réalisée pour un jour d'été (21Juin) à une latitude de 38°N, qui correspond à la latitude de la ville de Marrakech.
- La distribution de la lumière du jour, mesuré en valeurs « de facteur de lumière du jour » dans les rues. Pour cette tâche, le modèle choisi du ciel pour la simulation est le ciel couvert standard de la CIE.
- Facteur de vue du ciel, ce qui représente l'ouverture de la texture urbaine vers le ciel, souvent associée, avec d'autres indicateurs, au phénomène d'îlot de chaleur.

Les résultats de leurs recherches ont montré l'importance de la solution ingénieuse de la maison avec cour dans les climats chauds-arides grâce à l'utilisation de la masse thermique pour stocker la chaleur

pendant la journée afin de la restituer pendant les nuits les plus fraîches. En maximisant la surface par rapport au volume, les cours actent comme un piège de chaleur et par conséquent, limitent le stress thermique extrême, et réémettent cette chaleur à l'intérieur et vers le ciel de nuit. Ainsi, la plus grande surface par rapport au volume de cours, en association avec sa masse thermique, est un avantage positif dans la performance thermique de l'immeuble.

Compagnon (2000) a étudié l'ensoleillement et le potentiel passive (chauffage, éclairage et photovoltaïque) de cinq scénario d'aménagement (figure 2.19) de différentes densités. Il a employé la rose d'orientation qui consiste en le calcul de la surface orientée vers chaque direction pondérée par des valeurs calculées sur la base des facteurs de vue de ciel en comptant les surface de façade pour chaque secteur d'azimut.



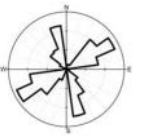


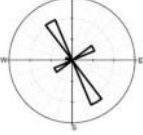





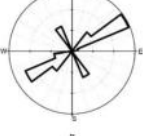


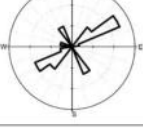
Urban area	View	Plan	Orientation rose	Facades annual irradiation per square meter floor area (kWh m ⁻²)	Potential for passive solar heating techniques (%)	Potential for photovoltaic systems (%)	Potential for daylighting systems (%)	Potential for solar thermal collectors (%)
Whole area (present situation):plot ratio = 1.2				224	32	6.5	54	50
Stripes (10 storeys) plot ratio = 2.0				309	52	21	82	70
Comb (six storeys) plot ratio = 2.0				251	49	21	68	69
Courtyard (six storeys) plot ratio = 2.0				215	37	16	69	67
Stepped slab blocks (five and eight storeys) plot ratio = 2.0				290	52	17	83	82

Figure 2.19: Evaluation du potentiel et de l'éclairage naturel et du solaire thermique et photovoltaïque selon cinq scénarios (Compagnon. R, 2000).

Panao et al. (2008) a développé un algorithme qui permet de rechercher les formes urbaines les plus optimales dans les climats de moyennes latitudes (35-50 °). Les indicateurs employés sont : FSI, définie comme le rapport de la superficie totale occupée par les bâtiments (la somme des surfaces de tous les planchers) sur la superficie totale considérée, nombre d'étages, rapport de longueur de bâtiment, azimut de la trame et le rapport d'aspect dans les deux directions. Les variables utilisées sont : nombre d'étages ($n = H/3$), rapport de profondeur du bâtiment ($l = Lx / Ly$), l'azimut de la trame (δ), la dimension du bloc de base ($L = Ly$) et le rapport d'aspect sur les deux orientations (H/Wx et H/Wy) (voir figure 2.23). Chaque forme urbaine de base est obtenue selon le rapport de profondeur

du bâtiment : bloc pavillonnaire ($l = 1$), dalles courtes ($l = 2-5$), dalles longues ($l = 6-9$) et terrasses ($l > 10$). Les résultats obtenus montrent qu'une planification urbaine adéquate, basée sur la prise en compte des conditions locales de rayonnement en fonction de la latitude, peut améliorer significativement la performance thermique du bâtiment. Les latitudes les plus élevées sont plus restrictives en termes de solutions optimales : les formes pavillonnaires (blocs carrés transversaux) présentent la meilleure solution pour la latitude de 50° . Les terrasses (blocs de longueur infinie) sont préférées pour 45° . Pour les latitudes inférieures, toutes les formes urbaines sont possibles. En termes d'angle de la trame avec la direction cardinale, l'angle recommandé est entre -15° et $+15^\circ$, à l'exception de la latitude de 50° où il peut varier de -45° à $+45^\circ$. Pour les formes urbaines en dalles et terrasses, il faut maximiser l'espacement entre les blocs dans la direction Nord-Sud. Ce dernier est évalué par le rapport entre la hauteur du bâtiment et la largeur de la rue, il diminue avec l'augmentation de la latitude, allant de 0,6 pour la latitude 35° , à 0,4 pour la latitude 45° . Pour les formes pavillonnaires, le rapport d'aspect nord-sud est indépendant de la latitude et devrait rester proche de 0,7. Cette forme urbaine permet le plus grand nombre d'étages (Figure 2.20).

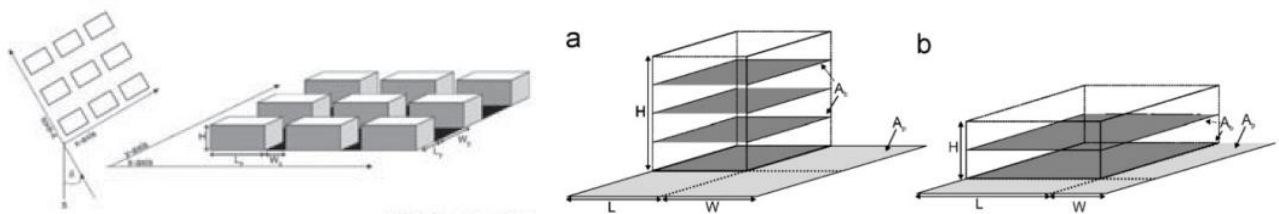





Figure 2.20: Représentation schématique de l'indice de plancher (FSI) égale à 1.0: (a) quatre étages (Type individuel); (b) Deux étages (Type individuel), (Panao et al. (2008))

2.9.8. Recherches à l'échelle d'un fragment urbain :

Fahmy et Sharples (2008) ont étudié les formes urbaines hybrides traditionnelles et modernes au Caire afin d'établir un outil de planification urbaine pour le refroidissement passif. Des simulations numériques ont été réalisées pour une journée chaude d'été pour différentes configurations de rue canyon.

D'après ces chercheurs, Le Caire se dispose d'un tissu urbain hybride composé de l'architecture urbaine vernaculaire compact et l'architecture urbaine occidentale basée sur des formes urbaines isolées (Tableau 2.4).

Tableau 2.4: Typologie des trois sites étudiés au Caire (d'après Fahmy et Sharples (2008))

		
<p>Tissu dense, plusieurs familles avec un faible revenu des appartements, des bâtiments en RDC +4</p>	<p>Tracé orthogonal, plusieurs familles avec un revenu important des appartements, des bâtiments en RDC +3</p>	<p>Le troisième site est composé de type bâtiments isolés en R+3 occupé par plusieurs familles avec un revenu élevé des appartements et des villas</p>

Les paramètres analysés sont : (A_u) est la surface totale, A_g est la surface totale de l'emprise des bâtiments, (C_p) est le pourcentage de la partie construite, C_d est la densité des bâtiments, (P_d) est la densité de la population sur site. Les simulations étaient entreprises pendant la période la plus chaude (fin juin, début juillet) pendant trois période de la journée à savoir : 9h 12h 15h en prenant en considération seulement les bâtiments et les surfaces vertes (sans les arbres).

La forme dense a enregistré de bons résultats en matière de confort thermique pendant le jour mais pas pendant la nuit, comme elle n'est pas recommandée pour des raisons sanitaires liées à la mauvaise ventilation. Une densité moyenne peut expérimenter un accès moyen au soleil et au vent à condition que les rues soient protégées quand le soleil est en position verticale. Les formes tramées ne permettent pas la ventilation des cours intérieures. Le troisième cas est caractérisé par un accès considérable au vent et au soleil accompagné par une grande quantité de rayonnement incident, une grande emprise du sol avec faible densité de la population. Le système mixte peut présenter une bonne amélioration du système traditionnel en permettant l'ensoleillement et la ventilation et en se protégeant contre les vents froids.

Marique et al. Ont étudié l'influence d'une augmentation de la densité construite dans les quartiers suburbains existants en Belgique. L'idée est de favoriser une densité plus élevée dans les quartiers existants au lieu de construire de nouveaux quartiers de faible densité sur des zones non bâties. Quatre scénarios relatifs à la densité sont évalués à l'échelle d'un quartier en fonction de trois indicateurs : consommation du chauffage, les gains solaires reçus par les façades et les toits ainsi que l'occupation du sol (figure 2.21).

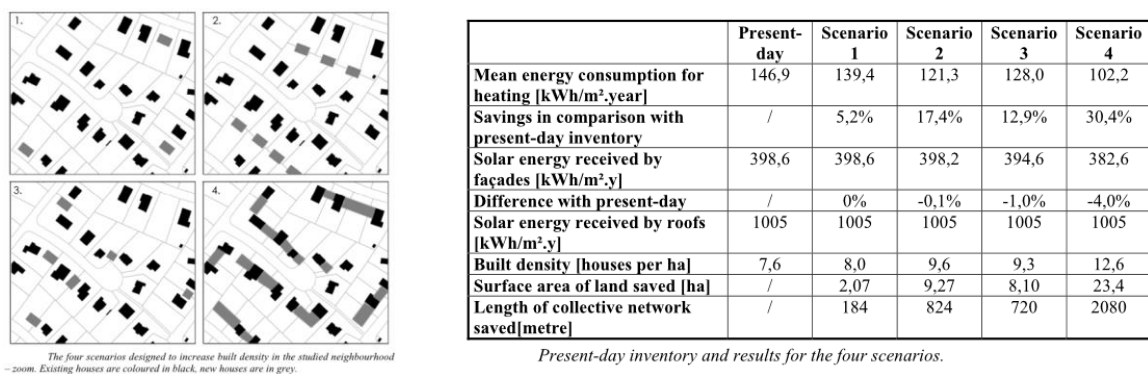


Figure 2.21 : Comparaison entre les quatre scénarios d'aménagement de Mariaque et al.

Des économies en énergie significatives sont obtenues grâce à l'augmentation de la densité du quartier. Des effets positifs sont obtenus à travers la construction de nouvelles maisons bien isolées grâce à la diminution de la consommation énergétique moyenne à l'échelle du quartier, même si les maisons sont encore détachées (-17,4% dans le scénario 2). Comme la densité actuelle est très faible, l'ajout de maisons neuves a permis de réduire la consommation d'énergie sans réduire les gains solaires sur les façades et les toits. Le scénario 4 combine l'effet positif d'une augmentation de la densité construite et d'une distribution plus compacte des maisons. Ainsi les avantages d'une augmentation de la densité sont importants en termes de consommation d'énergie et la préservation des sols.

Dans l'objectif de mettre en évidence la relation entre la morphologie urbaine et la consommation d'énergie, Serge Salat a utilisé le système GIS sur une superficie de 1km (figure 2.22). La

méthodologie était basée sur l'évaluation des indicateurs environnementaux d'une cité à Shanghai en utilisant un modèle d'élévation digital (DEM).



Figure 2.22 : Les différentes typologies analysées à Beijing , Shanghai, Paris et Berlin

L'étude est structurée autour de l'utilisation du concept de la zone passive et l'établissement des indicateurs basés sur des recherches antérieures, validation des indicateurs tel que : La densité, rugosité, compacité, sinuosité, occlusivité, contiguïté, ensoleillement, minéralisation, des mesures in situ et l'application des indicateurs dans une analyse comparative en utilisant le SIG. Les paramètres de la morphologie urbaine analysés sont : La moyenne et l'écart type des hauteurs des constructions, la moyenne et l'écart type des hauteurs de la végétation, histogramme des hauteurs des constructions, surface des murs, rapport entre l'emprise et la surface totale, surface frontale en fonction de la hauteur au-dessus du sol, le rapport H/W, SFV, la rugosité, hauteur de déplacement, surface de la végétation, routes et toitures et l'orientation des rues principales.

Selon Ratti et al (2005) le rapport entre surface et volume est un bon indicateur pour caractériser la texture urbaine. Il décrit l'exposition du bâtiment par unité de volume et peut être utilisé dans plusieurs applications. Cependant, réduire les déperditions veut dire réduire ce rapport, ce qui implique aussi réduire l'ensoleillement et l'éclairage naturel. C'est pourquoi il recommande l'utilisation du rapport de la zone passive/zone non-passive (figure.2.23)

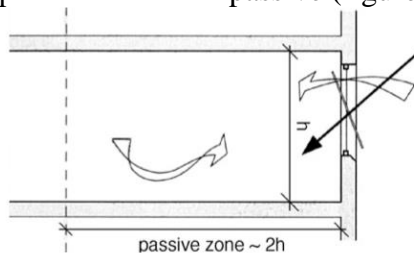


Figure 2.23: La 'zones passive' selon la méthode LT, elle s'étend sur 6 m (où deux fois la hauteur du plafond) de la façade (d'après Baker et Steemers)

Selon Salat, DEM permet, efficacement, l'obtention rapide des paramètres morphologiques urbains. Néanmoins, les modèles LT (lighting and thermal method) nécessitent de nombreux inputs pour effectuer les calculs de consommation d'énergie, y compris les U-valeurs du bâtiment, la réflectivité des parois intérieures et extérieures, les données d'éclairage et l'efficacité de chauffage.

2.10. Morphologie urbaine et microclimat : quels indicateurs choisir ?
Descripteurs géométriques, morphologiques morpho-climatiques et physiques :

Selon Ait-Ameur, la dimension morpho-climatique peut être intégrée dans le processus de conception et de planification urbaine par la définition de trois familles d'indicateurs (Ait-Ameur).

- Indicateurs climatiques.
- Indicateurs de confort.
- Indicateurs morphologiques.

Le croisement entre les indicateurs physiques qui représentent les caractéristiques de l'aménagement urbain et les indicateurs climatiques obtenus à partir des mesures météorologiques permet l'amélioration des conditions environnementales à travers la définition des actions appropriées (Tableau 2.5).

Pour une représentation morphologique complète ces indicateurs doivent englober deux échelles : celle du tissu urbain et celle de l'espace urbain. En effet il y'a de grandes interférence entre les différentes échelles climatiques provenant essentiellement de l'imbrication des différents niveaux urbains et les multiples interactions entre les différentes échelles climatiques.

Selon Tirraoui (2000), afin de définir les effets de la forme urbaine sur les phénomènes climatiques, il est important de mettre en œuvre une investigation qui permet de croiser les aspects formels de l'espace thermique, du climat et corporels psycho-culturels et sociaux des usagers. Ainsi que la mise en relation du confort avec les enjeux économiques et sociaux.

Ainsi Ait-Ameur résume une démarche simplifiée qui teste l'ensemble des indicateurs pertinents avec toutes les variables climatiques en fonction d'une grille.


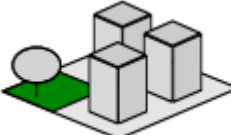


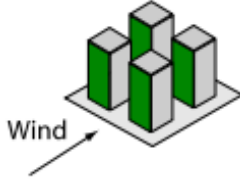


Tableau 2.5 : Indicateurs morphologiques selon l'échelle du quartier et celle de l'espace urbain et leurs influences (d'après Ait-Ameur).

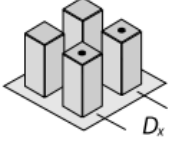
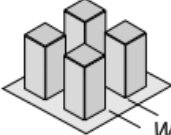
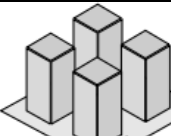
	Morphological criteria	Morphological indicators	influential morphological factors
Urban fabric	Plots occupation	Built density Mineralisation	Built establishment Meneral and vegetable planning
	Plots distribution	Horizontal boring rate	Horizontal dimensions of the empty espaces
	Height of the three-dimensionnal urban fabric	Roughness	Built establishment Texture and materials Vegetable planning and its variation Urban fumiture
	Urban dimensions	Equivalent prospect	Height frontages
	Urban geometry		Space length
	Space organisation mode	Equivalent length	Space width
Public space		Obstruction factor	Space length Height frontages
		Shade factor	Distance of the measurment point to the frontage Horizontal urban distance Height of the shaded built Street azimuth
		Mask fraction	Solar trajectory and azimuth Opening of the space to the sky Space azimuth
	Type of urban planning of the space	Mineral density Vegetal density Urban obstacle influence rate	Solar trajectory, height and azimuth Distribution of mineral surfaces in the space Distribution of vegetable surfaces in the space Members of obtacles in the space
	Nature of the collecting surfaces	Glazing rate Albedo of surfaces	Obstacle height Distribution of glazed surface Nature of materials Frontage distribution

Selon Boyeur : La technique de simulation semble la plus appropriée pour ce champ disciplinaire. Elle permet le contrôle des paramètres de calcul et se prête bien au traitement de la complexité, l'hétérogénéité et non linéarité des systèmes climatiques urbains, comme elle est plus flexible et moins couteuse que les campagnes de mesures.

Pringer et Sylvain (2005) ont choisi les paramètres de surface les plus significatifs et les a énumérés comme suit (Tableau 2.6) :

Tableau 2.6: Propriétés des surfaces urbaines et la variation de leurs valeurs à travers les différentes échelles (suburbaine, urbaine et tours, d'après Pringer et Sylvain, 2005)

(a) Indicateurs liés au couvert urbain: Obtenus généralement à partir des cartes, des photos aériennes, ou à partir des images satellitaires.				
λ_p	Coefficient d'occupation des sols		L'emprise des bâtiments par unité de surface.	Urbain 35 -65% Suburbain 15 - 40%
λ_v	Surface du couvert végétal		Surface boisée par unité de surface.	Urbain 0 - 35% Suburbain 35- 70%
λ_I	Emprise des surfaces minérales		La surface urbaine minérale non occupée par les bâtiments (ex. routes, stationnement, revêtement) par unité de surface.	Urbain 20%- 50% Suburbain 10%-40%
(b) Indicateurs relatifs à la structure tridimensionnelle en 3D: Généralement obtenus à partir des données numériques en 3D.				
z_H	Hauteur moyenne des bâtiments			Suburbain 4 - 8 m Urbain 8 - 20 m Les tours 20 m
λ_f	Surface en amont (surface frontale)		Rapport des surfaces exposées des bâtiments par unité de surface. L'introduction de l'effet de la végétation peut être obtenue en multipliant λ_f par 4.	Suburbain 0.1 - 0.3 Urbain 0.1 - 0.6 Les tours > 0:4
λ_c	Coefficient de surface (Surface élargie)		Ratio de la surface totale (en 3D) par unité de surface.	Suburbain 1.3- 1.8 Urbain 1.5- 2.0 Les tours > 2
V_p	Indicateur de volume		$\lambda_P \cdot z_H$. Volume de construction par unité de surface.	Suburbain: 1-3 m ³ m ⁻² Urbain: 3 -15 m ³ m ⁻² Les tours > 15 m ³ m ⁻²

D_x			La distance entre centroïdes des constructions. Elle peut être calculée comme suit : $D_x = L_x + W_x$	
W_x	La largeur des canyons urbains.		Représente la largeur espace libre entre bâtiments (y compris les cours et toutes les zones non bâties).	
λ_x	Le rapport d'aspect des canyons.		Rapport entre la hauteur moyenne zH et la largeur W_x .	Suburbain 0.1 - 0.5 Urbain 0.5 - 2 Les tours > 2
L_x	Largeur moyenne des bâtiments			
λ_b	Rapport entre hauteur et largeur des bâtiments		zH / L_x . Le rapport entre la hauteur moyenne du bâtiment zH et la largeur L_x .	Suburbain: < 1 Urbain: 1 - 3 Les tours: > 2
Ψ_s			Le facteur de vue du ciel correspond à la portion de ciel observable à partir d'un point considéré	Suburbain: 0.6 - 0.9 Urbain: 0.3 - 0.6
c) Les matériaux urbains : peuvent être obtenus à partir d'une analyse détaillée des photos aériennes ou des études sur terrain.				

Adolphe (Adolphe, 2001) a appliqué la méthode « morphologic » intégrée dans le SIG sur trois sites situées dans des endroits varies, mais qui ont le même climat et le même contexte historique. Ses recherches ont apporté une contribution importante à la compréhension de la corrélation entre morphologie urbaine et le microclimat. A travers ses recherches, il a essayé de répondre à la question de la simulation d'une manière opérationnelle et la relation entre la forme urbaine et le climat, à une échelle intermédiaire correspondant à l'échelle du quartier.

Selon lui, le tissu urbain est assimilé à un milieu poreux avec des formes solides rigides, soumis aux diverses sollicitations climatiques. Ses caractéristiques macroscopiques peuvent être étudiées à travers un ensemble de paramètres simplifiés. Son hypothèse distingue entre les conditions climatiques au-dessus des toits et sous la canopée.

Le tissu urbain est constitué d'espaces ouverts tels que les rues et les boulevards (équivalent aux pores moyens) et des espaces fermés (ou partiellement fermés) équivalents aux cavités comme dans les jardins ou les jardins privés.

D'après A. Luc son approche diffère des approches centripètes traditionnelles basées sur des simulations élaborées des effets de l'environnement extérieur sur le climat intérieur du bâtiment. En effet, il a combiné cette approche avec une approche centrifuge qui évalue l'influence de la rétroaction des bâtiments sur l'environnement.

Les indicateurs baptisés porosité et sinuosité. Comparés à des facteurs bien établis, comme le rapport hauteur/largeur des canyons urbains, offrent une augmentation sémantique correspondant à au volume au lieu du plan.

Le tracé de la rugosité et la sinuosité dans un diagramme polaire génère des roses qui donnent des indications à propos de la vitesse du vent et le potentiel de ventilation d'un site urbain.

Tung-Shen Hsie et Ward (2006) se sont inspirés de la théorie du professeur Luc Adolphe sur les indicateurs de morphologie urbaine (1999), intégré dans le logiciel SIG MapInfo. Parmi les neuf indicateurs qui ont été proposées : les indicateurs de rugosité, porosité et sinuosité qui sont fondamentalement corrélées avec le potentiel de ventilation naturelle dans les différents modèles urbains.

Les couches identifiées dans le géo-traitement sont affichées sous la forme d'une série de cartes climatiques permettant aux décideurs de comprendre, visualisé et de tout communiquer, le long du processus de conception. En utilisant cette méthode, le potentiel de ventilation naturelle (NVP) peut être identifié dans les zones urbaines. Ceci permettra aux autorités d'investir plus de temps et d'argent dans l'amélioration de ces zones critiques. En outre, lorsque les normes de base pour la forme urbaine et la NVP sont établies, ceci permettra aux autorités et aux praticiens de contrôler le niveau des progrès réalisés et de faciliter l'examen de la performance des politiques tout au long du processus.

Groleau et Marenne (1995) ont proposé une méthode instrumentale pour déterminer, à l'aide de simulations numériques, les liens potentiels entre les descripteurs morphologiques des structures urbaines et leurs caractéristiques environnementales. Trois sites (Figure 2.26) ont été testés en fonction de l'ensoleillement. Les résultats des simulations sont analysés comparativement pour évaluer dans quelle mesure la méthodologie proposée est appropriée pour exprimer les spécificités environnementales des formes urbaines.

La méthode employée peut être résumée en fonction du diagramme suivant (figure 2.24) :

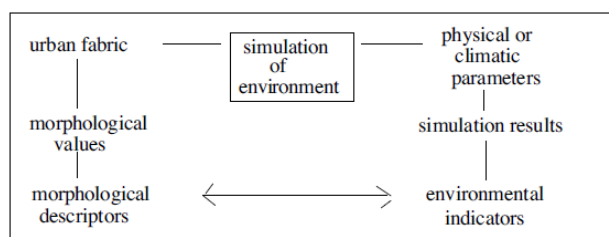


Figure 2.24 : La liaison entre les indicateurs environnementaux et les descripteurs morphologiques.

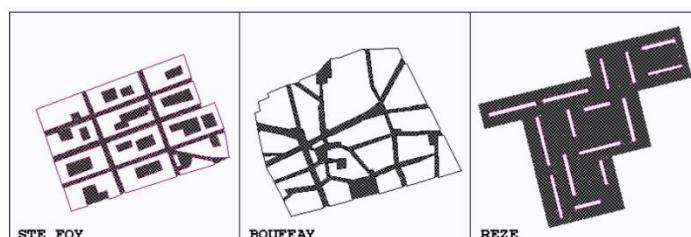


Figure 2.26 : Typologie des trois sites simulés par Groleau et Marenne (1995).

Ste Foy est caractérisé par un tracé régulier ou chaque trame contient deux ou trois constructions, Bouffay est caractérisé par un tracé irrégulier, Rezé présente une organisation typique aux années 60 relative au mouvement moderne composé de bâtiments rectangulaires disposés orthogonalement entourés par des rues très larges.

Les attribues morphologiques utilisés sont : La hauteur moyenne des constructions, la densité du bâti, homogénéité du bâti, orientation, exposition des façades, largeur moyenne des rues, rapport hauteur bâtiment/largeur des rues, cour intérieur type des espaces extérieur (rue, cour intérieure, place, etc).

La simulation de l'ensoleillement était faite pendant trois journées caractéristiques celles de décembre, mars et juin afin de déterminer le comportement de ces différentes formes urbaines pendant l'année.

Le facteur de réduction de la durée d'ensoleillement est évalué par la corrélation entre le potentiel d'insolation (en fonction de la durée du jour) et l'insolation effective (durée d'insolation prenant en compte l'ombre des bâtiments). Le facteur de réduction de l'énergie solaire peut être obtenu de la même manière en évaluant la réduction directe de l'énergie solaire due à l'ombre projetée. Ces deux indicateurs expriment d'une manière très simple mais directe l'effet global d'ombrage des masques solaires.

L'emprise de l'ombre se réduit progressivement de décembre à juin le facteur de réduction d'ensoleillement était important dans le premier site mais en changeant l'orientation sud des bâtiments ce facteur a augmenté. Rezé présente le site le moins ombré presque toute l'année. Malgré que leur recherche leur a permis de mettre en exergue l'impact de la densité sur la quantité d'énergie et l'ensoleillement il a été recommandé d'élargir le nombre d'échantillon et varier en fonction de l'orientation, la morphologie des espaces extérieur et les formes de constructions.

Une étude faite par Pinho et al. (2003) à Lisbonne afin de déterminer l'impact de la forme urbaine sur le microclimat. Les paramètres analysés sont répertoriés à l'échelle du quartier et à l'échelle de la rue en fonction du tableau suivant (Tableau 2.7):

Tableau 2.7 : Eléments d'analyse microclimatique selon l'échelle du quartier et celle de l'espace public (d'après Pinho et al. 2003) :

Le quartier	Topographie	Pente		
	Occupation du sol	Obstruction		
Morphologie		Densité		
	Constructions	Rugosité		
Espace public		Géométrie	Orientation	
	Densité			
	Gabarit	Rapport d'aspect H/W		
		Rapport d'aspect L/W		
	Forme	Orientation		
		Matériaux	Couleur et texture	
			stockage	
	Gabarit	Rapport d'aspect H/W		
		Rapport d'aspect L/W		
		Détail de façade		
	Espaces ouverts	Géométrie	Orientation	
			Couverture/pavage	Végétation /matériaux
Couleur et texture				

				stockage	
		Gabarit	Rapport d'aspect H/W	Rapport d'aspect L/W	
	Végétation	Type		Feuillage	Taille et forme
				Distribution	
			Arbre/ arbuste/herbes	Caducue/ persistant	Densité

2.11. Conclusion :

La morphologie urbaine parfois se réfère au tissu urbain et traite les différentes configurations spatiales des bâtiments, leurs formes et dimensions, ainsi que son influence directe sur les microclimats intérieurs et extérieurs et sur la consommation d'énergie à des échelles très fines. C'est l'endroit où se côtoient les constructions matérielles et les pratiques concrètes. Les espaces extérieurs présentent le support des activités culturelles, politiques et sociologiques. Ils sont définis comme étant une partie du sol non couverte et accessible aux public. Ils peuvent être classés selon leur aspect géométrique ou fonctionnel. Les échantillons sur lesquels portera notre étude étaient choisis en fonction de leurs caractéristiques morphologiques et représentativité historiques, à savoir : La vieille ville, le centre-ville, le quartier Champs de mars, La Menadia, cité 8mai45 et le quartier Sidi Achour.

La caractérisation de la relation entre la morphologie urbaine, le climat et confort extérieur est étroitement liée à l'échelle géographique et varie de l'échelle « micro » qui représente l'échelle des espaces publics, « échelle méso » qui représente l'échelle des quartiers, et l'échelle « macro » qui représente l'échelle de la ville. Les deux premières échelles seront discutées.

La géométrie de la ville est un facteur essentiel de la particularité climatique du milieu urbain. Elle est souvent étudiée à travers l'analyse des rues canyons. L'adoption d'un tel modèle simplificateur de la forme urbaine, considère une homogénéité parfaite de la forme urbaine : même rues, symétrie parfaite des deux côtés de la rue, absence d'intersections et d'ouvertures latérales, etc.

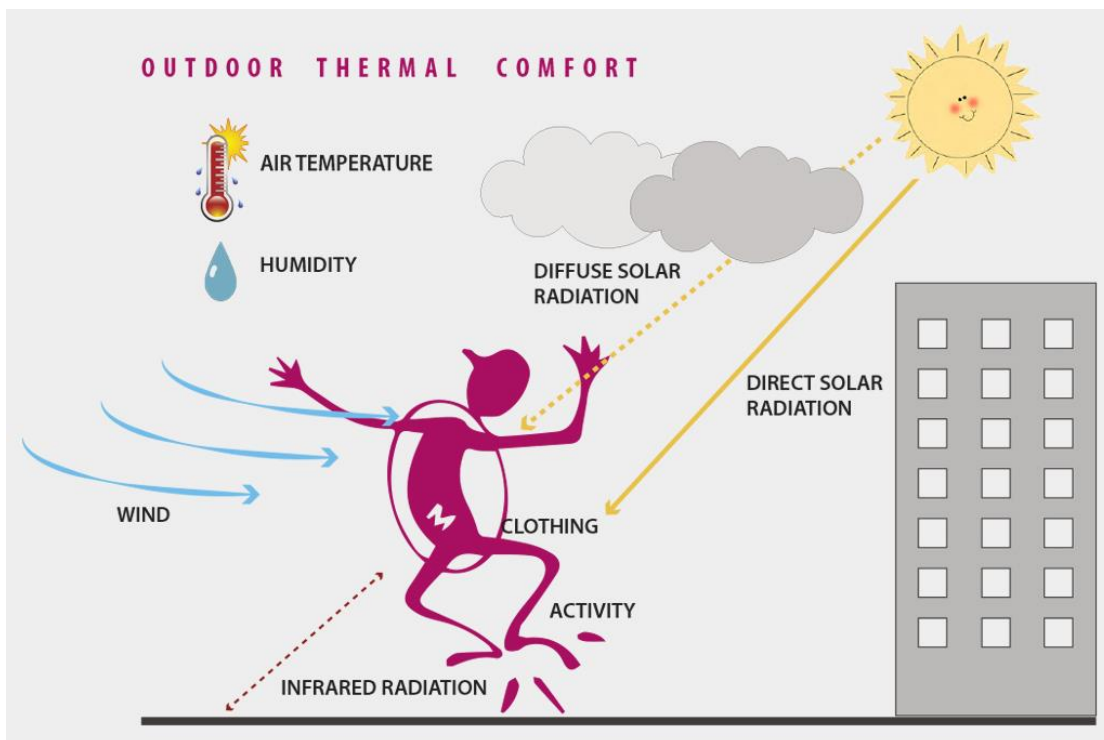
Néanmoins, des études peuvent être appliquées sur des formes théoriques ou à l'échelle d'un fragment urbain.

L'évaluation de l'impact de la morphologie urbaine sur les phénomènes climatiques, exige de mettre en œuvre une recherche qui permet de croiser les aspects formels de l'espace thermique, la définition des données climatiques et les différents aspects corporels psycho-culturels et sociaux des usagers. Ses aspects peuvent être évalués en fonctions des indicateurs qui doivent englober deux échelles : celle du tissu urbain et celle de l'espace urbain. En effet il y'a de grandes interférence entre les différentes échelles climatiques provenant essentiellement de l'imbrication des différents niveaux urbains et les multiples interactions entre les différentes échelles climatiques.

Le croisement entre les indicateurs physiques qui représentent les caractéristiques de l'aménagement urbain et les indicateurs climatiques obtenus à partir des mesures météorologiques ainsi que les indicateurs propres aux individus, permet l'amélioration des conditions environnementales à travers la définition des actions appropriées.

CHAPITRE III

Evaluation confort extérieur : méthodes et outils



3.1. Introduction :

Les espaces urbains publics jouent un grand rôle dans la promotion de la qualité de vie urbaine. Leurs usages dépendent fortement de leurs conditions microclimatiques, qui peuvent augmenter, limiter, diriger ou modifier les activités qu'elles abritent.

Dans ce chapitre nous essayerons d'élucider les différents phénomènes physiques liés aux échanges thermiques dans les espaces extérieurs ainsi que la présentation des différentes méthodes et outils d'évaluation du confort thermique.

En effet, l'évaluation du confort thermique a connu le développement de plusieurs modèles. Généralement, ils se répartissent entre psycho-sociologiques basés sur des investigations sur terrain et des interviews adressés aux usagers, et physio-thermiques basés sur la résolution de l'équation du bilan thermique du corps humain.

En effet, toute l'énergie produite dans le corps humain se transforme en énergie calorifique. Elle sera principalement dissipée : par radiation, conduction et convection. C'est le bilan global de tous ces échanges au niveau de la peau qui en synergie avec les autres mécanismes d'échange de chaleur qui déterminera le bien-être thermique de l'individu.

A côté de ces réactions physiologiques, l'homme essaie de limiter l'amplitude des sensations de désagrément en développant des processus de régulation comportementale.

Ces réponses perceptives de la sensation et du confort thermique, permettent aux êtres humains de réagir consciemment par une action comportementale qui est souvent le moyen le plus efficace pour réguler les températures corporelles par rapport à la thermorégulation autonome.

En outre, ce chapitre traitera les différents aspects de la modélisation du transfert de chaleur et de la régulation de thermique.

Les paramètres physiques qui ont le plus d'influence sur la relation entre le confort thermique extérieur et le comportement humain sont : la température, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Communément, ils représentent les données d'entrée pour la plupart des modèles thermiques.

A côté des paramètres physiques, nous allons essayer d'étudier les aspects psychologiques du confort thermiques et les différentes méthodes d'évaluation adjointes.

L'intégration des différentes méthodes dans le processus de conception architecturale et urbaine est montrée à travers quelques recherches.

3.2. Définition du confort Thermique :

Le confort thermique peut être défini selon trois approches (Shakir, 2006) :

- 1- Approche psychologique : Considère le confort thermique comme étant un état d'esprit qui exprime une satisfaction vis-à-vis des conditions thermiques.
- 2- Approche Thermo-physiologique : Basée sur la stimulation des récepteurs thermiques qui se trouvent au niveau de la peau et à de l'hypothalamus. Elle considère le confort thermique comme étant l'état qui exprime le minimum de signe neurologique émanant de ces récepteurs.

- 3- Approche basée sur l'équilibre thermique du corps humain : Selon cette approche l'équilibre thermique est atteint lorsque les pertes et les gains de chaleur sont équilibrés et la température de la peau et le taux de sudation sont dans la marge du confort.

Selon Candas (2008), le confort thermique est le résultat de deux échelles :

- Echelle affective :
- L'absence de désagrément ou d'insatisfaction
- Echelle perceptive : L'incapacité d'exprimer notre état thermique ; cette notion est proche de l'indifférence.

3.3. Les principes physiologiques confort thermique : **Thermorégulation :**

L'homme est un homéotherme qui doit maintenir sa température interne constante proche de 37°C grâce à des mécanismes de thermorégulation physiologiques qui lui permettent de maintenir un bilan thermique équilibré. La compréhension du fonctionnement de ce mécanisme exige la distinction entre : le « noyau central » homéotherme, composé du cerveau et les viscères thoraciques et abdominaux, et l'écorce poïkilotherme, où la température est variable, composé de la peau, les membres et l'ensemble des muscles squelettiques (Teller). A côté de ces réactions physiologiques, l'homme essaie de limiter l'amplitude des sensations de désagrément en développant des processus de régulation comportementale et adaptative.

La stabilité de la température corporelle chez l'homme implique un équilibre entre la production de la chaleur endogène, qui résulte du métabolisme et de l'activité physique et les pertes de chaleur vers le milieu extérieur. Le corps humain possède deux zones de réception thermique. Une qui se trouve dans l'hypothalamus et répond aux petites variations de la température du sang artériel (0.1 à 0.2°C). L'autre, formée par les terminaisons nerveuses libres dans la peau. Elle est sensible aux variations de la température. La réponse thermorégulatrice peut être purement réflexe (inconsciente) ; au-delà d'une certaine intensité, elle sera perçue par le sujet comme une source de gêne (Boutard, 2000).

Les terminaisons nerveuses sont reliées au cortex ainsi qu'au centre de régulation de la température situé dans l'hypothalamus. Les relais corticaux déclenchent la perception sensible de chaud et de froid et pousse l'individu volontairement à agir afin de modifier les conditions qui prévalent : rechercher l'ombre ou le soleil, ôter ou ajouter des vêtements, continuer ou arrêter un exercice, se replier ou au contraire s'étirer, agiter les bras, partiellement se dénuder les avant-bras, le coup, pour augmenter la surface d'échange direct de la peau (Boutard, 2000).

Pour quantifier adéquatement les influences thermiques aux quelles l'homme est exposé dans les différents milieux environnementaux, le comportement spécifique du système thermique et régulateur humain doit être pris en considération. En effet, la chaleur métabolique générée, est répartie à travers le corps par la circulation sanguine. Elle est stockée dans les tissus et transportée par conduction à la surface du corps. Ensuite, la chaleur est dissipée dans l'environnement par convection, rayonnement et évaporation ou conduction. L'être humain maintient sa température interne à des niveaux relativement constants par des réponses

régulatrices autonomes du système nerveux central, y compris des ajustements au flux sanguin de la peau. Une augmentation de la production de chaleur métabolique dans les muscles en frissonnant dans les conditions froides ou par la transpiration dans les conditions chaudes (Fiala & al, 2011).

3.4. Les facteurs qui influent sur le confort thermique extérieur :

Les conditions microclimatiques varient largement dans le temps et l'espace (Thorsson & al, 2007), cependant l'évaluation du confort thermique était souvent limitée à l'impact de la température de l'air (Parsons, 2003). En effet, malgré son importance et la facilité de son usage, ce paramètre climatique doit toujours être considéré avec d'autres facteurs environnementaux et personnels. Bien que ces derniers peuvent être indépendants les uns des autres, ils ont conjointement un grand impact sur le confort thermique. Ces paramètres environnementaux et personnels sont (Fanger, 1970) :

1.1. Facteurs environnementaux :

- Température de l'air.
- Rayonnement solaire et thermique.
- Vitesse de l'air.
- Humidité relative.

1.2. Facteurs personnels :

- Isolation des Vêtements
- Taux d'activité.

1.3. Autres facteurs

A côté de ses facteurs il y'en a d'autres qui sont plus ou moins subjectifs et non quantifiables et qui doivent être considérés afin d'améliorer l'évaluation du confort et apporter d'autres alternatives à la conception architecturale et urbaine.

- Acclimatation
- Age et sexe
- Musculation.
- Etat de santé
- Aliments
- D'autres facteurs (ex : présence de courants d'air)

3.5. L'équation d'équilibre thermique :

Les conditions de sensation de neutralité thermique sont liées à la quantité d'énergie produite dans le corps et à la chaleur transférée dans l'environnement. Toute l'énergie produite dans le corps humain se transforme en énergie calorifique. Elle sera principalement dissipée : par radiation, conduction et convection. Ainsi l'équation d'équilibre d'énergie s'écrit comme suit ((Höppe, 2003) :

$$M+W+C+R+E_D+E_{RE}+E_{SW}=0 \quad (\text{eq.3.1})$$

M est le métabolisme (Taux de production interne d'énergie par l'oxydation des aliments).

W La puissance à laquelle le travail est effectué

C : Est le flux thermique échangé par convection de l'air ambiant.

R : Est le flux thermique échangé par rayonnement avec l'extérieur.

E_D : Est le flux thermique latent de transformation de l'eau en vapeur par diffusion à travers la peau.

E_{RE} : Est le flux thermique latent perdu par respiration.

E_{SW} : Est le flux thermique latent d'évaporation de la sueur.

Les divers termes de l'équation ont un signe positif dans le cas d'un gain d'énergie par le corps et négatif dans le cas de perte d'énergie. M est toujours positif, W, E_D et E_{SW} sont négatifs).

C et E_{RE} sont influencés par la température de l'air, E_D , E_{RE} et E_{SW} sont influencé par l'humidité, C et E_{SW} sont influencé par la vitesse du vent. R est calculé en fonction des échanges de rayonnement de courte et longue longueur d'onde entre l'individu et son environnement.

3.6. Modes de transfert de chaleur :

3.6.1. Les échanges par rayonnement :

Tous les corps émettent et absorbent de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique de grande longueur d'onde, dit le rayonnement du *corps noir* dont l'intensité est proportionnelle à la quatrième puissance de la température. En effet, le corps humain émet un rayonnement en fonction de la température des vêtements et en reçoit celui de tous les éléments environnants : murs, air, objets, autres personnes (Boutard, 2000). C'est le bilan global de tous ces échanges au niveau de la peau qui en synergie avec les autres mécanismes d'échange de chaleur qui déterminera le bien-être thermique de l'individu.

Le résultat net des échanges par rayonnement est donné par le bilan au niveau de la peau qui englobe tous les flux de radiation.

3.6.2. Les échanges par conduction :

La conduction est le résultat de la transmission de chaleur dans un corps ou dans plusieurs corps contigus suite à une agitation locale désordonnée des électrons, atomes ou molécules, due à l'augmentation de la température générée par contact d'un corps plus.

Les échanges de chaleur par conduction pour un individu se fait avec le sol, ils s'avèrent très faibles et ils sont généralement négligés.

3.6.3. Les transferts par convection

La convection est un transfert de chaleur produit par le mouvement d'un fluide, gaz ou liquide, d'une surface chaude vers une région ou surface plus froide. Pour un individu, la température des vêtements ou de la peau est différente de celle de l'air ambiant. Cela génère des courants de convection locaux, mouvement de l'air des surfaces chaudes vers les surfaces froides ou l'air ambiant plus froid qui s'échauffe par conduction au contact des vêtements ou de la peau.

3.6.4. Les transferts de chaleur latente :

La respiration et la sudation les échanges thermiques du corps avec son environnement ont lieu principalement par évaporation à la surface de la peau. Vu que l'air ne peut absorber qu'une quantité limitée de vapeur d'eau, une ambiance chaude et sèche est plus facile à supporter pour le corps qu'une ambiance chaude et humide.

Cependant, l'humidité a peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu lorsqu'elle est comprise dans la gamme des valeurs entre 30 et 70%, quelle que soit la température de l'air. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40 % ou 60 % d'humidité relative dans un espace ouvert ou fermé.

L'évaporation de la sueur est le mécanisme le plus performant de transfert de chaleur. Il peut atteindre 400 W/m^2 lors d'un exercice intense dans un environnement chaud et sec. Cette faculté peut d'ailleurs se développer par acclimatation aux conditions extérieures.

3.7. Le confort thermique dans les espaces extérieurs :

Le confort thermique extérieur définit le type d'usage des espaces urbains. Ghel (1987) a étudié l'influence du microclimat sur les activités qui se déroulent à l'extérieur en comptant le nombre des usagers exposés au soleil et ceux sous l'ombre. Il a démontré que l'exposition au soleil ou rester sous l'ombre, contrôle significativement le désir des usagers de rester, ou de quitter les lieux. Selon lui les espaces extérieurs peuvent abriter trois types d'activités : activités nécessaires, activités occasionnelles et activités sociales. Lorsque les conditions extérieures sont mauvaises, on observe uniquement les activités nécessaires, cependant lorsque ces conditions s'amélioreront, on observera la naissance des activités occasionnelles, leur nombre s'accroît jusqu'à se transformer à des activités nécessaires (tel que s'asseoir, manger, jouer, etc). Quant aux activités sociales, elles présentent la résultante des deux activités précédentes. Elles dépendent de la présence des usagers, elles englobent les jeux d'enfant, les conversations, les activités en commun, etc.

En addition, la composante thermique a un très grand effet sur la santé, elle détient des relations très étroites avec le mécanisme de régulation thermique et le système circulatoire.

Selon Chen et Ng, (2012), le confort thermique extérieur est complexe et composite. Les conditions environnementales présentent les facteurs les plus déterminants dans la sensation et l'évaluation du confort. L'évaluation du confort est aussi bien subjective dans le cas où ce n'est pas toujours les conditions climatiques ou bioclimatiques objectives qui déterminent la sensation thermique. Dynamique étant donné que l'adaptation au microclimat est progressive, subjective. Les facteurs sociologiques jouent aussi un très grand rôle dans la perception des espaces extérieurs. Les gens s'engagent dans des activités seules ou accompagnés, associé à des éléments physiques tels que l'aménagement au bord des routes, les abris, les bancs, les kiosques, etc. c'est pourquoi le confort est défini non seulement par rapport à l'état du corps mais aussi par rapport à l'état d'esprit. Ainsi l'évaluation du confort exige les 04 éléments suivant physiques physiologiques, socio psychologiques et comportementale (Figure 3.1).

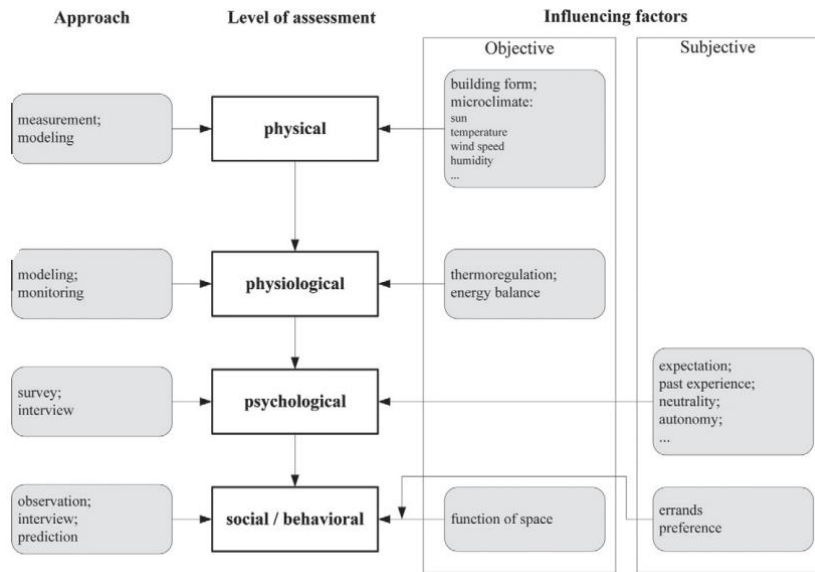


Figure 3.1 : Les différents aspects du confort thermique extérieur (d'après Chen et Ng, 2012).

Ce schéma permet de lier le confort thermique à l'utilisation de l'espace selon deux échelles spatiale et temporelle. Les aspects statiques et objectifs (physiques et physiologiques) doivent être mesurés et modélisés, et les aspects dynamiques et subjectifs (socio-psychologique et comportementale) exigent des investigations et des enquêtes.

3.8. Le besoin d'outils de prédiction :

Bien que les recherches sur le confort thermique extérieur aient connu un certain progrès au cours des dernières années, son assimilation à la conception urbaine reste considérablement limitée. En conséquence, les décideurs et les concepteurs manquent souvent des indicateurs de conception et des repères pour : (1) aborder les implications microclimatiques dans la conception de l'espace public ; (2) Revigoration des insinuations respectives du fait des changements climatiques (Santos, 2015).

Givoni et al (2003) ont exprimé le besoin en outils de prédiction qui permettent de tester l'influence des détails de la conception urbaine et architecturale sur le confort thermique extérieur. Bien que la réponse aux conditions microclimatiques et subjective et variable, les outils de simulation présentent un grand avantage pour l'évaluation de l'impact des différents scénarios d'aménagement sur le confort extérieur.

Zacharias et al (2004) ont testé l'impact des modifications appliquées dans une place publique sur le comportement des usagers. Elles consistaient en l'augmentation du nombre des bancs. Les résultats obtenus ont montré peu d'influence sur le niveau d'usage par contre l'exposition des bancs par rapport au soleil avait un effet plus important. Malgré tout, ces interventions ont échoué parce qu'elles devront être précédées par un diagnostic qui définit les endroits stratégiques dans lesquels on doit placer ces bancs pour qu'ils soient plus confortables.

Ces opérations, peuvent être établis grâce à des outils de simulation, tel qu'Envi-met (Bruse, 1999), Townscope (Teller & Azard 2001), Rayman (Matzarakis, 2007) et Solweig (Lindberg, Holmer & Thorsson, 2008).

3.9. Evaluation du confort extérieur : quelle approche et quels outils ?

3.9.1. Comparaison entre le confort thermique extérieur et intérieur:

Beaucoup de chercheurs ont signalé le peu de recherches concernant le confort thermique extérieur (Swaid et al.1993, Nikolopolou et al 2001, Givoni et al 2003, Spagnolo et De dear 2003).

Théoriquement les indices de confort thermique intérieur peuvent être appliqués sur les espaces extérieurs cependant, une importante disconcordance était trouvée lors de leurs applications sur terrain (Spagnolo & De dear 2003).

Pour l'évaluation du confort thermique extérieur, il est important de noter que les espaces extérieurs présentent une large variation dans : les températures de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire et thermique. Les usagers ont tendance à tolérer ces variations dans leurs environnements thermiques parce qu'ils ne peuvent pas les contrôler. (Spagnolo & De Dear, 2003). En outre, on ne doit pas se limiter uniquement aux variables environnementales, d'autres paramètres sociologiques et psychologiques doivent être considérés.

Les individus ont plus de contrôle sur leurs environnements intérieurs qu'extérieurs, c'est pourquoi leur expectation climatique pour l'extérieur est plus large et leur seul moyen de contrôle est les vêtements. Dans une étude appliquée sur un climat chaud et humide, Gómez-azpeitia et al, (2011) ont trouvé que la température neutre intérieure était plus élevée que celle de l'extérieur pendant toutes les saisons. Les limites de confort intérieur étaient supérieures que celles de l'extérieur. Ces résultats ont démontré que les individus ont toujours tendance à considérer leur milieu intérieur plus chaud que l'extérieur c'est pourquoi ils étaient apprêtés à s'acclimater aux conditions extérieures en fonction des changements des saisons.

Suite à des enquêtes épidémiologiques appliquées sur 2381 ménages au Canada, sur, Leech et al (1996) ont trouvé que les individus passent 88.6% du temps à l'intérieur des bâtiments, 6.1% à l'extérieur et 5.3% dans leurs véhicules. Cela implique que les indices de confort basés sur les conditions stationnaires sont plus appropriés pour l'intérieur que pour l'extérieur.

Il est aussi à signaler que l'évaluation du confort intérieur a eu le plus d'attention comparée au confort extérieur. Plusieurs standards ont été développés afin de définir les meilleures conditions thermiques à l'intérieur des bâtiments. A titre d'exemple : ISO 7730, ISO 7726, ISO 10551, ANSI/ASHRAE 55 et BS-EN 14501. En ce qui concerne le confort thermique extérieur, seulement quelques études ont été conduites grâce à quelques événements tel que : L'exposition internationale de Séville1992, les jeux olympiques d'Atlanta1996, Sydney 2000 et Athènes 2004 (Gómez-azpeitia et al, 2011).

3.9.2. Les méthodes d'évaluation du confort thermique extérieur :

En effet, l'évaluation du confort thermique extérieur est une opération complexe. Le challenge se présente selon deux niveaux : premièrement l'échelle de l'environnement urbain

qui est toujours complexe et non uniforme (ex : formes des bâtiments, l'ensoleillement, ombre, etc.), deuxièmement, l'aspect dynamique des usagers.

Certaines études sur le confort extérieur étaient basées sur des modèles thermo-physiologiques, alors que d'autres sur des investigations détaillées (Scuda, 2002) sur les paramètres climatiques qui déterminent le niveau du confort (Chen et Ng, 2012).

Gianni Scuda a classé ces méthodes comme suit :

- Approches empiriques appliquées à des climats bien spécifiques et basées sur la corrélation de quelques paramètres climatiques. Parmi les indices : Wind Chill index et discomfort index.
- Approches psycho-sociologiques basées sur des corrélations entre les paramètres climatiques mesurés et la perception subjective des interviewées en utilisant la régression linéaire et non linéaire. Malgré que ces approches prennent en considération l'impact des facteurs psycho-sociologiques, elles négligent l'importance de l'impact de la géométrie urbaine sur le confort thermique (Swaid & Hoffman, 1990). En outre, ces approches statistiques sont appliquées uniquement dans les zones où les données expérimentales ont été recueillies. Le modèle empirique développé dans ce cas ne peut pas être généralisé pour la prédiction du confort thermique.
- Approches thermo-physiologiques basées sur le calcul du bilan thermique en fonction des paramètres physiques, et physiologiques. Les paramètres physiques englobent les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement externe (conduction, convection, rayonnement, évaporation). Les paramètres physiologiques, font intervenir toutes les réactions de thermorégulation du corps humain (sudation, vasodilatation, vasoconstriction, frisson). Elles sont traduites à travers plusieurs modèles tel que : Le modèle de Burt, le modèle de Fanger, le modèle Kilima Michel, Comfort Formula, MENEX (Man Environmental Heat Exchange Model), MEMI (Munich Energy-Balance Model for individuel). La méthode généralement appliquée dans l'évaluation du confort thermique extérieur par l'utilisation des indices biométéorologiques est tirée de l'hypothèse que, dans une certaine ambiance l'être humain atteint son équilibre thermique en se basant sur un régime statique. Elle utilise des approches numériques pour résoudre l'équation de la conservation qui gouverne le transfert d'énergie et les écoulements d'air dans un espace extérieur

Parallèlement plusieurs indices ont été développés tel que PMV (vote moyen prévisible, initialement conçu pour l'intérieur), la température physiologique équivalente PET (Höppe 1999), SET*(Température effective standard, Gagge et al 1967), PT* (Température perçue, Jendritzky, 2003) et Comfa (Brown et Gillespie, 1986).

Des études récentes ont souvent utilisé des indices de confort thermiques, initialement développés pour l'intérieur, comme le vote moyen prédictif (PMV) développé par Fanger. Il présente la valeur moyenne du vote sur la sensation de confort thermique, exprimée par un grand nombre de personnes, exposées à la même ambiance thermique. Il est aussi utilisé comme ISO730 (ISO, 1994). Afin d'appliquer cet indice à l'extérieur Jendritzky et Nübler

(1981) ont ajouté un modèle de rayonnement baptisé Klima-Michel Model (KMM), (Tsuyoshi, 2013).

D'autres études ont employé la température effective (ET*), et la température effective standard SET*. Ces indices sont pareillement, basés sur l'équation du bilan thermique dans le cas statique. Cependant, cette hypothèse ne convient pas à l'extérieur où les variations temporelles et spatiales sont très larges. Même les indices tels que OUT-SET* (une version du SET* pour l'extérieur, Pickup et de Dear 2000), et la température physiologique équivalente (PET, Hoppe 1999) qui étaient conçus initialement pour l'extérieur, sont également basés sur l'équation du bilan thermique du corps humain. Bien que la pertinence des indices PMV, ET*, SET*, et le PET était parfois démontrée un peu limitée par rapport à l'extérieur (voir, par exemple, Spagnolo et De Dear 2003), ils prennent tous en compte les quatre paramètres environnementaux qui influent sur le confort thermique : température de l'air, la température moyenne de rayonnement (T_{mrt}), l'humidité et le mouvement de l'air. PMV et SET* comprennent également l'isolation des vêtements et le niveau d'activité (Tsuyoshi, 2013).

Thorsson et al. (2004) ont comparé entre le comportement des usagers et les conditions environnementales dans un parc urbain à Göteborg en Suède. Une dissonance était aperçue entre le PMV et le ASV, ainsi que 41% des valeurs calculées du PMV n'étaient pas incluses dans l'intervalle du modèle de Fanger.

L'indice de confort physiologique employé dans notre étude est le PET, il est basé sur le modèle thermo-physiologique Munich energy balance model pour l'individu (MEMI). Il est défini comme étant la température de l'air à laquelle, dans un local typique, le bilan énergétique du corps humain (activité légère, métabolisme de 80watts et la résistance des vêtements 0.9clo) est équilibré avec les mêmes températures internes de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures (Höppe, 2002). Il présente un des indices les plus recommandés dans les guides allemands pour la planification urbaine et régionale (VDI, 1998). Dans une recherche menée par Thorsson et al (2007), les résultats obtenus suite à une comparaison entre la sensation thermique actuelle, PMV et PET, ont montré une meilleure corrélation entre PET et ASV, comparé au ASV et PMV. Selon Katzschner (2006) l'avantage dans l'utilisation du PET est la facilité dans l'interprétation et la compréhension des résultats par tous les acteurs.

Prata-Shimomura et al., (2009) ont comparé entre les indices de confort suivants : HL (Heat Load), PET et NWCT (New Wind Chill Temperature). L'analyse des résultats de l'indice PET a révélé des conditions thermiques plus douces comparées à HL qui a traduit un scénario très chaud.

Quand à Chen et al (2012), ils ont classé les indices de confort selon deux classes :

1. Méthodes statiques (Steady-state) :

Ces modèles assument que les personnes exposées à une ambiance climatique atteindront leur équilibre après un certain temps et envisage une solution numérique à l'équation du bilan d'énergie qui gouverne la thermorégulation. Parmi ces indices : L'indice de vote moyen

prévisible, la Température Equivalente Physiologique (PET), cet indice convient pratiquement pour les analyses du confort extérieur d'une manière qu'il traduit l'évaluation d'un environnement très complexe par un scénario intérieur simple sur des bases physiologiques simples qu'on peut facilement comprendre et interpréter. Ces indices sont considérés comme outils analytiques pour l'évaluation de la réponse à une ambiance thermique.

En ce qui concerne les modèles statiques, Gagge (1986) présente le modèle le plus connu. Il est basé sur le modèle de Pierce où le corps humain est composé de deux compartiments cylindriques (la peau et le noyau central). Ce modèle, qui est l'un des plus simples, a été développé pour un individu se trouvant dans un milieu homogène. D'après Yoshida (2006), ce modèle ne peut pas être utilisé dans l'évaluation du confort thermique extérieur à cause des conditions climatiques instables et inhomogènes.

En effet, l'application de ces modèles mathématiques pose deux problèmes :

- Les indicateurs utilisés tel que la température de la peau exigent un monitoring extensif difficilement appliqué à l'extérieur, raison pour laquelle la plupart des études étaient appliquées soit à l'intérieur ou dans des situations virtuelles (Bruse, 2009).
- Ces indicateurs exigent une bonne maîtrise des principes de la biométéorologie et la physiologie afin de pouvoir les appliquer dans la conception des espaces urbains. (Chen & Ng, 2012)

2. Les méthodes dynamiques (transitoires, non-steady assesment) :

Ce qu'on reproche aux méthodes statiques est la négligence de l'aspect dynamique du confort (Höppe, 2002).

Jusqu'à présent il n'existe pas un indice international pour les méthodes dynamiques. La plupart des méthodes sont basées sur le modèle à deux nœuds où l'être humain est traité comme deux compartiments isothermiques : La peau et le corps.

Le modèle Stolwijk est un modèle à plusieurs compartiments. Dans ce modèle le corps peut être divisé en 25 parties isothermiques réparties à travers 5 sections du corps humain. Chaque section se compose de : le cœur, les muscles, la graisse, la peau et un compartiment de la partie central.

Le modèle de Fiala divise le corps en 15 parties sphériques ou cylindriques. Chaque partie est divisée en plusieurs nœuds. Chaque segment, sauf le visage et l'épaule, en trois secteurs : antérieur, postérieur, inférieur. Le modèle de l'université de Berkeley divise le corps en seize segments, chaque segment est composé de : noyau, muscles, graisses et peau. Ce modèle prédit la réponse physiologique en régime transitoire et pour des conditions extérieures non uniformes. La distribution de la température locale et du flux de chaleur peut être visualisé grâce à une interface graphique dans ce modèle (Imessad & Aït Messaoudène, 2008).

Chen et Ng (2012) ont appliqué la méthode dynamique dans leur indice de confort TNMs. Cet indice présente une mise à jour du modèle à deux nœuds de Gagge, caractérisé par l'introduction de l'effet du vent et le développement d'un modèle en 3D qui traduit la réponse d'un individu aux stimuli environnementaux. D'autres paramètres individuels ont été aussi

introduit tel que les propriétés corporelles, le niveau d'acclimatation, l'extension du modèle de deux nœuds à un modèle multi nœuds afin de brider toutes les parties du corps. Ce modèle s'est beaucoup inspiré du système BotWorld quoiqu'il fût appliqué sur des cas réels. La comparaison entre les résultats obtenus du TNMs et PET ont démontré l'inadéquation des approches statiques à l'évaluation du confort thermique extérieur et l'avantage qu'offraient les méthodes dynamiques.

En comparant les différents modèles d'évaluation de l'impact de la morphologie urbaines sur le confort thermique extérieur, les modèles numériques présentent un moyen plus précis. Ces modèles utilisent des méthodes numériques pour résoudre l'équation de conservation qui régissent le flux d'eau et le transfert de chaleur dans un espace ouvert. Ils présentent les méthodes les plus efficaces pour les recherches sur les températures, les flux d'air et les indices de confort, les paramètres de confort d'entrée sont souvent les mêmes.

3.10. Les aspects du confort thermique extérieur :

Selon Bruse (2008), le confort thermique présente deux aspects physiques objectifs et subjectifs préférentiels. Le piéton se déplace dans son environnement urbain. La durée pour atteindre l'état stationnaire qui reflète un équilibre énergétique peut prendre 20mn (équivalent d'un déplacement le long d'une distance de 1,6km pour une vitesse de 1,34m/s). Il proposa alors une nouvelle approche « le système multi-agent » BOTworld où le clim BOTS présente le piéton et la valeur de la sensation thermique. Le principe du modèle est le suivant :

Chaque piéton est représenté par le programme « agent ». Chaque agent se distingue par sa propre personnalité et son propre système de régulation thermique. Les agents se déplacent d'une manière autonome dans l'environnement modèle expérimentant différentes séquences microclimatiques. Ils ont des plans individuels générés en utilisant des points de routage. Ils réagissent sur d'autres agents (principalement pour la simulation de la marche). Les décisions de routage peuvent être modifiées en fonction de l'évaluation du climat local (Bruse, 2008).

La perception subjective du confort thermique mérite d'être plus approfondie. Par contre les méthodes de modélisation offrent le plus de possibilité de simuler les différents scénarios et de tester toutes les solutions conceptuelles proposées en utilisant plusieurs outils (Chen et Ng, 2012). Les concepteurs, ainsi, peuvent utiliser ces méthodes quantitatives pour une meilleure évaluation du confort thermique extérieur et d'optimiser l'impact de l'urbanisation sur le microclimat.

3.11. Calibration des indices du confort :

Les approches adaptatives et celles du calibrage séparé, sont généralement appliquées aux modèles physiologiques. Elles compensent l'adaptation des participants aux conditions extérieures et contribuent donc à l'amélioration de la capacité de prédiction de ces modèles (Thitisawat, 2011).

Les indices thermiques extérieurs peuvent être pondérés en fonction de la température moyenne afin d'éviter toute confusion qui pourrait se produire suite à l'utilisation de plusieurs échelles.

Monteiro a adopté une méthode inductive expérimentale basée sur un monitoring où les variables microclimatiques ont été enregistrés. Associés aux questionnaires dans lesquels les usagers reportaient leurs appréciations subjectives du confort. Des analyses statistiques des données recueillies ont été utilisées, basées sur la régression afin de développer un nouveau modèle calibré (Monteiro, 2006).

Selon Monam et Rückert, il est impossible de généraliser l'utilisation des mêmes valeurs des indices à travers le monde. Par conséquent, ils ont utilisé l'analyse de régression ordinale dans leur étude afin de calibrer le PET. L'application des données propres à l'Allemagne (Katzschner, 2011) et ceux de Téhéran (Monam & Ghazizadeh 2012), a montré une nette différence dans la perception du stress thermique (Tableau 3.1). Pour une personne sédentaire qui porte des vêtements typiques à l'intérieur, le confort thermique était déterminé en fonction des valeurs comprises entre 18 et 23°C pour PET en Allemagne et entre 25 et 28,5°C en Iran (Monam, 2011).

Tableau 3.1: Calibration du PET (°C) en Allemagne, Hong Kong, Brazil et Tehran (Basée sur des données empiriques)

PET (°C) Tehran (Monam, 2011)	PET (°C) Germany (Katzschner, 2011)	Thermal perception	Grade of physiological stress
< 17.5	< 13	Cool	Moderate cold stress
17.5-25.0	13-17	Slightly cool	Slight cold stress
26-32.0	18-28	Comfortable	No thermal stress
33-36.0	29-34	Warm	Moderate heat stress
37-40.0	35-41	Hot	Strong heat stress
> 41.0	> 42	Very hot	Extreme heat stress

Au lieu d'utiliser des échelles multiples, les indices peuvent aussi être ajustés en fonction de la température de l'air moyenne à long terme, permettant ainsi à la même échelle d'être utilisée partout (Tseliou, 2010). Afin de pouvoir comparer les deux indices du confort THI et K avec ASV, Tseliou et al (2010) ont utilisé une transposition de l'échelle originale de l'indice à l'échelle de la sensation thermique.

La correction de l'indice au lieu de corriger l'échelle était dans le but d'éviter la confusion que pourraient plusieurs échelles produire. Cette correction était en fonction de la température de l'air moyenne. Une petite amélioration était obtenue comparée aux résultats obtenus des indices originaux.

3.12. Les paramètres microclimatiques dans la modélisation du confort thermique :

Le confort thermique extérieur dépend d'un large éventail de facteurs météorologiques et personnels. Des études ont montré des effets assimilés de la vitesse du vent, de la température de l'air, de l'humidité relative et du rayonnement solaire sur la perception et le confort général dans un environnement urbain.

Le confort thermique est atteint lorsque divers stimuli thermiques sont équilibrés. Par conséquent, si la température ambiante augmente, des mesures de refroidissement sont amorcées afin de rejoindre le niveau du confort pour baisser la température ambiante soit par le vent, l'ombre ou le refroidissement par évaporation.

Concernant les paramètres météorologiques, D'après Katzschner, une grande importance est attribuée aux rayonnements solaires/thermiques et le vent. Ces deux éléments varient dans le temps et l'espace, créant ainsi des conditions de confort variables au sein du même site et dans un même temps.

a) La température de l'air :

Des observations portées par Nikolopoulou et Lykoudis (2007) sur l'utilisation des espaces extérieurs dans des régions méditerranéennes, ont révélé que la température de l'air et le rayonnement solaire étaient les paramètres les plus déterminants alors que la vitesse du vent et l'humidité relative n'avaient qu'un faible effet. En général, les gens préfèrent les zones ombragées lors des températures de l'air très élevées. Le nombre des usagers se réduit avec l'augmentation de la température. La préférence du soleil, diffère d'une saison à l'autre et selon les activités exercées. L'utilisation de l'espace pendant le jour, s'est révélée également fortement dépendante des paramètres météorologiques.

La température de l'air aux alentours du corps humain détermine le flux de chaleur entre le corps et l'air. Cependant dans l'environnement physique la température de l'air change d'un point à l'autre et même la plus proche du corps est influencée par les conditions de la couche limite. JuYorn Know (2005), signale que la température de l'air doit être prise en fonction de la couche adjacente au corps humain, elle se distingue par sa valeur élevée pendant la période froide et ne doit pas être confondu avec la couche limite.

D'après Ali-Toudert et al, dans le climat chaud et aride, la température et l'humidité de l'air sont peu dépendante de la géométrie urbaine. Par conséquent, ces facteurs sont des indicateurs moins pertinents pour le confort thermique extérieur en été (Ali-Toudert et Mayer, 2006) l'année

b) L'humidité relative de l'air :

L'humidité ambiante est généralement mesurée en termes d'humidité relative, principalement en raison de la disponibilité d'instruments de mesure simples et peu coûteux. Cependant, l'humidité relative n'est pas le facteur déterminant selon la physiologie humaine. L'évaporation à partir des poumons et l'évaporation de la sueur à partir de la surface de la peau dépendent de la différence d'humidité absolue (g/kg) (Krüger et al.2010).

Généralement, dans des conditions froides, la faible humidité a peu d'effet direct sur le confort thermique, même s'il peut y'avoir des effets indirects, tels que le changement de la valeur d'isolation des vêtements. Dans des conditions chaudes, le corps humain a besoin d'augmenter les pertes de chaleur pour maintenir le confort thermique. Ceci est largement réalisé en réduisant les vêtements et par la transpiration et les pertes de chaleur correspondantes associées à la chaleur latente d'évaporation. Comme l'efficacité de l'évaporation diminue lorsque que l'humidité relative de l'air augmente, elle devient un paramètre beaucoup plus important dans les climats chauds. En outre, comme l'efficacité de l'évaporation augmente avec la vitesse du vent, dans les climats froids, il est souvent souhaitable de réduire les vitesses du vent.

c) Le vent :

Le vent joue un rôle important dans le confort thermique des espaces urbains. Bien que plusieurs modèles de complexité différente aient été proposés pour caractériser l'effet du vent sur les piétons. D'après Stathopoulo (2009) plusieurs critères ont été introduits dans le domaine de l'aérodynamique pour évaluer uniquement les forces mécaniques induites par le vent sur le corps humain, le confort et la sécurité. Cependant, un large éventail de paramètres supplémentaires était négligé à l'essor de la température de l'air, L'humidité, le rayonnement solaire, la qualité de l'air, le niveau des vêtements, l'âge, le sexe, etc.

Dans les climats plus froids, le vent peut augmenter la sensation d'inconfort thermique. Alors que, dans des climats chauds, le vent provoque des mouvements d'air et peut avoir un effet de refroidissement et améliore ainsi le confort thermique. La température du vent peut également influencer sur le confort thermique (Toner, 2015).

Khedari et al., ont trouvé que l'augmentation de la vitesse du vent de 0,3 m/s à 1 m/s engendre une diminution d'environ 1,9 ° C dans la température de l'air.

Et l'augmentation du rayonnement solaire de 136Wm⁻² à 300Wm⁻² engendre une augmentation d'environ 2,4°C dans la température de l'air.

Les recherches de Havenith (2002) ont montré que le vent et l'activité peuvent réduire l'isolation des vêtements de 50% et la résistance à la vapeur de 80% comparé aux conditions statiques, comme il propose d'améliorer les modèles de confort thermique en introduisant l'effet dynamique des activités et les vitesses du vent. Le mouvement d'air et du corps ont un grand effet sur la résistance des vêtements.

d) Les échanges radiatifs :

Toute évaluation du confort thermique doit tenir compte des effets des conditions soleil/ombre. Les coordonnées solaires, la quantité de rayonnement absorbée par les nuages, la poussière et les particules dans l'atmosphère et le rayonnement solaire absorbée et réfléchi par les bâtiments doivent être considérés.

Les échanges radiatifs exercés sur un être humain sont présumés être l'indicateur le plus important du confort thermique. Gulyas et al. (2006) ont confirmé une forte relation entre la charge thermique exercée sur le corps, exprimée en température physiologique équivalente, (PET) et la température moyenne radiante T_{mrt} en utilisant le modèle Rayman.

Dans une étude menée par Hodder & Parson (2007), l'impact du rayonnement solaire sur le confort thermique de 08 personnes était évalué à l'intérieur d'une voiture selon 03 scénarios :

- En variant l'intensité du rayonnement (0-200-400 et 400wm⁻²)
- La répartition spectrale du rayonnement.
- Le type de verre (04 types de verre selon 04 contenus spectraux).

Une augmentation du niveau d'inconfort avec l'augmentation de la quantité du rayonnement a été observée. Le vote sur la sensation thermique augmentait d'une échelle pour chaque augmentation de 200 Wm⁻² dans le rayonnement direct (Hodder & Parsons ,2007).

En effet, la température moyenne radiante T_{mrt} est le paramètre météorologique le plus important des données d'entrée dans le bilan énergétique d'une personne pendant la période estivale. Par conséquent, elle a une très grande influence sur les indices thermophysiques comme PET ou PMV.

Le rayonnement de courte et de longues longueurs d'onde jouent un très grand rôle dans l'évaluation du confort thermique. Cependant, les mesures et les méthodes disponibles pour le calcul sont très difficiles à appliquer dans les zones urbaines. Cependant, les effets du rayonnement de courtes et longues longueurs d'onde sur la biométéorologie peuvent être traduits à travers un paramètre de synthèse qui est la température moyenne radiante (Matzarakis et al, 2007).

T_{mrt} peut être obtenue grâce à plusieurs méthodes. La procédure expérimentale est très complexe, chronophage et coûteuse. Elle nécessite la combinaison des pyranomètres et des pyrgeomètres, orientés dans six directions (4 points cardinaux, vers le haut, vers le bas) pour mesurer la totalité du rayonnement de courte longueur d'onde et de longue longueur d'onde qui sont essentielles pour une personne dans environnement en 3D (Fanger, 1972 ; Höppe 1992). Les densités moyennes du flux de rayonnement du corps humain S_{str} peuvent être calculées à partir des valeurs mesurées du rayonnement de courte et de longue longueur d'ondes (Hoppe , 1992) en fonction de l'équation suivante :

$$S_{str} = a_k \sum_{i=1}^6 K_i F_i + a_l \sum_{i=1}^6 L_i F_i \quad (\text{eq.3.1})$$

K_i est le rayonnement de courte longueur d'onde (solaire) et L_i est le rayonnement de longue longueur d'onde (terrestre), et a_k et a_l sont les coefficients d'absorption pour le rayonnement court longues longueur d'onde. F_i est l'angle solide des surfaces. Par la suite T_{mrt} peut être calculée grâce à la loi de Stefan Boltzmann (en°C), σ est la constante de Stefan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W} / \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$):

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{(S_{str} / (a_l \sigma))} - 273.2 \quad (\text{eq.3.2})$$

Les flux de rayonnement mesurés doivent être multipliés par des facteurs de pondération pour le corps humain. Pour un homme debout, les flux de rayonnement entrants doivent être connus dans les quatre points d'horizons (position verticale des instruments) qui sont plus importants que les flux de rayonnement dans la direction verticale. L'avantage de cette méthode c'est qu'elle fait partie intégrante des mesures de rayonnement à courtes et à longues longueur d'ondes par contre son inconvénient est qu'elle ne peut pas être appliquée aux investigations et études expérimentales à long terme.

Dans une étude sur le confort thermique extérieur Lutz Katzschner (2006) a mentionné qu'on peut utiliser des facteurs de pondération très simples pour obtenir la température moyenne radiante à partir de la température de l'air ou la température du globe (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Les facteurs de correction pour dériver la température moyenne radiante (T_{mrt}), à partir de la température de l'air et la température du globe (TG) ;

Tl	Tmrt = Tl + Radiationfactor			Tmrt = TG + windfactor	
	Sunny factor	half cloudy factor	cloudy factor	v m/s	factor
< 5	2	0	0	< 1	0
10	5	3	2	1-2	+1
15	10	6	2	2-3	+ 2
20	15	10	4	3-4	+ 3
25	20	13	6	4-5	+ 4
30	25	17	8	> 5	+ 5
> 30	30	20	10		

Dans le cas des études à long terme et en l'absence des mesures du flux de rayonnement, T_{mrt} peut être calculée grâce à des modèles numériques.

Rn réalité, plusieurs logiciels ont été développés pour simuler T_{mrt} en milieu urbain tel que TOWNSCOPE (Teller & Azar, 2001). Il est basé sur la CAO, il simule les variations spatiales de l'accès solaire et T_{mrt} dans des milieux urbains complexes. Le confort thermique ne peut être calculé que sur une base journalière, mensuelle ou annuelle et, étant donné que les données vectorielles sont utilisées, l'extension spatiale est limitée. Le logiciel RayMan (Matzarakis, 2000) est un outil qui simule différents indices thermiques y compris T_{mrt} . C'est un modèle stationnaire qui n'exige l'introduction que de très peu de paramètres météorologiques. C'est un outil très populaire et convivial pour les chercheurs, les urbanistes et les praticiens. Bien que RayMan est couramment utilisé, il présente quelques lacunes principales par rapport au calcul des densités de flux de rayonnement et des températures de surface en trois dimensions et par conséquent, la T_{mrt} résultante (Thorsson et al., 2007). Le modèle tridimensionnel ENVI-met (Bruse, 1999) simule les flux de rayonnement, la température, l'écoulement du vent, de la turbulence et l'humidité, ainsi que T_{mrt} avec une très bonne résolution spatiale et temporelle. Le modèle est basé sur une grille. En raison de sa complexité, la taille du domaine du modèle est limitée à $250 \times 250 \times 25$ grilles. Comme les autres modèles mentionnés ci-dessus, ENVI-met calcule T_{mrt} selon Fanger (1972); l'environnement est divisé en plusieurs surfaces, l'atmosphère (ciel) et la surface du sol à travers lesquelles le rayonnement direct, diffus et réfléchi en courtes longueurs d'ondes et le rayonnement en grandes longueurs d'onde sont pris en compte. D'après Ali-Toudert (2005) a trouvé une bonne concordance entre les flux de rayonnement à courtes longueurs d'ondes simulées et ceux mesurés sur terrain. Cependant, les flux de rayonnement en longues longueurs d'onde simulées ont révélé des disparités avec ceux mesurés sur terrain (différence qui arrive à 50 Wm^{-2}) (Lindberg et al, 2008).

Pour appliquer ces modèles à des situations simples, les paramètres atmosphériques suivants sont nécessaires :

- Rayonnement solaire direct
- le rayonnement solaire diffus
- Rayonnement à courtes longueurs d'ondes réfléchi

- Le rayonnement atmosphérique (longue longueur d'onde)
- Rayonnement longue longueur d'onde à partir des surfaces solides

Les paramètres suivants qui décrivent l'environnement doivent aussi être définis :

- Facteur de vue de ciel.
- Angle solide des différentes surfaces.
- L'albédo des différentes surfaces.
- Emissivité des différentes surfaces.

A travers le modèle microclimatique tridimensionnel ENVI-met, Ali-Toudert et Mayer (2007) ont utilisé l'indice du confort PET pour illustrer les améliorations portées sur la conception urbaine (Rue urbaine) grâce à l'ombre projetés par les éléments, tels que les arbres et les surplombs. Emmanuel et al, (2007) ont utilisé le modèle ENVI-met pour étudier l'effet d'ombre à Sri Lanka ; Cependant, des lacunes ont été trouvées dans l'étude spécifique utilisant Envi-met. Elles comprenaient : 1) La masse thermique des bâtiments. ; 2) des températures intérieures constantes et des albédos identiques pour toutes les surfaces des bâtiments (ce qui n'est pas le cas pour tous les bâtiments); 3) la transmission thermique des murs et des toits est la même pour tous les bâtiments. ENVI-Met n'a pas non plus la capacité de simuler les brises de mer au sein du modèle, ce qui est un élément important pour la ventilation urbaine (Emmanuel et al., 2007).

Dans une comparaison entre les différentes méthodes d'évaluation de la température moyenne radiante : - Mesures du rayonnement, température de globe (différentes tailles et couleurs) et simulations par l'utilisation du modèle SOLWEIG (Lindberg et al. 2008 et ENVI-met (www.envi-met.com/) afin d'évaluer l'influence de la conception urbaine sur le confort Thermique intérieur et extérieur Katzschner et Thorsson ont trouvé une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles simulées (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Comparaison de l'évaluation de la Tmrt à partir d'Envi-met et celle à partir de SOLWEIG.

	SOLWEIG	ENVIMET	from globe thermometer measurements	from vertical and horizontal measurements
Tmrt in °C	45	43	47	44

Dans les canyons urbains et dans des conditions ensoleillées, Tmrt peut être supérieure à Ta d'une valeur de 30K. En outre, même pour les zones ombragées Tmrt est encore plus élevée que Ta de plusieurs degrés, à cause du rayonnement solaire diffus et réfléchi, l'accent dans ce cas est mis sur le calcul des températures de surface et les températures moyennes radiantés.

D'après Huang et al., Rayman 1.2 est facile à utiliser, mais il ne peut calculer Tmrt que par rapport à un seul point, il présente des erreurs significatives lorsque la hauteur solaire est faible, et il ne peut pas considérer le rayonnement réfléchi de courtes longueur d'ondes (Thorsson, 2007). ENVI-met peut calculer Tmrt sur une surface continue, mais il ne peut pas traiter des géométries vectorielles, et transforme les bâtiments, la topographie et la végétation en format matriciel. La simulation par ENVI-met exige un ordinateur puissant, pour une seule étape le calcul peut prendre plus de 6 h, en plus un faible accord entre les prévisions des flux de rayonnement de longues longueur d'ondes et les données mesurées. SOLWEIG est un outil

rapide et convivial, il permet l'échange de données avec le modèle numérique d'élévation (DEM), La formule de SOLWEIG pour le calcul du rayonnement solaire diffus et réfléchi est très simplifiée, elle présente des limites lorsqu'elle est appliquée à des espaces urbains denses (facteur de vue du ciel < 0,65) (Huang et al, 2014).

e) **Impact des paramètres personnels :**

i) Le Métabolisme :

L'estimation du taux du métabolisme est fondamentale pour l'évaluation du confort thermique. La chaleur métabolique augmente avec l'augmentation de l'activité (Ma) à cause de l'augmentation de la demande en oxygène des muscles. Comme elle dépend aussi de l'âge, du genre et le niveau de musculation.

Les paramètres intrinsèques à l'individu, tel que : l'âge, le sexe, le poids et le régime alimentaire influencent le jugement du confort d'un individu (Havenith, 2002). La tolérance à la chaleur par exemple s'amenuise avec la vieillesse ou les souffrances de charges pondérales (Smolander et al.1990).

Selon la norme ISO 8996 le métabolisme peut être évalué en fonction de plusieurs méthodes qui peuvent être classées selon trois niveaux selon le degré de précision : Le premier niveau correspond au type d'activité, le deuxième correspond à l'estimation du métabolisme, le troisième niveau du métabolisme est directement mesuré par la calorimétrie dite directe. Ce dernier est difficile à appliquer dans les études sur le confort extérieur c'est pourquoi Havenith (2002) propose de développer d'autres recherches ou la dimension psychologique sera inculquée ainsi que le besoin des mesures précises de M à travers le classement des activités.

Le métabolisme peut aussi être mesuré par l'enregistrement de la fréquence cardiaque HR (consommation en oxygène) à différents paliers d'un effort musculaire.

Eduard Krüger et al (2010), ont évalué l'impact du genre, du poids et d'âge sur la sensation thermique suite à des enquêtes et des campagnes de mesure effectuées à Curitiba (Brésil). Les intervalles d'âge étaient entre : 14-24, 25-39,40-59,60-90. Les résultats obtenus ont montré que l'appréciation des conditions thermiques était presque identique pour les deux sexes pendant la période froide. Par contre les femmes sentaient l'inconfort beaucoup plus que les hommes pendant la période estivale chaude.

En ce qui concerne l'impact de l'âge, dans les conditions froides, la sensation thermique était semblable pour les deux sexes avec de petites différences. Contrairement pour les conditions chaudes où le groupe jeune était beaucoup plus sensible à la chaleur que les autres groupes. L'impact du poids sur le confort thermique était plus édicté chez le sujet féminin comparé au sujet masculin.

Andrade et al., (2011) ont trouvé que le pourcentage de personnes qui votent pour les changements de la température de l'air diminue avec l'âge, autant dans des conditions chaudes que dans des conditions froides. Lorsque les températures sont basses : 25% des personnes âgées de moins de 35 votent « pour un peu plus chaud » comparé à seulement 15% de ceux de plus de 54 ans. Ces résultats sont expliqués par une augmentation moyenne de l'isolation des

vêtements chez les personnes âgées. Une diminution générale de la sensibilité avec l'âge a également été observée dans des conditions plus chaudes.

Les modèles de confort basés sur le bilan énergétique humain ne peuvent pas expliquer pleinement l'influence du climat sur l'utilisation des espaces publics, les facteurs psychologiques et comportementaux jouent également un rôle très important dans le confort thermique extérieur (Lin, 2009).

Le choix des vêtements peut également être lié à des aspects culturels. Ainsi, le mode vestimentaire de certaines personnes semble dépendre des traditions culturelles plutôt que du climat alors que la plupart des gens choisissent leurs vêtements en fonction des conditions météorologiques quand ils se sentent thermiquement inconfortables (Yahia.M.W, 2012).

ii) Impact de l'activité :

D'après SHIMAZAKI et al (2014), dans les espaces extérieurs, pour les deux activités : la marche et le footing, la production de la chaleur métabolique a un impact plus important que le rayonnement sur l'état thermique. Ainsi, bien que les outils d'évaluation de la charge thermique soient très utiles pour évaluer quantitativement le changement dans le bilan thermique du corps humain à travers la répartition du flux d'énergie autour du corps en plusieurs composants, il y a des limites dans leur estimation de la sensation thermique dans le cas des activités à haute intensité (Shimazaki et al, 2014).

Il a été démontré que les effets du mouvement du corps et le mouvement de l'air sont très importants sur la résistance thermique des vêtements, et doivent être pris en compte dans les modèles de prédiction de confort thermique. Cependant, cet effet est faible pour les activités légères et stationnaires associés à une faible vitesse de l'air. Comme ils doivent être considérés dans les algorithmes de l'échange de chaleur par convection. Comme il a été montré que dans le cas des vêtements à haute résistance à la vapeur, le confort peut être limitée à cause de la mouillure élevée de la peau. Les effets sur le confort thermique de la réduction dans la résistance de la vapeur en raison de mouvements de l'air et du corps sont également montrés pour avoir un impact substantiel sur les limites de confort en termes de mouillure de la peau et ne peuvent pas être négligés (Havenith, 2002).

Ainsworth et al. (2000) ont classé les activités physiques spécifiques et leur MET correspondant, cette classification est considérée comme le Compendium des activités physiques.

3.13. Aspects Psychologiques de la modélisation du confort thermique extérieur :

Les paramètres psychologiques ont aussi leurs impacts sur l'appréciation du confort extérieur, tels que la connaissance/l'expérience, l'attitude/la prévision, les croyances/les préférences et le contrôle. Des études ont démontré qu'un endroit qui offre une variété de microclimats augmente la tolérance et la satisfaction des usagers (Thorsson et al. 2004).

Selon Jones (2002), la plus grande limitation des modèles de confort physiologique est le degré d'infidélité entre le confort perçu et les variables physiologiques simulées. En outre, les différentes perceptions relatives à ce qui signifie « confortable » se produisent à l'extérieur

parce que les individus ont beaucoup plus de tolérance pour les conditions climatiques extérieurs (Johansson e& Rohinton, 2006). De nombreux facteurs non physiques affectent la perception du confort, tels que les attentes météorologiques et l'adaptation.

En effet le terme « adaptation » (Nikolopoulou & Steemers, 2003) peut être défini comme la diminution progressive de la réponse de l'organisme à un stimulus après une exposition répétée, elle implique toutes les actions qui aident à survivre dans un certain environnement. Dans le contexte du confort thermique, elle présente l'ensemble du processus à travers lequel les personnes peuvent améliorer les conditions de leurs environnements afin de répondre à leurs besoins. Elle peut être : physique, physiologique et psychologique.

D'après Nikolopoulou et Steemers (2003), on peut distinguer alors :

a) Adaptation physique :

L'adaptation physique implique tous les changements réalisés par une personne, afin de s'adapter à son environnement. Elle peut être réactive ou interactive. Dans l'adaptation réactive, tous les changements se produisent au niveau de la personne elle-même, tel que le changement des vêtements, de posture et de position, ou même au niveau du métabolisme en consommant des boissons chaudes ou froides. Quant à l'adaptation interactive, les changements sont appliqués sur l'environnement, tels que l'ouverture d'une fenêtre, tournant un thermostat, l'ouverture d'un parasol, etc.

Walton et al., ont développé l'indice du confort « The Wellington Comfort Index » qui mesure l'adaptabilité dans les espaces extérieurs (Walton et al, 2007). 649 personnes ont été questionnées à travers trois sites pendant 09 mois. Cet indice quantifie le degré auquel une personne doit changer son comportement pour maintenir son confort thermique (Walton et al., 2007), évalué comme suit :

$$25,52 + 10,65 \times \text{Vent moyen} - 5,77 \times \text{Vent maximum} + 0,85 \times \text{Température moyenne radiante (exposée)} + 0,53 \times \text{Température ambiante.}$$

b) L'adaptation Physiologique :

L'adaptation physiologique implique des changements dans les réponses physiologiques résultantes après une exposition répétée à un stimulus, conduisant à une diminution progressive de l'inconfort causé par une telle exposition. Elle est nommée l'acclimatation physiologique dans le contexte de l'environnement thermique. Un tel mécanisme a un effet capital dans les climats extrêmes.

c) L'adaptation psychologique :

La réponse humaine à un stimulus physique ne dépend pas de son ampleur, mais de l'information que les personnes ont eue sur une situation particulière. Par conséquent, les facteurs psychologiques ont une grande influence sur la perception thermique d'un espace et les changements qui se poursuivent, comme décrit ci-dessous :

- Les gens peuvent tolérer de larges changements de l'environnement physique, à condition qu'ils soient produits naturellement.
- Les attentes peuvent grandement influencer les perceptions thermiques, à titre d'exemple : dans les bâtiments ventilés naturellement, les gens expectent souvent des

variations temporelles et spatiales dans les températures, alors que, dans les espaces climatisés, ils prévoient un environnement beaucoup plus stable thermique.

- Les niveaux d'adaptation sont établis en fonction des expositions expérimentées antérieurement.
- Le temps d'exposition est défini selon les conditions du confort présentes. S'il s'agit d'un espace de transit, le temps d'exposition est très court. S'il s'agit d'un espace de loisir, les gens modifient le temps qu'ils passent à l'extérieur, en fonction de leurs besoins.
- Les personnes qui peuvent contrôler la source d'inconfort (rester à l'ombre où s'exposer au soleil), tolèrent les grandes variations dans leur environnement thermique comparé à ceux qui sont dans l'obligation de rester (ex : Ceux qui ont des Rendez-vous).
- Les conditions environnementales statiques deviennent avec le temps monotones et intolérables. Les usagers ont souvent tendance à préférer les conditions plutôt variables.
- L'adaptation est aussi influencée par l'expérience, le temps d'exposition, le contrôle perçu et les attentes des usagers. (Nikolopoulou & Steemers, 2003). Un exemple d'adaptation psychologique est l'acclimatation. Quand une personne se déplace dans un nouveau pays ou une ville dont le climat est différent du sien et lorsque les conditions du vent, de la température ambiante et les niveaux de rayonnement solaire sont différents, les nouvelles conditions peuvent se sentir moins confortables thermiquement jusqu'à ce qu'elle s'adapte au nouveau climat. Cela peut prendre deux semaines. Cette période est plus importante dans les climats froids. L'âge, la masse corporelle et le taux métabolique peuvent également affecter le temps nécessaire à l'acclimatation (Victoria, 2015).
- L'adaptation psychologique est aussi influencée par l'expérience telle que les aspirations des différentes saisons qui changent en fonction de la saison précédente. Par exemple, le printemps est généralement perçu comme plus chaud que l'automne, à cause de l'hiver (Nikolopoulou & Steemers, 2003). Par conséquent la perception du confort thermique varie d'une saison à l'autre. Ainsi, il est difficile à une conception urbaine d'assurer le confort thermique extérieur durant toutes les saisons. Cependant, en s'appuyant sur un outil de prévision du confort thermique basé sur des enquêtes réalisées durant toutes les différentes saisons, pourrai introduire cette dimension dans l'évaluation du confort (Lykoudis et Nikolopoulou, 2006).
 - Le confort thermique est aussi influencé par le sentiment d'appartenance ou de familiarité de la personne. Ce sentiment peut également influencer sur la perception du confort thermique, à travers les pensées ou les sentiments positifs éprouvés à l'égard d'un lieu particulier (Victoria, 2015).

Certains effets de l'adaptation physique peuvent être évalués numériquement. D'après Nikolopoulou et steemers, (2003), un individu peut ajuster la plage de sa température de 6 K. Un liquide à 5°C avec une capacité calorifique spécifique de 4,2 kJ°C⁻¹ kg⁻¹ a un effet de refroidissement de 42 kJ en supposant une température corporelle de 35°C équivalent à une baisse de 10 % dans le taux métabolique (Baker & Standeven, 1999).

Les travaux de Nikolopolopoulou comptent parmi les premiers travaux qui ont essayé d'adresser un regard sur le comportement des usagers et l'étude de son impact sur l'évaluation du confort thermique. Nikolopoulou et al (2001) ont étudié le confort extérieur à Cambridge en Grande Bretagne à travers des interviews adressées aux usagers afin d'exprimer leur

sensation thermique et un monitoring des paramètres environnementaux tel que la température de l'air, rayonnement solaire, etc). Les paramètres individuels ont été aussi considérés tel que : âge, sexe, vêtements, etc.). Cette étude a révélé une grande discordance entre le ASV et le PMV en plus 35% des personnes ont voté très chaud ou très froid pour des conditions qui étaient thermiquement acceptable.

Ces résultats l'ont conduit à conclure qu'une simple approche physiologique ne suffit pas pour l'évaluation du confort, d'autres facteurs doivent être considérés tel que : le passé thermique et l'expectation.

Nikolopoulou et Steemers (2003) ont proposé trois niveaux pour l'adaptation thermique : Physique, physiologique et psychologique. A travers leur analyse en utilisant le modèle de régression, ils ont trouvé que seulement la moitié des cas d'étude peuvent être expliquée par les conditions physiques et physiologiques. En termes d'implication sur les espaces extérieurs, les auteurs répliquent que ces résultats ne délimitent pas les solutions architecturales mais elles les enrichissent malgré la complexité de l'introduction de la dimension psychologique dans l'évaluation (les relations ne sont pas quantifiables).

Afin de déterminer la relation entre le microclimat et le niveau d'usage des espaces extérieurs, une recherche était menée par Zacharias et al (2001) à travers 07 sites dans la ville de Montréal. Les résultats obtenus ont démontré que, les conditions microclimatiques mesurées représentaient la principale cause de la variation des niveaux et des types d'activité. La température de l'air était la variable la plus importante. Une relation linéaire forte entre le nombre de personnes assises et la température de l'air était trouvée ($r=0.920$). Bien que la variation du niveau d'utilisation à travers les différents espaces publics ne puisse s'expliquer uniquement en termes de différences microclimatiques, l'usage de ces espaces variait principalement en fonction de ces facteurs.

Thorsson et al (2004) ont mené une recherche dans un parc urbain à Göteborg (Suède) où 280 personnes ont été interviewées. Elles étaient demandées de reporter la raison pour laquelle elles étaient dans le parc et leurs opinions sur la conception du parc. Leur sensation thermique était aussi évaluée à travers une échelle psychophysique de 07 points.

La comparaison entre les valeurs obtenues du PMV et ASV (vote sur la sensation thermique effective) ont révélée plusieurs discordances : ASV comptait 59% des interviewées ont une sensation chaude ou froide et 38% acceptable, le PMV en comptait 23% et 26% respectivement.

Ces résultats l'ont conduit à déduire que l'exposition transitoire et l'expectation ont une grande influence sur l'évaluation subjective du confort. Ainsi, les modèles statiques tels que le PMV risque de ne pas être le plus approprié pour l'évaluation du confort thermique à court terme. En guise de recommandations préliminaires ils proposent de créer une diversité microclimatique afin d'améliorer le confort physique et psychologique ainsi que l'utilisation des espaces extérieurs.

Thorsson et al (2007) ont étudié le confort thermique subjectif dans un parc et square à Tokyo. L'évaluation subjective était faite par PET (la condition neutre était estimée à 20°C) en parallèle, une échelle de 09 points était utilisée pour évaluer le confort subjectif de 1192 personnes similaire au PMV. La courbe du PET était pointue vers la zone chaude.

Ces chercheurs ont aussi trouvé que les usagers qui restaient plus que 19-21min sont généralement ceux qui éprouvaient une sensation acceptable. Pour ceux qui ont voté hors zone du confort restaient moyennement 11mn. La corrélation entre PET et le niveau d'usage était faible ($R^2=0.24$). Ces résultats étaient expliqués par les différences entre les deux contextes climatiques et culturels d'études (Göteborg et Tokyo).

Dans une autre étude menée à Göteborg à travers 04 espaces publics : square, parc, cour, corniche, Eliasson et al (2007) ont interviewé 1379 personnes. La sensation thermique était évaluée en fonction de 09 points allant du extrêmement froid à l'extrêmement chaud. Ces chercheurs ont trouvé que 50% de la variance du comportement des usagers est expliquée par les trois facteurs : Nébulosité, Température de l'air et la vitesse du vent.

D'autres résultats obtenus par Lin (2009) à travers une étude faite sur le confort thermique extérieur dans un contexte subtropical, chaud et humide à Taichung à Taiwan. Un total de 505 personnes était interviewé les valeurs du PET rangeant de 21.3 à 28.5°C exprimant des conditions acceptables. Ces conditions correspondaient à un PET de 18 à 23°C dans un contexte Européen. Les résultats obtenus ont révélé que l'appréciation du confort varie d'un endroit à un autre. Etant donné que 90% de personnes qui visitaient le square public cherchaient à s'asseoir, soit à l'ombre des arbres ou à l'ombre des bâtiments, l'auteur à proposer d'intégrer les arbres et des abris afin d'améliorer l'utilisation des espaces extérieurs.

A partir de ces exemples on peut déduire l'importance du microclimat dans l'utilisation des espaces extérieurs. Les paramètres climatiques tel que la température de l'air, le rayonnement solaire et la vitesse du vent, semblent être les facteurs les plus importants dans l'évaluation du confort thermique. Une approche purement physiologique est insuffisante pour prédire le niveau du confort thermique. D'autres paramètres non climatiques peuvent contribuer à améliorer les conditions thermiques tel que l'adaptation, la culture, l'expérience, etc.

3.14. Evaluation du confort thermique extérieur/ méthodes empiriques :

Au cours de la dernière décennie on remarque un regain d'intérêt porté sur la qualité des espaces extérieurs et leur niveau du confort. Cependant, la plupart des recherches utilisent des indices purement physiologiques basés sur des modèles mathématiques relatifs au système de la thermorégulation, omettant ainsi la dimension subjective étroitement liée à l'usager, c'est pourquoi il est important d'introduire des données empiriques afin d'élargir la perspective d'analyse du confort extérieur (Boumaraf & Tacherift, 2012).

Nikolopoulou et Lykoudis (2006) ont essayé d'introduire la dimension psychologique dans l'évaluation du confort extérieur à travers une recherche pilote baptisé RUROS (Redécouvrir l'univers urbain et les espaces ouverts). De nombreux pays européens ont été investigués, 14 cas études, plus de 10.000 questionnaires jointes au collecte des données météorologiques correspondantes. Ils ont constaté que l'expérience récente et les attentes étaient

responsables de plus 10°C de variation dans la température neutre, suivant de près les températures climatiques saisonnières. Les intervalles du confort pour le printemps et l'automne (17,6 et 13.5°C) ont également été trouvés être plus large que pour l'été et l'hiver (5,9 et 9.6°C).

Communément, les études basées sur les enquêtes sont réalisées principalement en fonction des enquêtes transversales, où un grand nombre d'usagers est interviewé à travers différentes conditions environnementales. Les réponses recueillies peuvent fournir une sensation thermique d'une personne moyenne dans des conditions climatiques statiques. Toutefois, d'après Cheng et al, cette approche présente certaines limites parce qu'elle ne permet pas d'évaluer la sensation thermique dans des conditions climatiques changeantes. Chaque sujet a été interviewé une seule fois où la sensation thermique a été saisie dans une situation climatique relativement statique. En effet, l'évaluation des variations de la sensation thermique dans des conditions climatiques variables d'une même personne peut se réaliser à travers l'approche longitudinale. Dans cette approche, Un nombre réduit des sujets est interrogé selon différentes conditions environnementales. Ainsi, la sensation thermique qui change en fonction du changement des conditions climatiques peut être observée (Cheng et al, 2010).

Dans les enquêtes il est très important de vérifier le lieu de résidence des usagers et le temps qu'ils ont passé à l'extérieur lors des interviews. En effet, seulement les réponses des usagers qui habitaient dans la ville depuis plus de six mois et ceux qui ont passé plus de 15mn à l'extérieur qui doivent être considérés. Par conséquent la base de données sera réduite, ce qui exige un nombre important d'entretiens pour assurer une répartition régulière des répondants sur l'ensemble des variations climatiques (Krüger et al, 2010).

Visant à étudier la relation entre l'ASV et les données microclimatiques mesurées), des modèles de régression linéaire multiple ont été appliqué, en utilisant comme variables indépendantes température de l'air (° C), le rayonnement solaire global (W/m²), la vitesse du vent (m / s) et l'humidité relative (%). Cependant ces modèles ne font pas la distinction entre les parties ensoleillées et celles ombrées, les parties exposées au vent et celle protégées.

Katzschner (2006) a calculé l'indice du confort PET pour des endroits ombrés et d'autres exposés. A l'issue de son travail il a trouvé qu'il existe un écart constant de près de 5°C entre les valeurs de PET au soleil et celles à l'ombre, indépendamment de la température de l'air. Par conséquent, l'évaluation du rôle de l'ombre sur le confort thermique peut être facilement calculée.

Selon lui, la nature des activités est un autre facteur très important dans la planification des espaces extérieurs et le design urbain, ainsi il a défini les conditions thermiques recommandées pour chaque activité et les valeurs du PET correspondantes (Tableau 3.4). Une différence dans la température neutre enregistrée à travers plusieurs pays européens (Projet RUROS) a été signalée. C'est pourquoi il s'est avéré nécessaire d'examiner et de calibrer les indices du confort thermiques en fonction de la sensation subjective des usagers avant de les appliquer. Pour l'évaluation du confort dans les opérations d'aménagement il est important de définir les différents usages envisagés. Ces derniers jouent un rôle important sur l'attente et la sensation thermique des usagers.

Tableau 3.4: Indice du confort PET et l'activité correspondante en fonction des mesures et des interviews à Kassel/Allemagne (Katzschner 2002).

activities	needed thermal conditions for use of open spaces	PET ° C
sitting	warm	30
calm activities	warm moderate	26-32
children play	warm moderate	24-26
recreation	neutral	16-24
light movement	neutral	16-26
shopping	warm moderate	26-32
movement	lightly cool	14-24
strong movement	cool to cold	12-24
garden activities	lightly cool	12-24
work outside	neutral to cold	16-22

year	Neutral air temperature summer - winter	cities
22,8	28-21	Athen
25,3	29-15	Thessaloniki
12,9	16-11	Fribourg
18,3	24-21	Mailand
17,8	17-11	Cambridge
15,3	16-11	Sheffield
18,5	22-15	Kassel

3.15. Caractérisation du confort dans les espaces extérieurs

Plusieurs approches ont été adoptées pour la caractérisation du confort thermique des espaces extérieurs. Certaines recherches ont étudié le microclimat et le confort thermique pendant toute l'année, alors que d'autres uniquement pendant une période donnée (la période estivale dans le cas des climats arides). Des études ont effectué un monitoring conjugué à des interviews et des observations, d'autres étaient fondées uniquement sur des mesures sur terrain avec l'absence de questionnaires. La plupart des études ont utilisé deux à trois indices thermiques. D'autres se sont beaucoup plus basé sur des simulations.

Généralement, les modèles employés pour la caractérisation du confort thermique au sein des espaces urbains peuvent être classés en deux groupes (Athamena, 2012) :

- Modèles de dynamique des fluides (Computational Fluid Dynamics – CFD) qui déterminent la température et la vitesse de l'écoulement autour des bâtiments à partir des températures de surface fournies en données d'entrée ;
- Les modèles thermo-radiatifs qui fournissent les températures des surfaces à partir de la température et de la vitesse supposées connues de l'écoulement.

3.16. Conclusion :

L'évaluation du confort est soumise à plusieurs problèmes méthodologiques englobant les paramètres mesurés et leurs interprétations, en considérant la sensation thermique actuelle qui dépend des facteurs psychologiques, ainsi que l'absence de la liaison avec la géométrie urbaine.

Malgré les deux termes confort thermique et sensation thermique sont reliés, ils n'admettent pas la réciprocity. Le confort thermique est défini en fonction des conditions d'esprit ou la satisfaction est exprimée à travers les paramètres environnementaux, alors que la sensation

thermique présente les conditions d'esprit exprimées à travers l'évaluation des usagers eux même, de leur environnement thermique. C'est pourquoi la sensation thermique est intimement liée à l'adaptation et l'acclimatation alors que le confort thermique est toujours susceptible d'interférer des préférences subjectives et des facteurs psychologiques propres à chaque individu.

Bien que la réponse aux conditions microclimatiques et subjective et variable, les approches par simulation permettent de tester des hypothèses d'aménagement, en particulier l'utilisation de techniques alternatives, ce que l'expérimentation de terrain ne permet pas toujours. Il est donc nécessaire de disposer de modèles à la fois robustes et capables de simuler les différentes configurations urbaines.

Cependant, une évaluation du confort extérieur non confrontée à des investigations et des enquêtes sur terrain ne peut pas être fiable. Plusieurs enquêtes sous forme de questionnaires ont été établies afin d'adapter les indices physiologiques au contexte de la recherche et réduire les écarts rencontrés avec les valeurs de la sensation thermique effective. Certaines recherches ont opté pour une redéfinition des limites du confort, d'autres ont apporté des modifications sur les équations des indices, pour compenser l'impact de l'adaptation et l'acclimatation dans l'évaluation des indices du confort.

CHAPITRE IV

Les méthodes de recueil et d'Analyse des données



4.1.Introduction :

Après avoir défini le contexte théorique dans lequel s'inscrit notre recherche et la présentation des travaux réalisés dans ce domaine, ce chapitre mettra en place les différents éléments qui permettront de constituer cette étude sur la relation entre confort thermique extérieur et la morphologie urbaine au sein de la ville d'Annaba.

Le deuxième chapitre nous a permis à travers l'analyse du répertoire et du contexte générateur des différentes formes urbaines, de définir nos échantillons d'étude. En plus de leur représentativité dans la ville, ces échantillons ont répondu aux critères liés à la diversité des morphologies pour favoriser la mise en évidence des relations entre les différentes configurations urbaines et le confort extérieur. Chaque échantillon caractérise une période de l'histoire de l'urbanisation de la ville. Ils font partie des opérations importantes qui constituent des facteurs modifiant aussi bien le tissu urbain existant que l'évolution de la structure urbaine dans son ensemble. En effet, l'étude a été menée à travers sept espaces publics dans la ville d'Annaba. Ces espaces peuvent être identifiés comme : Cours, square, place et jardins publics. Etant donné que le confort décrit l'état du corps et l'état d'esprit de l'individu, l'évaluation des conditions thermiques était faite selon deux indices : statistique, par le développement du modèle empirique, et mathématique, par l'évaluation de la sensation thermique prévue selon un modèle mathématique du système de thermorégulation, initialement développé par Brown et Gillespie, puis réadapté aux espaces urbains « COMFA+* » ainsi que l'indice du confort thermophysique « PET ». La méthode adoptée pour cette étude est expérimentale inductive basée sur des campagnes de mesures sur site pendant juin 2013, juin /juillet 2014 et des interviews adressées aux usagers, et déductive en utilisant les modèles de simulation.

2.1. Morphogénèse de la ville d'Annaba :

La forme des espaces publics (Rues, places, promenades, jardin public), est la conséquence, soit du système général des formes urbaines, soit des conditions spécifiques aux pratiques urbaines publiques. Une typologie des espaces publics doit donc avoir une dimension non seulement morphologique mais aussi historique. Cette dimension nous permettra de comprendre le contexte générateur des formes et de définir l'échantillon de l'ensemble des espaces publics sur lequel doit porter l'expérimentation. En plus de sa représentativité dans la ville, l'échantillon choisi doit répondre aux critères liés à la diversité des morphologies pour favoriser la mise en évidence des relations entre les configurations et le confort extérieur.

Le travail s'est déroulé dans la ville d'Annaba, cette ville est délimitée au Nord et à l'Est par la mer, à l'Ouest par l'Edough et au Sud par une plaine. La ville est caractérisée par une morphologie hybride, présentant une mosaïque socio-spatiale hétérogène (Mebirouk, 2005). Son centre est marqué par la juxtaposition du noyau traditionnel (vieille ville) et le noyau colonial. L'extension de la ville est expliquée par l'effet du temps et la succession des politiques et le nouveau contexte marqué par la libération économique et l'instauration des marchés.

La période coloniale présente une structure composite, constituée de plusieurs types de tissus urbains, le tissu organique de la vieille ville, le tissu géométrique de la ville Européenne et le tissu éclaté relatif aux extensions opérées à partir de 1950. Cette période est caractérisée par deux grandes étapes : La première étape s'est caractérisée par une production spéculative déterminée par un rythme progressif et la deuxième étape caractérisée par l'application des théories de l'art urbain, tel que le plan d'alignement qui a permis le tracer des axes structurants de la ville et de délimiter l'espace public.

En ce qui concerne la Médina, l'administration coloniale a commencé par opérer des chirurgies sur les rues et les places pour instaurer un urbanisme de type militaire. Des monuments symboliques comme l'ancienne Fontaine ont été érigés à la place centrale de la Medina pour signifier sa domination, puis l'on construit un grand marché vers les allées (Boulbir, 2003).

A l'échelle du centre le rapport entre les espaces bâtis et non bâti dégage des formes urbaines identifiables, comme le cours de la révolution (ex cours Bertagné) qui sépare la ville des autochtones de la ville neuve et des places d'une certaine qualité comme la place George Ishak (ex Alexis Lambert) et place champ Mars (FLN), ces espaces publics structurent la trame bâtie et déterminent des formes urbaines structurantes.

Généralement la lecture morphologique de la ville d'Annaba du 19ème siècle jusqu'à la fin de la période de la colonisation, montre une croissance spatiale continue tout autour du noyau central. On assiste à l'apparition d'une première couronne d'urbanisation de différentes typologies (figure 4.1) :

- Au Nord, les lotissements résidentiels de haut standing, d'une structure en damier.
- A l'Ouest c'est l'implantation de plusieurs cités (la colonne, lauriers Roses, cités du 8 Mai 45 et 11 Décembre 1960) d'un tissu urbain d'une structure mixte en damier et parfois rayonnante. Ces cités de standing moyen, étaient réservées exclusivement à l'habitat collectif et semi collectif.
- Par contre au Sud et Sud – Ouest, et toujours en continuité de la première couronne, on trouve un autre type d'occupation de l'espace, ce sont des quartiers d'habitat mais à activités dominantes et de dépôt (à titre d'exemple : le parc à forage – Sidi Brahim, etc.), (POS Zaafrania, 2009).

La période d'urbanisation massive ainsi que l'industrialisation de la ville a commencé vers les années 1950. Dans la partie Ouest les grands ensembles tel que : 11 Décembre et 8 mai 45 érigé à partir de 1950, la notion du tissu urbain a commencé à se perdre, et la seule grille adoptée pour la fabrication de ces espaces est la grille primaire constituée des axes et pistes existantes. A l'intérieur plus de grille pour trame urbaine se constitue alors par assemblage d'éléments typologiques répétitifs ou singuliers indépendamment de la trame viaire dont le rôle se limite à la desserte et la liaison.

L'analyse de leurs plans de masse dans l'ensemble fait révéler l'absence de composition l'espace produit est réduit à des barres allongées à plus de 150 mètres orthogonalement

disposées les unes par rapport aux autres et dégagant de grandes aires libres non aménagées. Le logement quant à lui réduit au juste minimum.

Les années 1970 ont suivi la même politique de développement par la production de la ZHUN plaine Ouest, (et en renforçant l'axe RN 16 en matière d'activités industrielles), et ça malgré le réseau hydrographique contraignant.

L'urbanisation des années 1980 se caractérisait par la monotonie et un tissu lâche, cependant, celle d'aujourd'hui converge vers l'entassement et l'anarchie. A partir des années 1990, elle a tenté d'occuper les tours et densifier les programmes d'habitats existants, les opérations sont injectées là où les conditions de viabilisation existent.

Les contraintes du relief ont limité la disponibilité foncière et ont orienté l'urbanisation vers l'édification des tours afin de combler la demande en logement. AADL est compté parmi les promoteurs/ acteurs pionniers, on comptait la réalisation de presque 3500 logements entre 2001 et 2009 répartis à travers six sites, à l'instar de : Sidi Achour, Didouche Mourad, La plaine Ouest et Zaafrania.

En effet, le tissu d'Annaba montre un conglomérat. Son centre est marqué par un tissu organique qui représente la vieille ville d'Annaba un tissu quadrillé qui représente la partie édifiée pendant la période coloniale. Par contre, les quartiers périphériques, se caractérisent par leurs Hétérogénéité horizontales et verticales et par leur distribution fragmentée. Ces variations spatiales et morphologiques entraînent des modifications sur les paramètres climatiques liées au confort extérieur. Ainsi les échantillons sur lesquels portera notre étude sont : La vieille ville, le centre-ville, le quartier Champs de mars, La Menadia, cité 8 mai 45 et le quartier Sidi Achour (figure 4.1).

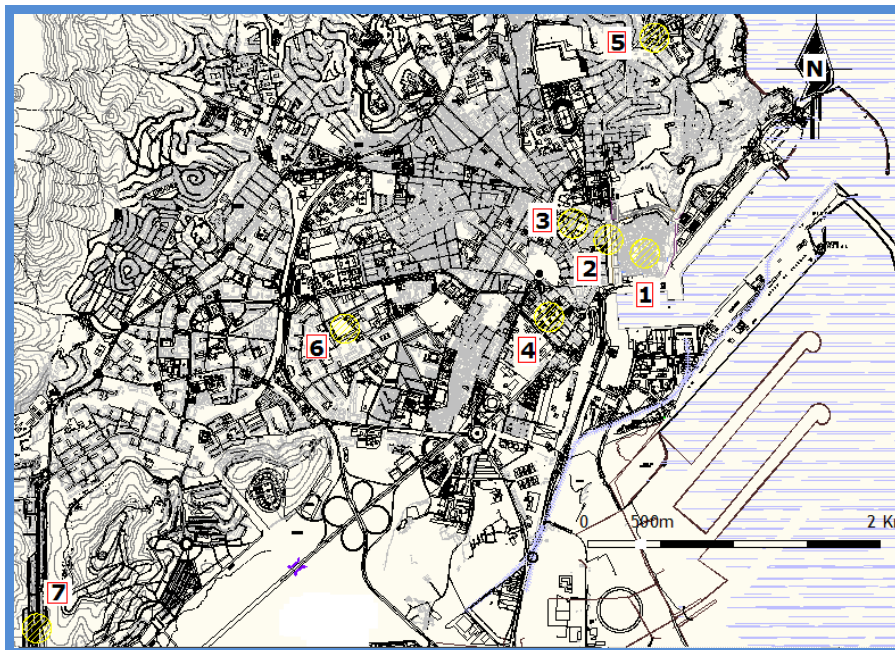


Figure 4.1 : Répartition des sites à travers la ville d'Annaba.

(1 : La place d'armes, 2 : Cours de la révolution, 3 : Laplace George Ishak, 4 : La place champs Mars, 5 : Le jardin des frênes, 6: le jardin 8mai45, 7:La place Sidi Achour).

4.2. Le climat de la ville d'Annaba :

Annaba est une ville côtière de l'Est Algérien, située à 36°,52'Nord, 6,57 Est au pied du massif de l'Edough. Son climat subit l'influence combinée de la montagne et la proximité de la mer méditerranéenne. Elle est soumise à un climat méditerranéen avec des variations saisonnières marquées par un été chaud, et un hiver froid et humide à caractère pluvieux et tempéré. Les principales directions des vents sont de Nord à Nord-Est. Les températures maximales sont enregistrées pendant le mois d'Août, avec un maximum de 31,4°C, et les minimales pendant le mois de janvier, avec une valeur de 6.9°C (d'après les données fournies par la station météorologique, les salines, Annaba).

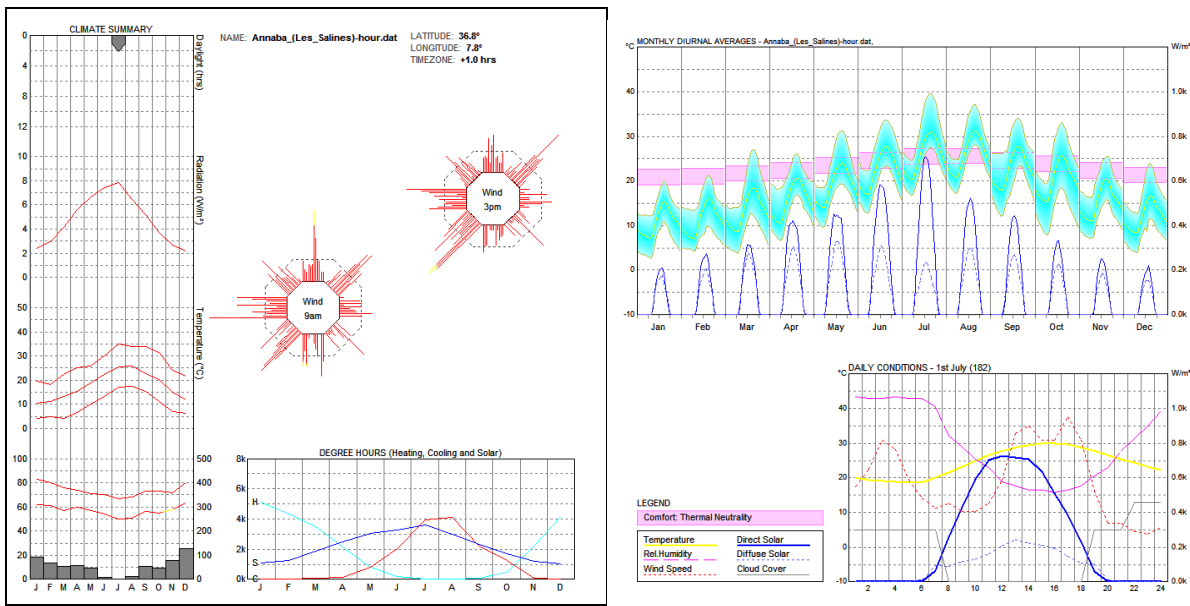


Figure 4.2 : Analyse climatique de la ville d'Annaba (Ecotect)

Une analyse climatique est effectuée à l'aide du logiciel Ecotect (figure 4.2) en se basant sur les données de la station météorologique des salines (Annaba).

La lecture des courbes de radiation et de températures (maximales, moyennes et minimales), montre que le mois de juillet est le mois le plus chaud de l'année et celui qui reçoit le plus de rayonnement. La température moyenne maximale enregistrée le 1^{er} juillet est de 29.9°C. La quantité du rayonnement direct et diffus est de 726W/m² et 240W/m² reçu respectivement à midi. La quantité des précipitations et d'humidité relative maximale est enregistrée pendant la période hivernale. On enregistre des valeurs d'humidité moyennes qui atteignent 91% pendant le mois de janvier (07h).

Les vents dominants de la ville d'Annaba, en l'absence des perturbations atmosphériques, soufflent du N à NE le jour, S à SO la nuit (phénomène brise de terre, brise de mer). Pendant la période de septembre à Mai de SO à O parfois NO faible à modérés et de N à NE, parfois E-NE, pendant la période de Mai à Septembre d'une vitesse faible à modérée.

Ecotect décrit une zone de confort neutre pour chaque mois (représenté en bande rose). Elle est comprise entre 20°C et 23°C pour le mois de janvier et entre 24°C et 27°C pour le mois de juillet.

4.3. Identification de la journée représentative du climat de la ville

d'Annaba :

Le climat d'Annaba a été caractérisé par une journée représentative obtenue suite au traitement statistique des données météorologiques enregistrées pendant une période de dix ans et qui sont associées au confort thermique extérieur. Ces données concernent : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire globale. La période choisie englobe la période estivale (du 01 juin au 31 août), allant de 2004 à 2013.

Une moyenne décennale a été évaluée ainsi que l'écart type (Tableau 4.1).

Les données journalières recensées pendant la période analysée sont par la suite comparées à ces moyennes, seulement les données qui présentaient un écart type inférieur ou égale à 20% pour chaque paramètre physique simultanément sont sélectionnées.

Deux journées qui se sont produites quatre fois sont retenues :

Le 01 juillet pendant les années : 2006, 2008, 2010 et 2013.

Le 28 juillet pendant les années : 2004, 2005, 2007 et 2010.

Tableau 4.1 : Ecart type de la température de l'air, Humidité relative, Vitesse du vent et rayonnement solaire GHI.

	Température en K	Humidité Relative en %	Vitesse du vent m/s	GHI (wh/m2)
2004	299,89	43,24	1,46	7726,65
2005	299,84	45,27	1,50	7581,50
2006	300,76	40,47	1,49	7687,26
2007	300,43	41,51	1,32	7756,63
2008	300,16	42,89	1,49	7155,08
2009	301,28	40,87	1,43	7858,58
2010	299,64	44,03	1,53	7755,36
2011	300,34	41,51	1,41	7800,21
2012	302,01	40,12	1,24	6468,22
2013	299,48	43,37	1,75	7702,51
Moyenne	300,38	42,33	1,46	7549,20
Ecart-type	0,75	1,60	0,13	405,36

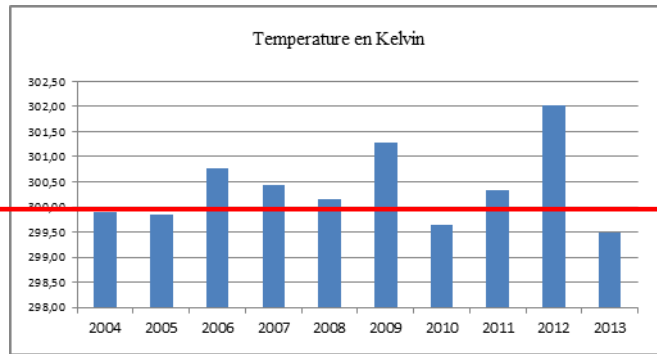


Figure 4.3 : Comparaison entre les températures de l'air enregistrées entre 2004 et 2013 avec la température moyenne annuelle.

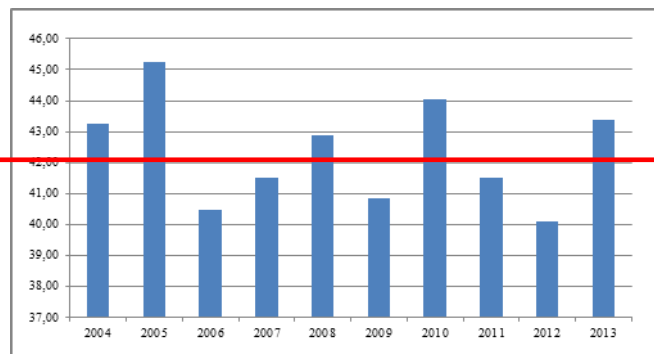


Figure 4.4 : Comparaison entre les humidités relatives enregistrées entre 2004 et 2013 et l'humidité relative moyenne annuelle.

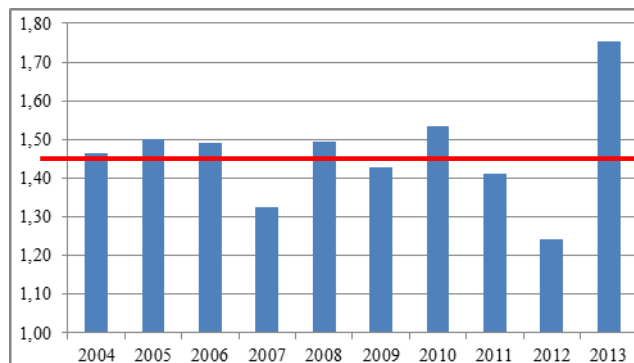


Figure 4.5 : Comparaison entre les vitesses de l'air enregistrées pendant 2004 et 2013 et la moyenne annuelle.

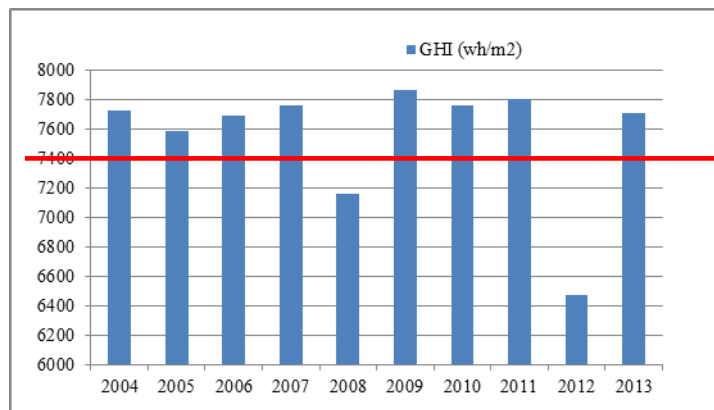


Figure 4.6 : Comparaison entre le rayonnement solaire direct enregistré entre 2004/2013 et la moyenne annuelle.

La comparaison entre les valeurs horaires des différents paramètres physiques enregistrés pendant les quatre années filtrées a démontré que la journée du 1 juillet présente le plus faible écart type par rapport à la moyenne, comparée à la journée du 28 juillet (figure 4.7 et figure 4.8), ce qui nous a ramené à la considérer comme une journée représentative pour le reste du travail.

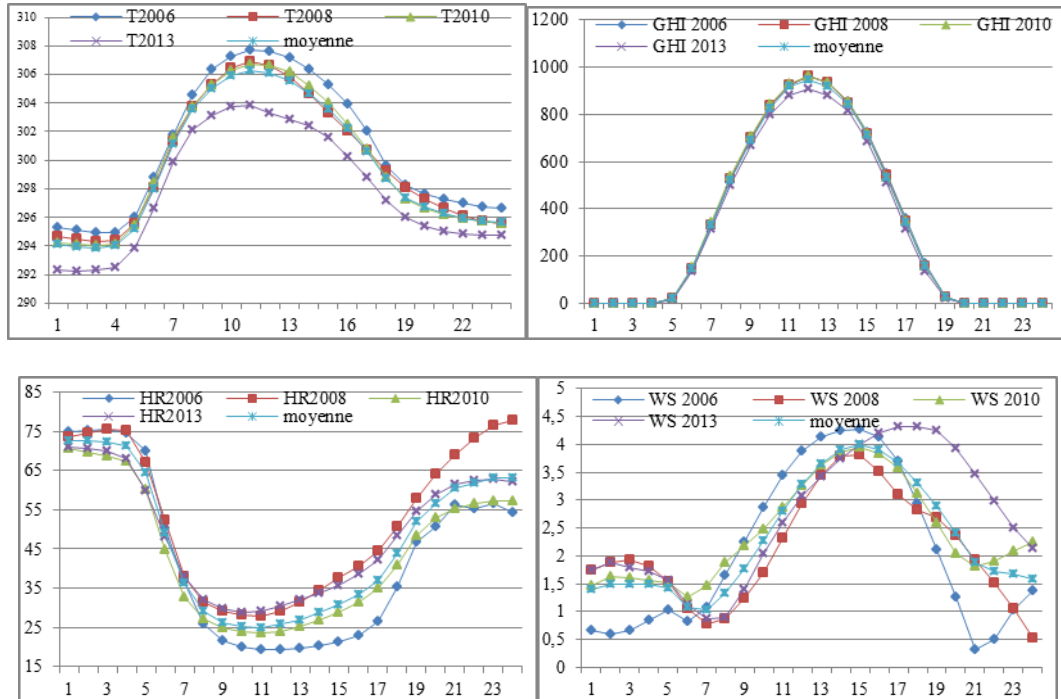


Figure 4.7 : Comparaison des valeurs des paramètres physiques relatifs à la journée du 1^{er} juillet enregistrés pendant les quatre années filtrées avec leur moyenne

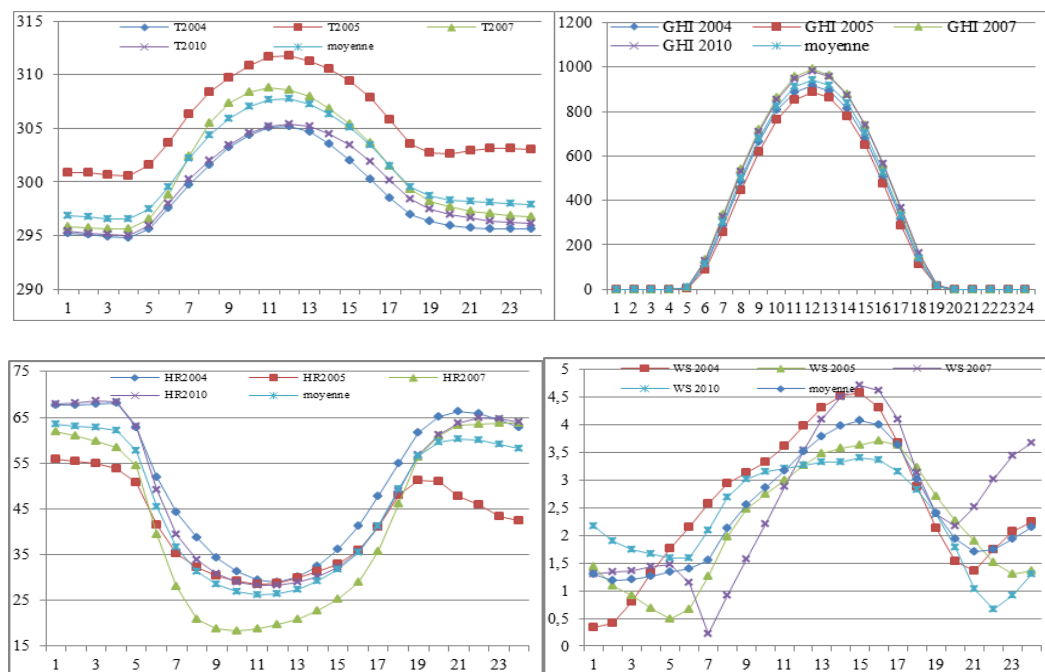


Figure 4.8 : Comparaison des valeurs des paramètres physiques relatifs à la journée du 28 juillet enregistrés pendant les quatre années filtrées avec leur moyenne.

4.4.Présentation des sites :

L'espace libre est défini par son tracé et par les masses bâties qui le limitent. Certains espaces ont un tracé géométrique d'autres ont un tracé résiduel. Ils peuvent être identifiés par leur centre ou par l'enveloppe qui peut être continue et discontinue.

Les sites les plus couramment étudiés sont les espaces publics ouverts tels que les parcs et les places, ainsi que les rues piétonnes et les rives des cours d'eau. Ces espaces publics présentent les lieux d'interaction et de promotion de la vie citadine. Les conditions de confort demeurent parmi les facteurs qui jouent un très grand rôle sur le degré de leur fréquentation (Johansson et al, 2014).

4.4.1.La vieille ville :

Limitée au Nord par le Boulevard Victor Hugo, au Sud et à l'Est la Rue de l'Avant-Port et à l'Ouest la Rue du C.N.R.A. Elle a une superficie approximative de 17 ha. La vieille ville est implantée sur un glacis surplombant la mer, ce qui lui donne un caractère défensif (Figure 4.9). Sa pente qui diminue progressivement vers l'ouest lui assure une ouverture vers la ville. Son accessibilité se fait essentiellement par la partie basse, d'où partent six axes. La partie haute, bénéficie d'un seul accès, matérialisé par un pont métallique. Ce cadre bâti historique est le résultat de la superposition de deux tissus, arabo-musulman et colonial. Il présente une organisation spatiale spécifique, basé sur un réseau viaire de type organique. La lecture morphologique de la vieille ville dégage deux parties distinctes : La ville haute qui se caractérise par un ensemble d'îlots compacts et difficilement accessibles. La ville basse : qui s'étale au pied du glacis, caractérisée par une faible pente, un tissu assez aéré et des immeubles plus élevés jusqu'à R+4 (Figure.4.09).

L'ouverture de places et le redressement et l'élargissement des rues s'inscrivent dans les premières interventions urbaines coloniales qui se sont effectuées à l'intérieur du périmètre de la médina en 1833. Les espaces extérieurs dans la vieille ville d'Annaba sont caractérisés par une place centrale d'une forme géométrique carré, elle constitue un élément structurant au sein de ce tissu. Et les placettes situées généralement dans les zones résidentielles, ou à proximité des portes, elles sont en relation directe ou indirecte avec l'espace central. Ils présentent une morphologie régulière, se situent dans un ordre de grandeur caractérisé par la proportionnalité, et parfois se prolongent vers les vides internes tel le patio des demeures.

La voirie se présente sous une forme hiérarchisée. Trois types de voies caractérisant ce réseau qui parcourt la médina, pour assurer la desserte interne, et extra-muros : rue, ruelle et impasse. La desserte de la place centrale vouée aux activités économiques, se fait généralement par des rues relativement larges, quant aux zones résidentielles, on trouve au contraire toute une variété de ruelles étroites, sinueuses, et d'impasses, de formes organiques. Les îlots des quartiers européens sont beaucoup plus réguliers que les îlots des quartiers traditionnels, et tendent vers des formes carrées, rectangulaires ou trapézoïdales et ils ont leurs façades sur la rue. Par contre dans les quartiers traditionnels, les îlots ont des formes organiques. La forme régulière n'est pas exclue. Les niveaux dominants sont le R+1, et le R+2, avec un nombre de 207 et 198 constructions respectivement ; avec un pourcentage respectif de 38,2%, 36,5% (P.O.S Vieille ville).



Figure 4.9 : Présentation de la vieille ville d'Annaba.

4.4.2. Le centre-ville :

Le centre ville est construit à partir de 1850 sur un tracé ordonné avec des artères rayonnantes. Les volumes construits sont implantés de manière continue en alignement avec la voie et composant des îlots fermés. Ils ménagent ainsi un espace d'agrément central et privé (Figure 4.10). Les RDC des bâtiments sont généralement occupés par des commerces et les étages supérieurs sont destinés aux logements. Le tracé des voies est à la base de la composition urbaine.

4.4.3. Cours de la révolution :

L'espace public, le cours de la révolution sépare la vieille ville de la ville coloniale, il est marqué par une grande esplanade dont la partie Sud est implantée de plusieurs arbres de Ficus (Figure.4.10).



Figure 4.10 : Présentation du cours de la révolution

4.4.4. La place George Ishak :

La place George Ishak (figure 4.11) présente une forme équilibrée à géométrie orthogonale. Malgré la présence des arbres de ficus ombreux et des cafeterias qui rappellent l'image du cours de la révolution, cette place se distingue par sa forme, proche du rectangle, sa taille et son orientation qui obéissent aux tracés des voies.



Figure 4.11 : Présentation du cours de la place George Ishak

4.4.5. Le quartier : Champs de Mars :

Construit pendant la période 1906-1938 suivant un tracé orthogonale, compact et homogène. La forme des îlots et le découpage parcellaire ont été déduits du quadrillage. Les îlots sont fermés ou semi fermés de tailles et de formes peu variables implantés en alignement avec la voie. Au centre s'inscrit la place publique contenant plusieurs arbres et deux kiosques (Figure.4.12).



Figure 4.12 : Présentation du champ de mars.

4.4.6. Le quartier : Menadia :

Construit à partir de 1924, il présente le point de rencontre du boulevard de la liberté et de l'avenue Mustapha Benbou Laid. Il représente un centre de vie et un élément de repère dans la ville. Ce site est caractérisé par trois aménagements paysagers et urbains structurant et qualifiant le plan de masse : le square, le jardin des frênes (espace d'étude), et la place du marché. Les îlots sont semi ouverts de formes et de tailles variables. Le bâti est discontinu avec une hauteur variable (Figure.4.13).



Figure 4.13 : Présentation de la Menadia.

4.4.7. La cité 8 Mai 45 :

Erigé durant 1950, elle traduit l'image des grands ensembles, les bâtiments sont disposés selon un ordre discontinu en alignement avec la rue et formant des îlots ouverts.

Ce site est marqué par un grand jardin d'une forme trapézoïdale bordé de bâtiment en R+5 et abritant plusieurs arbres de tailles et de formes variables (Figure.4.14).



Figure 4.14 : Présentation du 8 Mai 45.

4.4.8. La cité : Sidi Achour :

Construit à partir de 2001, avec une forme architecturale faite de barre et de tours réparties dans des îlots continus (Figure.4.15).

Les bâtiments sont alignés en deux bandes longeant un boulevard et traduisant ainsi l'image de ville haute. Le recul de certains bâtiments a donné naissance à une place publique contenant des arbres de Ficus et des aires aménagées en espace de jeux.



Figure 4.15 : Présentation du Sidi Achour.

4.5. Echelles d'analyse :

D'après Salat (2011), l'analyse morphologique a une grande importance au préalable de toute intervention ou opération d'aménagement. Elle contribue à l'amélioration de l'efficacité environnementale et énergétique de la ville ainsi qu'à l'orientation des choix fondamentaux en amont des opérations d'urbanisme.

Selon Adolphe Luc, Il est difficile de décrire et de simuler les interactions entre la morphologie urbaine et les conditions climatiques à l'échelle microscopique à cause de la complexité de la géométrie du cadre bâti. En effet il semble intéressant de travailler à l'échelle macroscopique, Loin de l'hétérogénéité locale, et d'envisager des volumes suffisamment importants et des effets assez clairs de l'interaction entre la forme urbaine et le microclimat. Dans ce contexte, il semble intéressant d'assimiler le tissu urbain à un milieu poreux à squelette solide rigide soumis à diverses sollicitations climatiques et d'étudier ses caractéristiques macroscopiques à travers un ensemble de paramètres simplifiés, de la même manière que l'analyse physique effectuée sur ces milieux poreux Il y a quelques décennies (Adolphe, 2001).

L'analyse du tissu urbain autour des espaces extérieurs permet de caractériser le contexte urbain et microclimatique. En effet, notre étude traitera deux échelles spatiales celle du quartier (climat local) et celle des espaces extérieurs. La caractérisation est faite en fonction des indicateurs morpho-climatiques déduits à partir du chapitre II. Chaque indicateur possèdera une signification et une représentativité particulière qui convoiera l'information d'une manière synthétique (Maignant, 2005).

4.6. Les indicateurs morpho-climatiques :

Le microclimat urbain est soumis à l'effet combiné de plusieurs facteurs dont certains sont plus ou moins contrôlables (Rizwan et al, 2008). Les facteurs physiques peuvent être classés comme suit :

- A. Des variables à effet temporaire, à savoir, les conditions météorologiques (la température de l'air la vitesse du vent, la couverture nuageuse, etc.).
- B. Des variables à effet permanent (le facteur de vue du ciel, les espaces vert et minérales, les matériaux, etc.). Des variables à effet cyclique tel que le rayonnement solaire.

Le confort extérieur dépend des facteurs physiques liés au microclimat, facteurs physiologiques relatifs au système de thermorégulation et facteurs socio-psychologiques présentant le degré d'adaptation des usagers aux conditions extérieures.

Une synthèse des recherches antérieures ayant traité la relation entre les espaces publics, le microclimat urbain et les différents phénomènes thermiques engendrés, nous a amené à déduire les indicateurs les plus pertinents contribuant le plus dans la caractérisation de ces interactions. Ces indicateurs sont fondés sur le développement de formules physiques simplifiées qui permettent la description et l'analyse des phénomènes radiatifs.

4.6.1. Evaluation des indicateurs à l'échelle du tissu urbain :

4.6.1.1. La densité du bâti :

La densité du bâti s'exprime en m^2 de surface de planchers par rapport à une unité de surface. Les rapports entre surfaces bâties, disposition relative des masses et leur espacement ont une très grande importance. Dans les tissus des villes anciennes les vides sont résiduels. Ils

prennent de l'importance avec l'automobile. L'obsession de la circulation et de l'espace public a conduit à préconiser des immeubles collectifs hauts et espacés (Allain, 2004). Dans la densité on distingue la densité de surface D_s et la densité du volume D_v .

4.6.1.2. La densité surfacique (D_s) :

Elle présente la densité d'occupation du bâti et fait référence à l'emprise des bâtiments sur le parcellaire et varie selon le mode d'occupation de l'espace. Ce mode peut être compact ou ouvert, ou avec des formes de transition. Ce qui implique une variation dans la densité et la création des espaces publics extérieurs de diverses dimensions.

C'est un indicateur qui rend compte de l'occupation des constructions (densité bâtie), il correspond au rapport entre la surface des toitures et la surface du terrain. Il est compris entre 0 et 1. Il interroge aussi bien la question de l'espace, que celle de concentration, il interfère avec plusieurs problématiques économiques liées aux infrastructures urbaines, aux préoccupations climatiques urbaines (îlot de chaleur urbain, minéralisation ou végétalisation des surfaces). (Dupagne & Teller, 1997). Plus D_s est important, plus les constructions occupent le terrain naturel et saturent l'espace urbain.

La densité bâtie est évaluée par le rapport entre la surface totale de l'emprise au sol des constructions et la surface totale du périmètre de calcul considéré selon l'équation suivante :

$$D_s = \frac{\text{La surface totale de l'emprise au sol des bâtiments}}{\text{Surface du périmètre urbain considéré}} \quad (\text{eq 4.1})$$

Le calcul de la densité bâtie est effectué à l'aide du logiciel de traitement d'image Photoshop 7.0 qui permet de quantifier le nombre de pixels pour chaque surface sélectionnée des cartes (Ouameur, 2007)

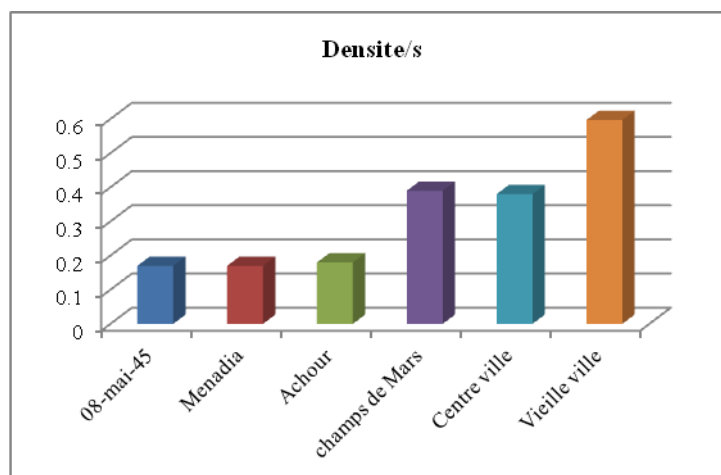


Figure 4.16 : La densité surfacique des différents sites.

La figure 4.16 montre que la vieille ville présente la densité surfacique la plus importante (0.59) suivie par Champs de Mars et le centre ville. Les cités : 8 Mai 45, Sidi Achour et Menadia présentent les densités surfaciques les plus faibles (on calcule une valeur proche de 0.17). Ces résultats montrent que la vieille ville est trois fois plus dense que ces trois sites.

4.6.1.3. La densité volumique (Dv):

Elle représente le volume construit par rapport au périmètre urbain considéré, calculée selon l'équation suivante :

$$Dv = \frac{\text{Le volume totale des bâtiments (m}^3\text{)}}{\text{Surface du périmètre urbain considéré (m}^2\text{)}} \quad (\text{eq 4.2})$$

Ces deux indicateurs rendent compte de l'occupation des constructions (densité bâtie) mais également de la volumétrie construite (hauteur équivalente répartie) relativement à la surface du territoire correspondant au projet d'urbanisation (ADEQUA).

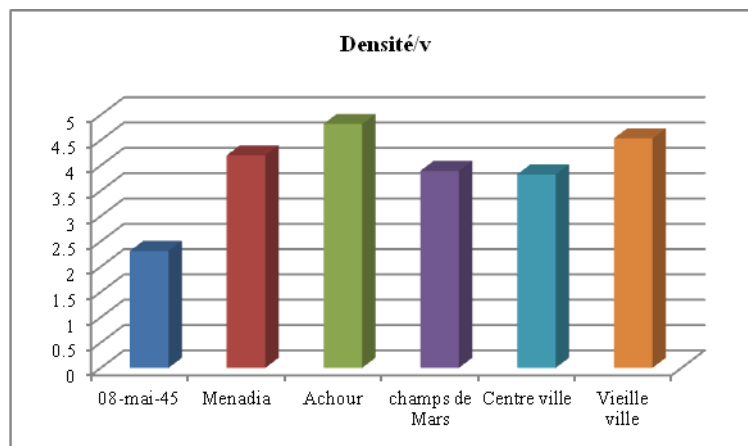


Figure 4.17 : La densité volumique des différents sites.

D'après la figure 4.17, la comparaison des densités volumiques montre que la cité Sidi Achour détient la densité volumique la plus importante en calcule 4.82 suivi par la vieille ville avec une valeur de 4.53. La cité 8 Mai 45 enregistre la densité la plus faible, on en calcule 2.31.

4.6.1.4. Rugosité urbaine (Hu)

Le profil du vent au-dessus du sol varie grandement avec le nombre d'obstacles importants qui influent sur le flux d'air. En effet, la rugosité du tissu urbain est assimilée à une densité verticale parce qu'elle est caractérisée essentiellement par la hauteur moyenne de la canopée urbaine, constituée par les surfaces bâties, les surfaces végétales verticales et horizontales, et les surfaces non bâties (Adolphe, 2001). Elle fait varier l'intensité des forces de frottement auxquelles le vent est exposé. Plus la rugosité est élevée, les plus la vitesse moyenne de l'air diminue. Son évaluation nécessite en amont un inventaire de la hauteur des bâtiments de chaque périmètre de calcul.

$$Hu = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} A_i \times h_i}{\sum_{i=1}^{i=n} A_i + \sum_{j=1}^{j=n} A_j} \quad (\text{eq 4.3})$$

A_i : surface occupée par le bâtiment i ,

h_i : hauteur du bâtiment i ,

A_j : surface de l'espace extérieur j .

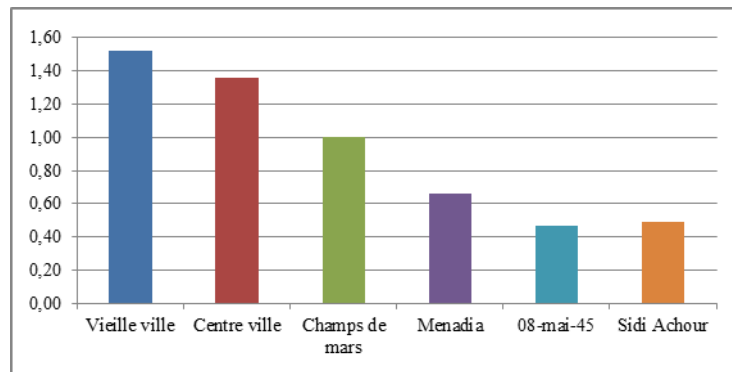


Figure 4.18 : La Rugosité des différents sites.

La rugosité calculée pour les six sites (Figure 4.18) montre que les tissus anciens sont ceux qui sont les plus rugueux. Les valeurs calculées pour la vieille ville, le centre ville et champs de Mars sont 1.52, 1.36 et 1.0 respectivement. La rugosité calculée au niveau de la vieille ville est deux fois et demi plus importante qu'à la cité du 08mai45.

4.6.1.5. La compacité

Deux indices de compacité étaient calculés, l'indice de compacité utile Cut et l'indice de compacité net Cf. Cut présente le rapport entre l'enveloppe extérieure non contiguë des bâtiments et la surface du plancher. Généralement ses valeurs varient entre 0.5 et 1.3 pour des configurations standards de bâtiments (Tsoka, 2011). La surface d'enveloppe est constituée des façades verticales exposées aux conditions extérieures, de l'emprise au sol et des toitures. Plus cet indicateur est faible, plus les constructions sont compactes et donc moins elles subissent les effets externes (Adolphe, 2001). Dans ce travail la compacité est calculée pour chaque bâtiment comme suit :

$$Cut = \sum_i^N \frac{A_{ext,i}}{S_{pl,i}} \quad (\text{eq 4.4})$$

- A_{ext} : la surface extérieure d'enveloppe non contiguë d'un bâtiment.
- S_{pl} : la surface de plancher.
- N le nombre des bâtiments du projet.

Le résultat obtenu de Cut présente la moyenne des valeurs calculées.

Le Cf pour un tissu urbain donné, le facteur de compacité moyenne, il présente la moyenne de la compacité des bâtiments concernés. Comparé au Cut, cet indicateur met en évidence l'impact des grands bâtiments. Il est obtenu à partir du rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contiguë du bâtiment, et son volume élevé à la puissance 2/3 (Adolphe, 2002) selon l'équation suivante :

$$C_f = \sum_i^N \frac{A_{ext,i}}{v_i^{\frac{2}{3}}} \quad (\text{eq 4.5})$$

Avec :

- A_{ext}: la surface extérieure d'enveloppe non contiguë d'un bâtiment
- V : le volume du bâtiment
- N :le nombre des bâtiments du projet

Le coefficient de compacité moyenne C_f est obtenu en calculant la valeur moyenne de la compacité nette de chaque bâtiment (en tenant compte des adjacences entre bâtiments).

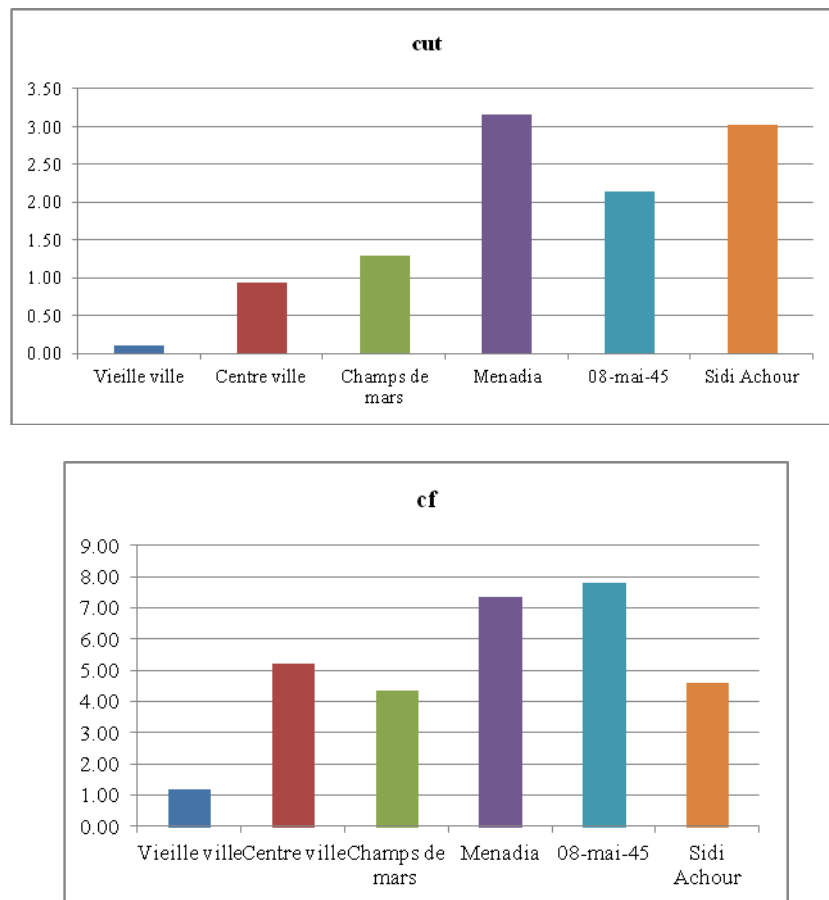


Figure 4.19 : La compacité des différents sites : calcul des indices : C_f et C_{ut}.

Le coefficient de compacité C_{ut} calculé (figure 4.19) varie de 0.11 à 3.15. Les tissus les plus anciens sont les plus compacts (vieille ville, centre-ville et champs de mars). Similairement le coefficient de compacité c_f calculé pour la vieille ville, champs de mars et centre-ville sont : 1.2, 4.35 et 5.21, alors que les valeurs les plus importantes sont observées dans la cité 8mai45 et la Menadia. La cité Sidi Achour par contre en compte un coefficient plus faible, on calcule 4.58.

4.6.1.6. La porosité

La porosité d'un quartier urbain est traduite par le rapport entre le volume total d'air des creux urbains et le volume de la canopée urbaine. Elle varie en fonction du tissu urbain. La porosité des larges boulevards, des cours, des jardins, des espaces ouverts, ainsi que les aménagements d'immeubles (pilotis, préau, variation typologique horizontale et verticale...etc.) peuvent conditionner des circulations d'air variées qui ont un très grand effet sur le confort aéraulique. Lorsque la densité du bâti est importante, les zones intérieures sont généralement protégées des fortes rafales. Cependant elles posent problème par rapport au renouvellement d'air, particulièrement dans les espaces enfermés.

La porosité d'un tissu urbain conditionne la pénétration du vent et des rayons solaires dans le tissu.

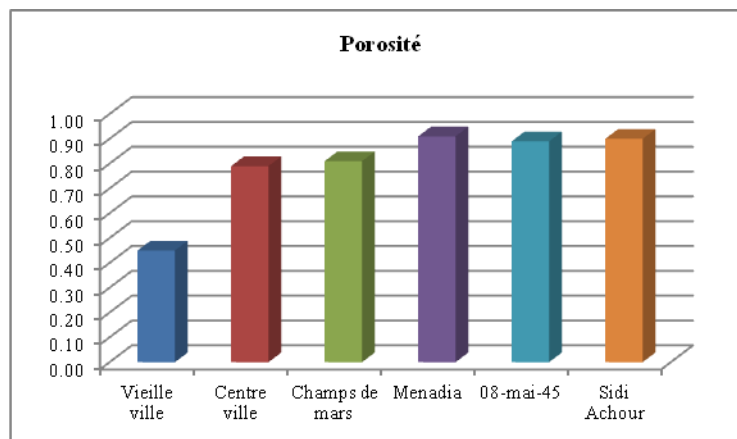


Figure 4.20 : La porosité des différents sites.

Les valeurs de porosité calculées varient de 0.91 à 0.45 (Figure 4.20). La Menadia enregistre la valeur la plus importante suivie par les deux sites : Sidi Achour et la cité 8mai45.

4.6.2. Définition et évaluation des indicateurs à l'échelle de l'espace public.

Ces indicateurs sont énumérés dans le tableau 2 ci-dessous : Indicateurs morpho-climatiques (SVF: facteur de vue du ciel, H/L: hauteur/largeur, SPO: surface partielle ombrée, Enso : ensoleillement, a :albédo, E : émissivité, Dv :densité de la végétation, clo :résistance des vêtements).

Tableau 4.2 : indicateurs morphologiques à l'échelle de l'espace public.

Descripteurs spatiaux	Géométriques	SVF, H/L, SPO, Orientation, Enso
Descripteurs physiques	Matériaux	a , E
Composants	Eau et végétation	Minéralisation, Dv
Descripteurs usagers	physique	clo, activité
	Socio-psychologique	Culture, adaptation

4.6.3. Indicateurs spatiaux (Géométriques) :

4.6.3.1. Facteur de vue de ciel (SVF) :

Le facteur de vue de ciel est défini comme l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un espace urbain, sa valeur varie de 1, lorsque la vue de ciel est dépourvue de toutes obstructions (bâtiment, arbre, mobilier urbain, ...etc.), jusqu'à 0 où la vue de ciel est totalement obstruée. Il dépend du rapport géométrique des surfaces et varie en fonction de dimensions urbaines (hauteur de constructions, distance entre les façades). Il détermine les échanges radiatifs entre le ciel et la structure physique de la ville.

D'après Oke un faible SVF conduit au piégeage du rayonnement de longue longueur d'onde et empêche le refroidissement nocturne. Il peut être calculé par des algorithmes, évalué à l'aide des photos Fish eye prises par rapport à un angle qui dépasse 183° , ou par la simulation du modèle à l'aide des logiciels.

(Dupagne, Teller) définissent le facteur de vue de ciel comme le rapport de la surface sphérique de ciel dégagé au-dessus d'une place ou d'un bâtiment à celle de la demi-sphère de référence au lieu d'observation.

Le facteur de vue de ciel est un paramètre sans dimension qui permet de mesurer tous les points de la surface qui voient le ciel. Ces points qui sont en général dans la partie supérieure des rues canyons et qui sont plus ouverts vers le ciel ont une capacité de refroidissement quatre fois supérieure à celles des surfaces dans les parties basses des canyons urbaines (Oke, 1988).

Dans le présent travail, le SVF est calculé par le logiciel Townscope version 3.2 (S. Azar, J.Teller et P.Petillon). La figure 4.21, illustre les valeurs du SVF et montre une variation allant des espaces plus ou moins ouverts (place champs de mars et la place 8mai 45) aux espaces un peu confinés (jardin des frênes).

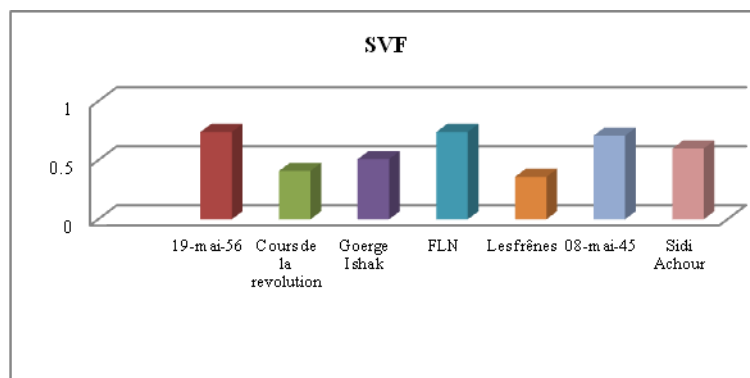


Figure.4.21 : Comparaison entre le facteur de vue du ciel des différents sites.

Ainsi, dans le jardin de frênes avec des bâtiments hauts et des arbres plus ou moins denses, on observe un SVF faible - autour de 0.36. Alors que, dans un environnement urbain plus ouvert avec un espace large et une densité végétale moins importante le SVF calculé à la place FLN est plus près de 0.74. Il est à noter que les valeurs du SVF peuvent varier d'un tissu urbain à l'autre, et même à l'intérieur de chaque tissu urbain. Malgré que la vieille ville soit

caractérisée par un tissu dense et des rues étroites (SVF faible), la place du 19 mai 56 en compte un SVF plus près de 0.7.

4.6.3.2. Degré d'enclosure :

Cet indicateur est très adéquat pour expliquer les variations de l'environnement thermique en milieu urbain. Oke (1987), a indiqué que les conditions de la température dans les rues et les places sont reliées au degré d'enclosure DoE. La comparaison entre les températures de l'air de deux espaces ayant un DoE 4 et 8 a démontré que les espaces semi-ouverts ayant un DoE importants sont moins exposés aux conditions climatiques extérieures, Ils présentent donc une performance thermique similaire à celle d'un espace intérieur (Malaktou et al, 2016). En addition, deux études, la première entreprise à Sifnos, en Grèce, et la seconde à la ville de Cambridge, ont démontré que le degré d'Enclosure est relié à la fluctuation des températures moyennes ainsi que les températures maximales (Malaktou, 2006).

Stemmers et al (2004), ont proposé de mesurer le degré d'Enclosure (DoE), comme étant le rapport entre la somme de toutes les surfaces (Fermées et ouvertes) par la somme des surfaces ouvertes. L'évaluation du degré d'enclosure (DoE) est évaluée (Figure 4.22) selon trois étapes :

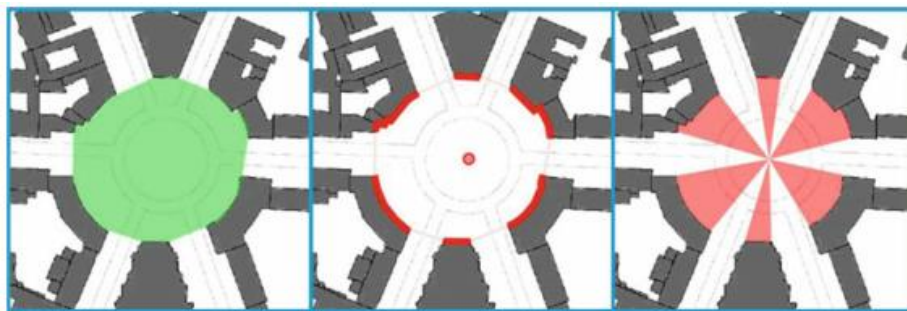


Figure 4.22 : Méthode d'évaluation du degré d'enclosure (d'après Zawidzki, 2016).

- Identification de la surface entière occupée par l'espace public (montré en vert)
- Identification des éléments verticaux (généralement les façades des bâtiments) qui entoure l'espace public, ainsi que son centre (montré en ligne gras en rouge, et un point rouge au centre respectivement).
- La surface comprise entre les secteurs projetés du centre et les éléments verticaux de l'enveloppe est calculée. Finalement la surface obtenue est divisée par la surface totale (Zawidzki, 2016).

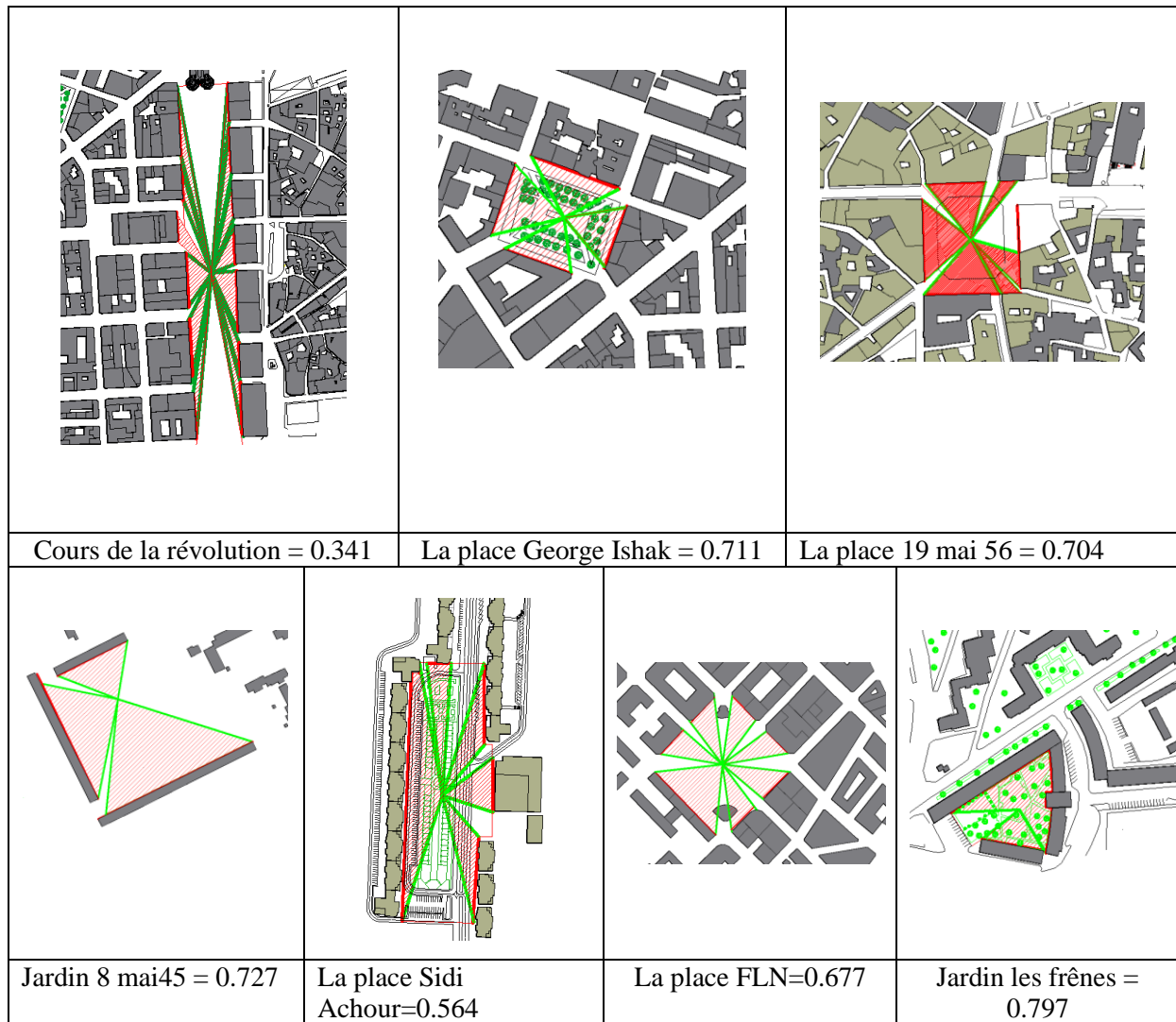


Figure 4.23 Degré d'enclosure.

Le degré d'enclosure calculé varie de 0.34 à 0.797 (figure 4.23). Les espaces qui sont plutôt ouverts sont : Le cours de la révolution et la place Sidi Achour. Ceux qui sont plutôt fermés sont : Le jardin des frênes, le jardin 8mai45, la place George Ishak, la place 19mai56 et la place FLN, avec les valeurs suivantes respectivement : 0.797, 0.727, 0.711, 0.704 et 0.677. Il est à remarquer que les espaces les plus ouverts sont ceux qui ont une forme rectangulaire allongée, alors que ceux qui sont fermés ont une forme proche du carré trapu.

4.6.3.3. Ombre / Ensoleillement

La durée d'ensoleillement/ombre représente, pour une période donnée (une journée en général), la durée pendant laquelle un élément de surface du sol reçoit directement les rayons du soleil ou protégé contre ces rayons. Le calcul de ces indicateurs nécessite la connaissance de la géométrie des bâtiments (masques), les données géographiques du site et la période de calcul. Ces indicateurs sont très utiles pour la localisation de zones plus ou moins confortables. La durée d'ombre et d'ensoleillement maximales est recherchée afin d'assurer un ensoleillement maximal en hiver et une protection en été (Musy et al, 2006).

Cette durée est calculée grâce à TownScope. L'observation l'ensoleillement sur l'ensemble des espaces montre certains effets de masque locaux (bâtiments, arbres) pouvant en effet entraîner de grandes variations pendant la journée.

Ces deux indicateurs varient dans l'espace et dans le temps (en 4D). La place du Champs de Mars jouit de l'ensoleillement pendant toute l'année. Le jardin des frênes est ensoleillé pendant six mois. La place de Sidi Achour est généralement ensoleillée le matin durant toute l'année. Le jardin du 8mai45 est ombré vers la fin de la journée pendant toute l'année. Le cours de la révolution est aménagé en 3 parties distinctes, la partie Sud est presque ombrée toute l'année contrairement aux deux autres parties (figure 4.24& figure 4.25).

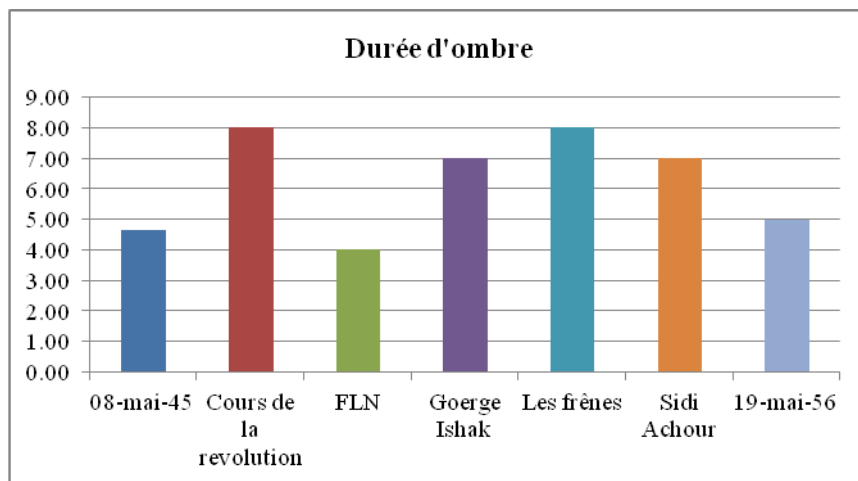


Figure 4.24 : La durée d'ombre.

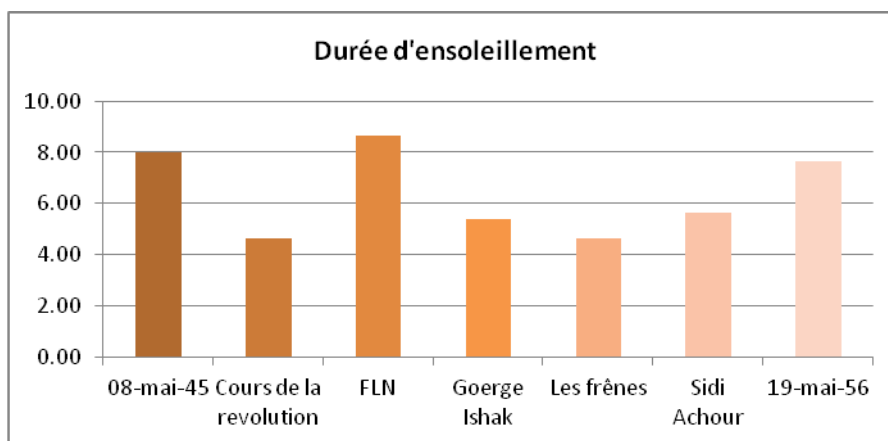


Figure 4.25: La durée d'ensoleillement.

4.6.3.4. Le rapport H/L et orientation :

Ces deux indicateurs ont été beaucoup traités par rapport à l'accessibilité du soleil et à la ventilation. L'orientation des bâtiments par rapport à l'ensoleillement et aux vents a un grand effet sur les variations du microclimat d'un lieu à un autre. Elle ajuste également les effets de masques et d'ombres portées.

L'orientation des rues définit l'orientation des bâtiments, une orientation NS implique une orientation EO pour les bâtiments.

Le ratio H/L exprime le rapport entre la hauteur moyenne de l'espace et sa petite largeur. Les rues étroites (H/L est important) peuvent offrir de l'ombre, cependant, elles favorisent l'accumulation et le piégeage des rayons solaires à cause des inter-réflexions qui ralentissent le processus de refroidissement. Le rapport H/L peut aussi modifier l'écoulement du vent. Les façades environnantes peuvent le canaliser, le freiner ou entraîner des mouvements tourbillonnaires au pied des bâtiments.

Pour calculer le ratio H/L, deux relevés étaient effectués : Un relevé de la hauteur de toutes les surfaces verticales afin d'en déduire une hauteur moyenne H_m ; et un relevé de la plus petite largeur de cet espace L_p . Ainsi H/L est obtenu à partir de l'équation suivante :

$$H/L = H_m / L_p$$

L'orientation, en général dépend de l'orientation des îlots. Les espaces allongés (tel que le cours de la révolution, la place de Sidi Achour) impliquent une orientation Est/Ouest pour les bâtiments. Par contre pour les espace plus ou moins trapus (George Ishak, champs de mars), les bâtiments sont orientés : NE, SE, SO et NO (Tableau 4.3). Le jardin du 8 mai 45 présente une parcelle biseautée à cause de la rencontre de la voie qui le délimite et le boulevard d'Afrique, l'orientation dominante est NE, NO. Quant au jardin des frênes la parcelle présente une déformation convergente, impliquant une orientation N et O avec une dominance de l'orientation SE. D'après la figure 4.26, le rapport H/L le plus important est obtenu pour le jardin des frênes et la place de Sidi Achour.

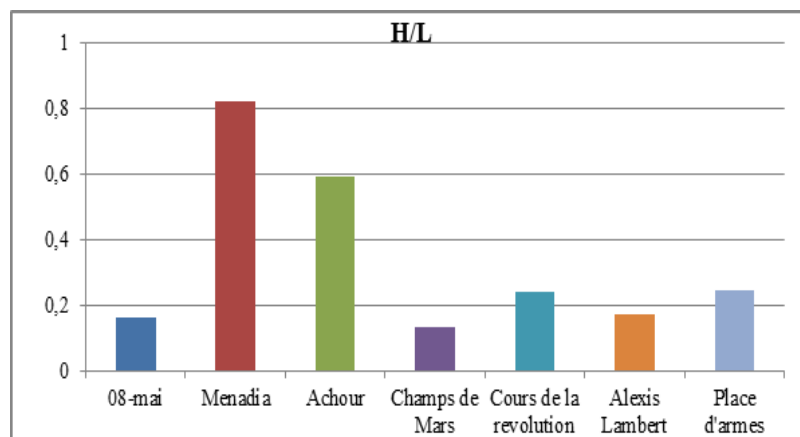


Figure 4.26. Comparaison du rapport Hauteur largeur H/L des différents sites

Tableau 4.3: Diagrammes solaires, orientation, ombre et ensoleillement pendant la journée type du 1er juillet.

(A). Place 19mai56, (B). Cours de la révolution, (C). La place GoergeIshak, (D). La place du FLN, (D). Jardin des frênes, (E). Jardin 8Mai45, (F) La place Sidi Achour.

Site							
Solarpaths							
Orientation							
Ombre							
Ensoleillement							

4.6.3.5. Matériaux :

La morphologie urbaine et les matériaux de surface sont deux facteurs qui jouent un rôle important dans la modification du microclimat urbain. Chaque matériau présente des caractéristiques propres : un albédo, une conduction, une absorption et une inertie thermique. Ces caractéristiques influencent fortement les échanges thermiques et énergétiques entre les surfaces. En général, plus les réflectivités et émissivités sont grandes, plus la température de surface reste faible.

L'effet des matériaux sur le microclimat dépend de l'albédo qui détermine la quantité du rayonnement réfléchi, et la capacité thermique qui détermine la quantité d'énergie stockée et le temps de déphasage.

Etant donné que la scène urbaine est composée d'une mosaïque de matériaux, l'albédo est évalué en fonction d'une valeur moyenne calculée en fonction de l'albédo de chaque matériau et sa fraction d'occupation. Les valeurs de l'albédo peuvent être tirées à partir des tableaux (tableau 4.4). En effet, en étudiant la variation de la réflectivité solaire des bétons (Levinson et al, 2002) ont montré que leur composition, leur vieillissement et leur exposition climatique modifient significativement leur albédo.

Tableau 4.4 : L'albédo, émissivité et conductivité des éléments rencontrés en aménagement urbain.

	Albédo(%) (a)	Emissivité (%) (E)
Végétation	5-30	90-99
Herbe	20-30	90-95
Espace vert	3-15	
Bois	5-20	
Surfaces urbaines		
Asphalt	5-15	95
Béton	10-50	71-90
Brique	20-50	90-92
Pierre	20-35	85-95
toit en gravier et bitume	8-18	92
Tuile	10-35	90
Couleur blanche	50-90	85-95
Rouge, marron, vert	20-35	85-95
Noir	2-15	90-98

Selon Athamna (2011): L'albédo α se calcule comme suit:

$$\alpha = A_1 \times P_1 + A_2 \times P_2 \quad (\text{eq 4.6})$$

Où A_1 et A_2 sont les albédos des deux matériaux, et représentent la fraction d'occupation de chaque matériau dans la façade.

Bouyer et al, (2009), ont proposé un indicateur simple qui peut être utilisé pour caractériser, en partie, la contribution radiative d'un espace extérieur (existant ou en phase de conception) à la prolifération de l'îlot de chaleur urbain (UHI). Les résultats du croisement entre l'albédo de surface, la géométrie et les indicateurs morphologiques, a conduit à définir les facteurs qui ont le plus d'impact sur la valeur de l'albédo, à savoir, le coefficient de réflexion moyen du tissu urbain et le SVF. Ainsi l'albedo, noté A, peut être calculé comme suit :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{nbFacets} \rho_i s_i SVF_i}{\sum_{i=1}^{nbFacets} s_i} \quad (\text{eq 4.7})$$

Où ρ_i , SVF_i et s_i présentent l'albédo, SVF et la surface de la facette i, respectivement.

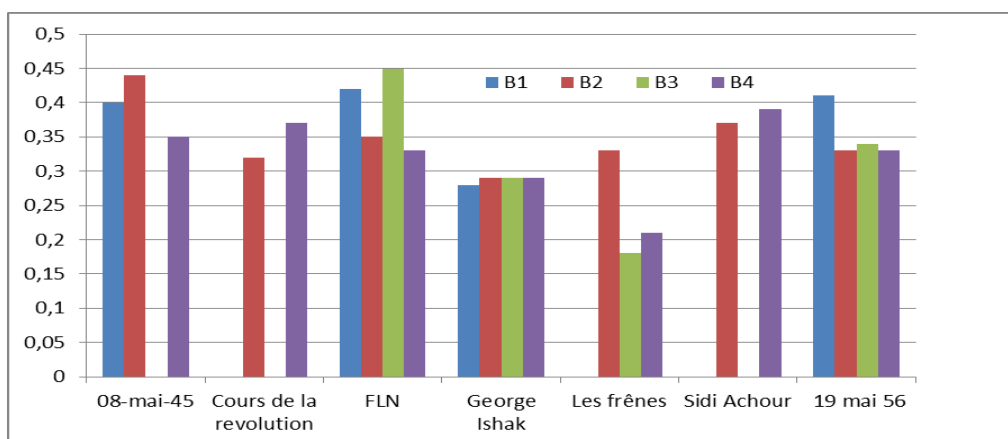


Figure 4.27 : SVF des parois des différents espaces publics

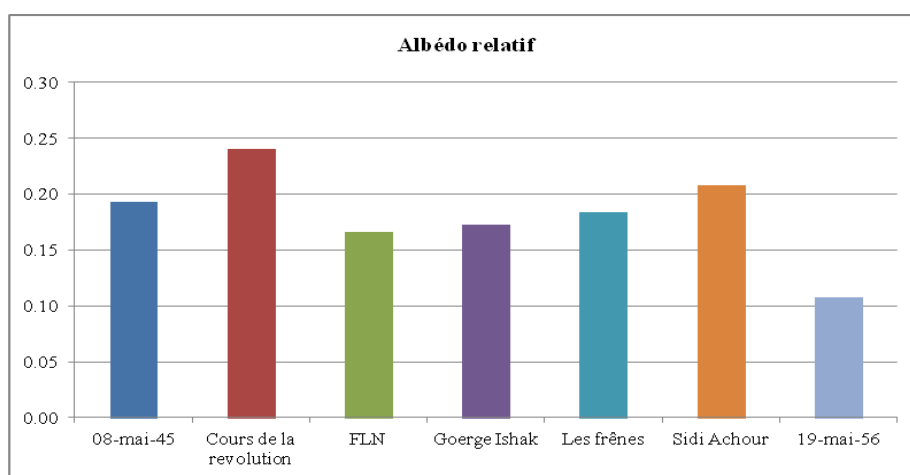


Figure 4.28 : Albédo relatif des différents espaces publics

4.6.3.6. Les Composants :

L'impact de la végétation est traduit par le processus d'évapotranspiration et la création d'ombre.

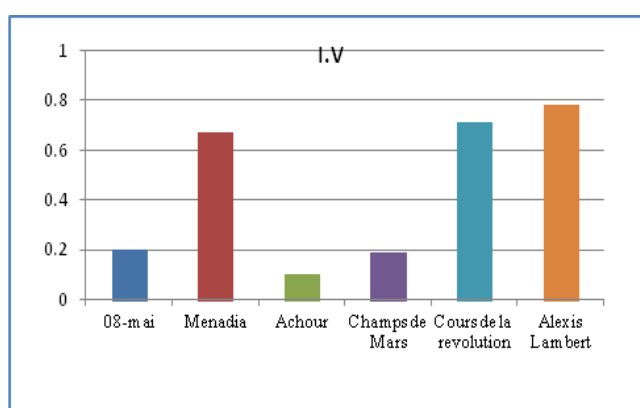


Figure 4.29. Calcul de l'indice de végétation (I.V.).

La place George Ishak, le cours de la révolution et le jardin des frênes présentent respectivement les densités végétales les plus importantes (figure 4.25).

4.6.3.7. Descripteurs relatifs aux usagers :

La résistance des vêtements est évaluée en fonction du tableau 4.5, quant aux activités exercées elles sont évaluées en fonction du métabolisme et de la vitesse de l'activité.

Tableau 4.5 : Quelques valeurs de résistance de vêtements typiques :

Vêtements type	r_{co}
T-shirt, pantalon court, chaussette, souliers de course	50
T-shirt, pantalon, chaussette, souliers	75
T-shirt, pantalon court, chaussette, souliers, Gillet	100
Chemise, pantalon court, chaussette, souliers, Gillet	125
Chemise, pantalon court, chaussette, souliers, Pull	175
Chemise, pantalon court, chaussette, souliers, jacket	250
Chemise, pantalon, chaussures	77
Robe manches longues, chaussures	60
Robe manches longues, sandals	58
r_{co} = isolation des vêtements	

4.7. Analyse « statique » et dynamique des facteurs physiques :

Afin d'évaluer l'impact de l'environnement bâti sur la qualité des ambiances physiques au niveau des espaces urbains, les chercheurs ont souvent recours à une analyse spatiale « statique » ou « dynamique » des données physiques (Zekri, 2010). L'Analyse « dynamique » est une alternative pour analyser les facteurs physiques de l'environnement urbain à l'échelle du piéton. Elle consiste à analyser les variations des différents paramètres physiques le long de plusieurs parcours piétonniers à travers les six sites étudiés. Quant à l'analyse « statique », les données sont présentées en étant figées dans le temps et dans l'espace. Dans cette étude cette approche est englobée la comparaison des indices de confort à savoir Comfa+*, PET et TEP enregistrés à travers les espaces publics, au cours de la journée type qui correspond au 01 juillet. Les données de l'analyse dynamique et statique seront interprétées dans le chapitre VI et VII respectivement.

Les mesures et la simulation constituent les deux méthodes généralement adoptées par les expérimentateurs ayant pour objectif de collecter des données physiques de l'environnement. L'acquisition des données relatives aux facteurs physiques, la technique de mesure par l'intermédiaire des instruments a l'avantage de fournir des données en adéquation avec la réalité physique à condition que ces instruments soient bien calibrés (Zekri, 2010).

4.7.1. Evaluation du confort thermique extérieur :

4.7.1.1. Investigation et collecte des données :

Deux approches ont été appliquées : Approche dynamique et approche statique. Ainsi l'investigation s'est déroulée selon deux phases. La première s'est déroulée au sein des espaces publics. Son objectif est le développement d'un modèle du confort thermique extérieur propre à la ville d'Annaba en utilisant les méthodes d'analyse de régression linéaire multiple. Elle consistait en des enquêtes et des mesures de paramètres climatiques, conjugués à la prise de plusieurs photos qui décrivent l'état des usagers interviewés. Le monitoring s'est déroulé pendant juin 2013 et juin 2014. La deuxième campagne de mesure a été entreprise à travers les sites précédemment cités, le long des parcours urbains pour mettre en exergue l'impact des indicateurs morphologique sur la variation du microclimat à l'échelle des quartiers (revoir chapitre VI).

L'évaluation du confort thermique extérieur dépend généralement de quatre variables environnementales : La température de l'air, la température moyenne radiante, l'humidité et la vitesse du vent.

Des études antérieures sur les phénomènes des échanges thermiques entre les usagers et leur environnement ont montré que la vitesse de l'air et le rayonnement solaire présentent les facteurs les plus déterminants dans l'évaluation du confort thermique extérieur. L'écoulement d'air est aussi influencé par l'environnement bâti, les obstacles topographiques et des finitions des surfaces et leurs textures.

4.7.1.2. Les facteurs climatiques :

Nous nous rappelons succinctement la définition des paramètres météorologiques mesurés :

- La température de l'air : La température de l'air est étroitement liée à la distribution du rayonnement solaire. La température de l'air dans une enceinte ombragée (mais bien ventilée) est connue sous le nom de la température ambiante, elle est généralement exprimée en degrés Celsius ($^{\circ}$ C). La température sur un site donné dépend du vent ainsi que des facteurs locaux tels que l'ombrage, la présence de plans d'eau, l'exposition au soleil, etc.

La variation de la température de l'air dépend de la variation de la température de la surface de la terre et des surfaces de contact avec l'air, selon la latitude, le moment de l'année, la quantité de nuages couvrant le ciel dans cette zone, et la topographie (la température diminue plus on monte au-dessus du niveau de la mer).

- La température moyenne radiante (Tmrt) : Elle correspond à la température moyenne pondérée par rapport aux surfaces de tous les objets qui entourent le corps (Vinet, 2000). Elle se mesure par un thermomètre globe ; c'est une sphère de cuivre peinte en noir, qui est supposée représenter la capacité thermique d'un individu moyen.
- Le vent : La vitesse du vent ainsi que sa direction, générés par les systèmes météorologiques et sont modulés par la topographie régionale et locale. Ses fluctuations

sont dues à des turbulences au niveau de la couche atmosphérique la plus basse qui surviennent au cours de courtes périodes temporelles (de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes) (ASCE, 2004). Aussi, peut y avoir de grandes variations dans l'environnement éolien d'une même ville, de telles variations pouvant intervenir à une échelle réduite, d'une zone microclimatique à une autre. En effet, lorsqu'il atteint les bâtiments, le vent subit plusieurs modifications : les grands bâtiments ont tendance à intercepter les vents forts des couches supérieures de l'atmosphère et de les rediriger vers le bas jusqu'au niveau du sol où surviennent de fortes accélérations du vent.

- L'humidité de l'air : Elle présente la quantité d'humidité dans l'air, est généralement exprimée en termes d'humidité relative. L'humidité relative est définie comme le rapport entre la masse de vapeur d'eau dans un certain volume d'air humide à une température donnée, et la masse de la vapeur d'eau dans le même volume d'air saturé à la même température, normalement exprimée en pourcentage.

Ces paramètres ont été mesurés par les appareils suivants :

- Des thermo-hygromètre, anémomètre et luxmètre, model LM-8000, pour mesurer la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent (figure 4.30).



Figure 4.26: thermo-hygromètre, model LM-8000

- Mini station DELTA OHM HD32.3 (figure 4.31) :

Cet instrument nous a permis de mesurer simultanément les paramètres suivants :

- Température de thermomètre globe T_g .
- Température ambiante T .
- Humidité relative RH.
- Vitesse de l'air V_a .

Sur la base des grandeurs relevées, cet instrument est capable de calculer et d'afficher, les indices suivants :

- Indice WBGT(out) (Wet Bulb Glob Temperature : température au thermomètre globe humide) en présence de rayonnement solaire.
- Température moyenne radiante T_r .
- Indice PMV (Vote Moyen Prévisible).
- Indice PPD (Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits).



Figure 4.31 : Mini station DELTA OHM HD32.3

Les hauteurs des appareils correspondaient à celle recommandées selon ISO 7726 (1998) à savoir, 0.6 et 1.1 m pour les sujets assis et debout, respectivement, ce qui représente le centre de gravité du corps humain.

L'objectif de ces campagnes de mesure est le développement d'un modèle de confort empirique spécifique à la ville d'Annaba baptisé TEP (Température effective prévisible). (Voir chapitre V).

La température moyenne radiante était évaluée en fonction de la température de l'air, la vitesse du vent, et la température du thermomètre globe (Thorsson et al, 2007) à partir de l'équation suivante :

$$o \quad T_{Mrt} = [(T_g + 273,15)^4 + \frac{1,335 \times 10^8 V^{0,71}}{\varepsilon D^{0,4}} (T_g - T_a)]^{1/4} - 28,15 \quad (\text{eq 4.8})$$

Où T_g est la température mesurée du thermomètre globe ($^{\circ}\text{C}$), T_a est la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$), V est la vitesse du vent (ms^{-1}), D est le diamètre du globe ($=25\text{mm}$) and ε est l'émissivité du globe ($=0,95$).

Les mesures effectuées étaient accompagnées par des interviews instantanées. Les questions soulevées ciblent deux ensembles de paramètres : Des paramètres personnels, à savoir, âge, sexe, résidence, exposition, vêtements, entourage, activité, teint, passé thermique, activité, durée, fréquence et état de santé.

Des paramètres relatifs à la perception du confort, à savoir, la sensation thermique effective, discerner le paramètre climatique le plus ennuyeux et ce qu'ils souhaiteraient améliorer.

D'après l'examen de plusieurs recherches faites sur le confort thermique, Johansson et al, (2014) ont déduit ce qui suit : La majorité (67%) des études transversales contient une question concernant le passé thermique du sujet, où était le sujet la dernière demi-heure avant l'entretien afin de montrer l'adaptation physiologique. Trois études (14%) ont demandé si le sujet avait été à l'intérieur ou à l'extérieur avant l'entretien. Plusieurs études (43%) ont posé une question sur la durée de résidence afin d'identifier ceux qui n'étaient pas physiquement et culturellement adaptés au climat. Plus que la moitié (52%) des études ont posé des questions sur la raison de leur visite afin de distinguer ceux qui étaient là pour profiter de la place de ceux qui étaient en passage. Près de la moitié des études (46%) ont démontré l'adaptation psychologique ou physiologique

Un autre aspect important est le temps d'exposition à l'environnement extérieur, car le corps humain a besoin d'une certaine durée pour s'adapter à son environnement thermique. Ce temps est variable, le corps humain s'adapte beaucoup plus rapidement à un environnement chaud qu'à un environnement froid. (Höppe, 2002).

La sensation thermique effective a été évaluée en fonction d'une échelle de 9 points qui varient de -4 à +4 (extension de l'échelle d'ASHRAE) (Thitisawat et al, 2011), selon le tableau suivant :

Tableau 4.6 : Echelle du confort adapté dans le questionnaire comparé à l'échelle d'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), (d'après Adawiyah, 2012)

ASHRAE		Echelle de Bedford		Sept points		Neuf points	
Très chaud	-3	Extrêmement chaud	-3	Très froid	1	Extrêmement froid	-4
Chaud	-2	Très chaud	-2	Froid	2	Très froid	-3
Un peu chaud	-1	Confortablement doux	-1	Un peu froid	3	Froid	-2
Neutre	0	Confortable	0	Confort	4	Un peu froid	-1
Un peu froid	1	Confortablement frais	1	Un peu chaud	5	Confort	0
Froid	2	Très froid	2	Chaud	6	Un peu chaud	1
Très froid	3	Extrêmement froid	3	Très chaud	7	Chaud	2
						Très chaud	3
						Extrêmement chaud	4

Etant donné que le travail sur le site s'est déroulé pendant l'été, les valeurs du STE s'inscriront dans un intervalle allant de -1 à 4. La durée du questionnaire est de 15 minutes par personne.

4.7.1.3. Modèles de confort employés :

Les modèles de confort sont généralement considérés comme outils analytiques qui évaluent la réponse des individus vis-à-vis de leur environnement thermique à travers le bilan énergétique en se basant sur les échanges de masse et de chaleur. Ainsi le confort thermique est atteint lorsque la quantité des gains de chaleur à travers le métabolisme et l'absorption du rayonnement courtes longueurs d'ondes et longues longueur d'ondes sont équilibrés par les pertes de chaleur à travers la convection, l'évaporation et l'émission de rayonnement à grandes longueur d'ondes. Les enquêtes sur sites sont très utiles afin de comparer les outputs de ces modèles avec la sensation thermique des usagers pour pouvoir les valider (kenney, 2009).

En effet, l'évaluation du confort extérieur a connu le développement de plusieurs méthodes. Dans le cadre de cette étude trois indices ont été employés.

- Le premier indice employé dans notre étude est la température effective prévisible « TEP » basé sur l'approche statistique évalué à partir des corrélations entre les paramètres climatiques mesurés et les interviews en utilisant le programme Spss (Nikolopoulou, Steemers, thorsson, Lindqvist).
- Les deux autres indices thermo-physiologiques à savoir la température physiologique équivalente « PET » et Comfa. Ces deux indices sont basés sur la résolution de l'équation du bilan énergétique, traduites à travers les deux modèles : Comfort Formula et MEMI (Munich Energy-Balance Model for individuel).

Généralement ces deux modèles thermo-physiologiques prennent en considération les paramètres climatiques (température de l'air, Humidité de l'air, vitesse du vent et le rayonnement solaire), et non-climatiques (l'activité et l'habillement).

Les modèles empiriques tel que le Wind Chill température (WCT) et discomfort index n'ont pas été appliqués parce qu'ils sont destinés à des climats bien spécifiques.

L'indice le plus couramment utilisé dans les études du confort thermique extérieur est la température physiologique équivalente (PET) suivie par la température effective standard (SET) et vote prévisible moyen (PMV). Le PMV a été utilisé principalement au début des années 2000, alors que l'utilisation du PET et du SET a augmenté lors de ces dernières années. Johansson et al., l'ont justifié par rapport au nombre d'études qui ont rapporté une mauvaise corrélation entre le PMV et la perception thermique subjective (chapitre III). (Nikolopoulou et al., 2001; Höpfe, 2002; Thorsson et al., 2004; Nikolopoulou, 2011; Cheng et al., 2012).

4.7.1.3.1. Le modèle de confort empirique TEP :

Un modèle de confort baptisé « TEP » a été calculé en fonction des données météorologiques collectées corrélées avec l'évaluation de la sensation thermique des usagers. Le modèle est évalué sur la base d'un modèle de régression linéaire multiple. Les variables indépendantes introduites sont : La température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température moyenne radiante. Le développement de ce modèle est expliqué dans chapitre suivant).

4.7.1.3.2. Comfa confort Formula :

Comfort Formula est un modèle simplifié intégrant l'ensemble des paramètres climatiques et urbains. Ce modèle est initialement développé par Brown et Gillespie (1986) afin d'évaluer le confort thermique dans les espaces paysagers. Il offre un calcul détaillé à travers des équations qu'on peut saisir à travers un tableur tel qu'Excel ou un programme tel que Matlab. Ce modèle a été réadapté aux espaces urbains (Comfa+), grâce aux travaux d'Angelloti et al. (2007) et Dessi (2008).

La différence entre Comfa et Comfa+ et l'introduction de l'effet des bâtiments dans le calcul du rayonnement dans l'équation du bilan d'énergie.

Le nouveau Comfa+ est basé sur l'équation d'énergie d'une personne dans un espace extérieur. Il est considéré parmi les modèles les plus simples mais évalue efficacement les variations physiques et leurs impacts sur les conditions microclimatiques.

La sensation thermique est évaluée à travers les valeurs du bilan d'énergie thermique (BT) qui exprime le niveau du confort ressenti en fonction de la quantité d'énergie échangé entre l'utilisateur et son environnement. Il peut évaluer l'impact de la végétation, l'effet d'ombre et des matériaux de construction, les données d'entrée sont : T_a , rayonnement solaire horizontale, V_v , HR, TS, le facteur de vue de ciel, le facteur de vue des bâtiments et l'ensoleillement.

Latini et al (2001) ont développé un outil nommé ENVI-COM + dans le but d'automatiser tous les calculs de l'approche statique et améliorer la cohérence de la simulation par l'introduction au modèle COMFA une donnée d'entrée appelé la température des murs simulée par Envi-met. COMFA+ utilisé de son étude était déjà calibré par Dessi (2008) pour

l'Italie. Grâce à ce modèle, il a pu démontrer l'impact des différents scénarios d'aménagement d'un restaurant. Plusieurs techniques pronostiques étaient employées dont trois scénarios étaient comparés. Les résultats obtenus de Comfa ont révélé que le scénario qui comporte l'introduction des éléments d'occultation et les pergolas avec des plantes caduques pour contrôler l'ensoleillement pendant l'été ont beaucoup amélioré les conditions du confort thermique extérieur.

Le modèle initial a été également repris par Kenny et al, (parties A & B, 2009).

Ces chercheurs ont trouvé que lorsqu'il s'agit des activités très importantes, l'indice du confort Comfa sous-estime l'effet du vent et la vitesse de l'activité.

La plupart des études sur le confort thermique extérieur étaient portées sur les conditions statiques ou le sujet performe des activités relativement faibles. Kenney et al., ont appliqué le modèle initial Comfa sur 27 sujets performant plusieurs activités (la marche, courir et le cyclisme). Les individus étaient demandés d'évaluer leur sensation thermique selon 7 points, d'évaluer le taux de l'effort perçu selon l'échelle de 15 points (RPE) et de mentionner ce qu'ils souhaiteraient améliorer. Suite aux modèles de régression multiple, les résultats obtenus ont révélé une dépendance significative avec le sexe, l'activité, la température de l'air, la température du thermomètre cylindre, le rayonnement en longueurs d'ondes émises et la vitesse du vent. En ce qui concerne le sexe, la plupart des femmes choisissaient de répondre +2 (chaud) et +3 (très chaud), alors que les hommes ont voté +1 (légèrement chaud) et -1 légèrement froid. La majorité des valeurs obtenues par Comfa (84.7%) appartenaient à l'intervalle neutre (0) et chaud (+2), similairement à l'ATS étant donné que les activités étaient de modérées à vigoureuses. Cependant la distribution était différente la majorité des votes PTS appartenaient à la sensation neutre (0) et chaude (2) avec les valeurs 36.8% et 29.8% respectivement alors que la catégorie +1 n'a reçu que 18.1%. Contrairement à l'ATS où cette même catégorie a reçu 39.1% Il est à signaler que les valeurs extrêmes de Comfa comparées au ATS (91%) correspondent aux vitesses élevées du vent (3ms^{-1} - 4.9ms^{-1}).

Ces résultats l'ont ramené à déduire que le modèle initial de Comfa ne prend pas en considération l'effet combiné du vent et de l'activité. Comfa a montré une bonne performance dans les prévisions de la sensation thermique, cependant il présente des lacunes dans l'évaluation de l'isolation des vêtements et leurs résistances à la vapeur. Les erreurs dans l'estimation étaient beaucoup plus aperçues pour un $\text{met} > 400\text{wm}^{-2}$, $V_v > 4\text{ms}^{-1}$ et $T_a > 28^\circ$.

Malgré que plusieurs chercheurs aient attribué la discordance entre ATS et PTS aux facteurs psychologiques (Nikolopoulou et Steemers, 2003), Havenith (2002) a suggéré d'améliorer la performance des modèles physiologiques en améliorant l'estimation des facteurs physiques à savoir les vêtements et le métabolisme.

La révision du modèle a beaucoup amélioré sa performance. Les modifications concernent l'évaluation de la résistance des vêtements et de leurs imperméabilités à la vapeur r_{c} et r_{cv} respectivement.

En ce qui concerne la zone du confort neutre, Kenney et al, ont proposé d'élargir les intervalles du confort, du bilan de $-50/+50\text{wm}^{-2}$ à $-20/150\text{wm}^{-2}$, semblablement à Spagnolo et De Dear (2003) ; Nikolopoulou et Steemers 2003, Ahmed 2003, Nikolopoulou et Steemers 2006).

Plusieurs études utilisent soit l'échelle à 7 points où à 9 points dans l'évaluation du confort thermique extérieur parce qu'elle offre le plus de choix aux usagers afin de reporter leur sensation thermique et une bonne distinction entre chaud, légèrement chaud, très chaud, froid, légèrement froid et très froid (Jendritzky et Nübler, 1981). L'échelle utilisée pour Comfa+* dans notre étude est composée de 9 points.

Les équations constituant la structure du modèle exploité dans notre étude (chapitre VII) représentent un fusionnement des trois modèles. Les grandeurs morphologiques étant calculées pour chaque point comme suit :

- a. Le facteur de vue du ciel calculé pour chaque point par townscope.
- b. Le facteur de forme est aussi calculé pour chaque point par Excel en fonction de l'algorithme de Cannistraro qui a été développé à partir des nomogrammes de Fanger (1970) selon l'équation suivante (Cannistraro, 1992):

$$F_{P-A} = F_{\text{satmax}}(1 - \exp[-(a/c)/\tau]) \times (1 - \exp[-(b/c)/\gamma]) \quad (\text{eq.4.9})$$

Où: F_{satmax} , τ et γ sont des coefficients qui varient en fonction de la position de l'utilisateur, a , b et c sont les coordonnées de l'utilisateur dans l'espace public. Les valeurs des données géométriques (SVF et les facteurs de formes) ont été introduites sous forme de matrice dans le nouveau modèle Comfa+* grâce au programme Matlab.

4.7.1.3.3. Calcul de l'indice de la température physiologique équivalente :

D'après ZEKRI (2010), afin d'évaluer le confort thermique extérieur, les chercheurs ont, de plus en plus, recours aux outils de simulation numérique basés sur des équations et des théories modélisant les phénomènes physiques (phénomènes énergétiques, radiatifs, aérauliques, etc.) A cause des difficultés attribuées à la mise en œuvre des campagnes de mesure, les modèles de confort thermique ont vu le jour au cours des vingt dernières années grâce au progrès technologique et à la montée en puissance des capacités des calculateurs. Ces méthodes comparées à l'utilisation des instruments de mesure, ont l'avantage, de pouvoir fournir une quantité de données très importante, qui correspond aux différentes configurations, à travers plusieurs points dans l'espace et à n'importe quel instant. Cependant on leur reproche la durée des calculs surtout lors de la simulation des géométries ou des phénomènes complexes tels que l'écoulement de l'air. Par ailleurs, les résultats obtenus demeurent très dépendants de la qualité de la modélisation géométrique de l'environnement urbain ainsi que des conditions d'initialisation des logiciels de simulations. Ainsi, il recommande de joindre les outils de simulation numérique aux instruments expérimentaux afin de constituer un bon compromis. Par conséquent, les échantillons de données mesurées servant à apprécier la précision des données simulées et à corriger d'éventuelles inexactitudes. Actuellement, les principaux outils de simulation des phénomènes physiques en milieux urbains se déclinent en deux catégories radiatifs (ombres portées, éclairement, rayonnement solaire, températures des parois, etc.) et les outils de simulation des phénomènes aérauliques (vitesse et direction du vent, intensité des turbulences, etc.).

Pour simuler les phénomènes solaires, plusieurs travaux (laboratoire CERMA, Nantes) ont eu recours au logiciel Solène. Quant à la simulation des phénomènes aérauliques, elle est

généralement réalisée par l'intermédiaire de logiciels de simulation de la mécanique des fluides tels que Fluent. Ce type de logiciels nécessite la discrétisation du volume global du modèle en petites entités volumiques qui contiendront, à l'issue des simulations, les valeurs relatives aux variables telles que la vitesse et la direction du vent.

L'un des problèmes que pose le recours à plusieurs types d'outils dans un processus de simulation est la nécessité de faire appel à des méthodes dites de couplage pour le calcul de certaines variables.

Cependant, certains logiciels permettent d'effectuer, à la fois, des simulations solaires, radiatives, thermiques et aérauliques à l'instar du logiciel ENVI-met (Bruse, 2007) où les techniques de couplage sont déjà intégrées dans le processus de simulation.

Envi-met a fait l'objet de plusieurs recherches en climatologie. Katzschner et Thorsson (2009) ont comparé entre les valeurs obtenues de la température moyenne radiante (T_{mrt}) à partir des mesures sur terrain et celles à partir de la simulation numérique en utilisant les deux modèles : Solweig et ENVI-met. Ils ont découvert que les deux méthodes donnaient des résultats semblables. Ils ont conclu que ces méthodes pourraient non seulement être utilisées pour atténuer le stress thermique et analyser l'effet de la géométrie urbaine et des matériaux de construction sur le microclimat, mais aussi pour élaborer des lignes directrices et des outils pour le design urbain (Katzschner, Thorsson, 2009).

Envi-met présente le premier outil utilisé pour évaluer PET. Ce modèle prend en compte à la fois les conditions physiologiques physiques et humaines, il est basé sur les lois de fluide et de thermo-dynamique. Il peut simuler les flux autour des bâtiments, les processus d'échange thermique, la turbulence et la dispersion des particules. Avant de procéder aux simulations, ce modèle exige la définition des variables d'initialisation qui déterminent le contexte de simulations. Les données d'entrée sont constituées des paramètres physiques, morphologiques, géographiques et météorologiques de la zone urbaine étudiée. Les données physiques comprennent la réflectivité et la valeur U des matériaux de construction. Les données morphologiques comprennent les dimensions des bâtiments, le sol et les paramètres de végétation. Les données d'entrée géographiques et météorologiques requises sont la longitude et la latitude de la zone urbaine, la température initiale et l'humidité spécifique de l'atmosphère à 2.500 m de hauteur (limite supérieure du modèle), l'humidité relative à 2m de hauteur, la vitesse et la direction du vent à 10 m de hauteur, et la couverture nuageuse. Les données de sortie sont constituées de la vitesse du vent, de la température de l'air, de l'humidité et de la température radiante moyenne T_{mrt} . La sortie du modèle ENVI-met est donnée en format binaire et importée dans un programme de visualisation LEONARDO afin de pouvoir l'interpréter. (www.envimet.com).

La deuxième étape de la simulation est l'utilisation d'ENVI-met Biomet pour calculer les indices de confort thermique à partir des données de la simulation issues d'Envi-met. Il interagit directement avec les outputs d'ENVI-met et permet de configurer interactivement les paramètres personnels, l'indice de confort thermique et la plage de calcul (Figure 2.28).

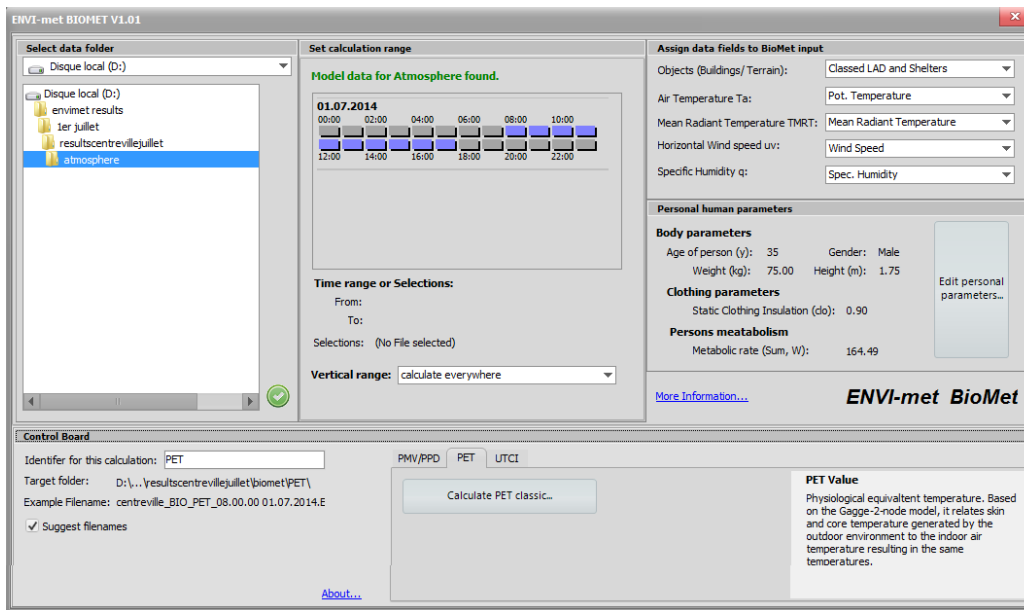


Figure 4.32 : Fenêtre de commande d'ENVI-met BIOMET V1.01

Envi-met Biomet permet le calcul de trois indices de confort, à savoir : le PMV / PPD, le PET et l'UTCI. Les indices varient dans leur niveau de complexité et donc le temps de calcul impartis à chaque indice. Alors que UTCI est basé sur la régression, PMV nécessite la solution itérative de l'équation du bilan énergétique et PET nécessite la solution de deux équations.

La température physiologique équivalente (PET) est un indice de confort thermique fondé sur un modèle pronostique du bilan énergétique qui calcule la température cutanée, la température corporelle centrale, la vitesse de transpiration et, comme variable auxiliaire, la température des vêtements. Il est généralement basé sur le modèle à 2 nœuds proposé par Gagge et al. (1971), compilé et étendu par Höppe (1984) au modèle d'équilibre énergétique (MEMI).

Les guides VDI-guideline 3787 partie 2 (methods for the human-biometeorological evaluation of climate and air quality for urban and regional planning, partie I: climate) recommande l'application du PET pour l'évaluation des éléments du confort pour les différents climats et insiste sur la signifiante de cet indice. Ces guides sont édités par l'association allemande des ingénieurs. ('Verein Deutscher Ingenieure' VDI, d'après Matzarakis.A et Amelung.B, 2008).

Le calcul du PET englobe les étapes suivantes :

- Le calcul des conditions thermiques du corps humain avec le modèle MEMI.
- Insertion des valeurs obtenues de la température de la peau et la température corporelle centrale dans le modèle MEMI et la résolution de l'équation du bilan d'énergie pour la température T_a (avec $V_v = 0.1$ m/s, $VP = 12$ hPa et $T_{mrt} = T_a$).
- La température de l'air résultante est équivalente au PET.

Envi-met Biomet a apporté les modifications suivantes au modèle initial du PET:

- Pour la situation intérieure, les coefficients d'échange turbulent de la chaleur et la vapeur sont calculés en utilisant la vitesse de l'air intérieur au lieu de les maintenir à leurs valeurs extérieures.
- Le taux et la quantité de la sueur sur la peau sont mis à zéro lors du démarrage du calcul pour l'environnement intérieur

4.8. Conclusion :

L'objectif de cette recherche et l'aboutissement à un outil qui peut être utilisé par les concepteurs des espaces extérieurs afin de prévoir le confort généré depuis les formes urbaines projetées.

Pour atteindre cet objectif on a essayé de combiner trois stratégies méthodologiques notamment : l'analyse typomorphologique, les mesures microclimatiques et les entretiens pour démontrer la variabilité de l'environnement thermique en milieu urbain et évaluer les conditions du confort thermique en intégrant les conjonctures d'adaptation des usagers aux conditions de l'environnement thermique.

Un ensemble de données morphologiques constituées d'indicateurs de performance urbaine à l'échelle du tissu urbain (densité bâtie, rugosité et porosité urbaine) et à l'échelle de l'espace public (facteur de ciel vu, ratio H/L, le DoE et l'albédo moyen des surfaces.) ont été calculées. Des données microclimatiques exprimées par les paramètres définissant les conditions du confort thermique en milieu urbain à savoir la température ambiante, la température radiante, l'humidité relative et le mouvement de l'air ont été mesurées le long de différents parcours et à travers les espaces publics. Les mesures ont été accompagnées par des entretiens.

Le confort thermique est évalué en fonction de trois modèles : modèle empirique basé sur les investigations et les entretiens, un modèle mathématique Comfort +*, un modèle simplifié intégrant l'ensemble des paramètres climatiques et urbains calculé à travers Matlab et un modèle thermophysique PET, basé sur la simulation des données météorologiques et géométriques des sites à l'aide des deux modèles Envi-met et Bio-met.

CHAPITRE V

Approche statistique du confort extérieur



5.1.Introduction :

Le présent chapitre présentera les premiers résultats de notre recherche. L'analyse des données collectées s'inscrit dans la convergence de plusieurs disciplines ; grâce aux méthodes de la statistique appliquée, les résultats sont traités par le logiciel très performant de traitement des données SPSS (Statistical package for the Social Sciences) qui nous a permis de faire plusieurs tests statistiques.

Dans un premier temps, ce chapitre définit le cadre général de la recherche et présente le déroulement de l'investigation et des entretiens.

Deuxièmement il traitera l'interprétation des données personnelles et l'impact de chacune sur la sensation thermique.

Troisièmement, il exposera le développement du modèle empirique TEP (température effective perçue) et les différents tests statistiques qui lui sont relatifs.

5.2.Déroulement des entretiens :

En règle générale le questionnaire a été administré en face-à-face, le répondant mettait environ 15min pour répondre aux questions. Une fois le questionnaire renseigné, les répondants devaient le remettre à l'enquêteur. Lorsque nous avons réceptionné l'ensemble des questionnaires, nous avons procédé à leur dépouillement, puis à la saisie et au traitement des données à l'aide du logiciel SPSS.

Pour l'assimilation, les répondants devaient être des résidents à Annaba où les régions limitrophes et les réponses sur la perception thermique et la préférence thermique devaient être cohérentes, c'est-à-dire qu'elles n'avaient pas les mêmes valeurs positives ou négatives : par exemple "Sensation de chaleur" (+2) combiné avec "je préfère être beaucoup plus chaud" (+3). En outre, les interviews des personnes qui ont déclaré avoir une maladie (froid, problèmes cardio-vasculaires, incapacités physiques, etc.) au moment de l'entrevue ne doivent pas être considérés. Conformément aux recommandations de la norme ASHRAE 55 (ASHRAE 2004), seules les données des répondants qui avaient passé au moins 15 minutes dans l'espace extérieur sont considérées dans l'analyse (Bröde et al, 2012).

5.3.Taille de l'échantillon :

Le nombre de sujets dans les enquêtes sur terrain varie grandement. Selon Johansson et al (2014), le nombre de sujets est entre 8 et 36 pour des études longitudinales et entre 91 et 2700 pour des études transversales (Johansson, 2014). Les méthodes transversales et longitudinales ont leurs avantages et leurs inconvénients. Les approches longitudinales permettent plus de contrôle parce que les sujets ont le même passé thermique. Cependant, leur inconvénient peut être que le nombre de sujets est trop faible pour représenter une population très importante. Un autre aspect à ne pas négliger dans les études longitudinales est que les sujets pourraient éventuellement développer un biais vis-à-vis des résultats attendus de la recherche.

La taille de l'échantillon peut également être estimée à partir de la taille de la population. Compter une population d'environ 1.000.000 habitants, avec une marge d'erreur de 5 %, le niveau de 95 % de confiance et une distribution de réponse de 33 % (Confort, l'inconfort causé par le froid, ou de l'inconfort causé par la chaleur), un minimum de 340 personnes

interrogées est nécessaire. Pour une grande population, une taille d'échantillon acceptable se situe entre 400 et 500 individus (Ruiz & Correa, 2015). L'échantillon utilisé dans cette étude était composée d'un total de 895 sujets.

Seuls les votes valides de confort ont été considérés. Ceux où il y avait une disconcordance entre la perception thermique et la préférence thermique ainsi que ceux où les personnes interrogées ont déclaré avoir une maladie ont été éliminés.

5.4. Interprétation des données personnelles :

5.4.1. Répartition des usagers à travers les différents sites :

Plusieurs études menées à travers plusieurs zones climatiques ont indiqué que le nombre de personnes qui fréquentent les espaces extérieurs est fortement lié au confort thermique (Nikolopoulou et al., 2006, Eliasson et al. Lin et al., 2012b, 2013).

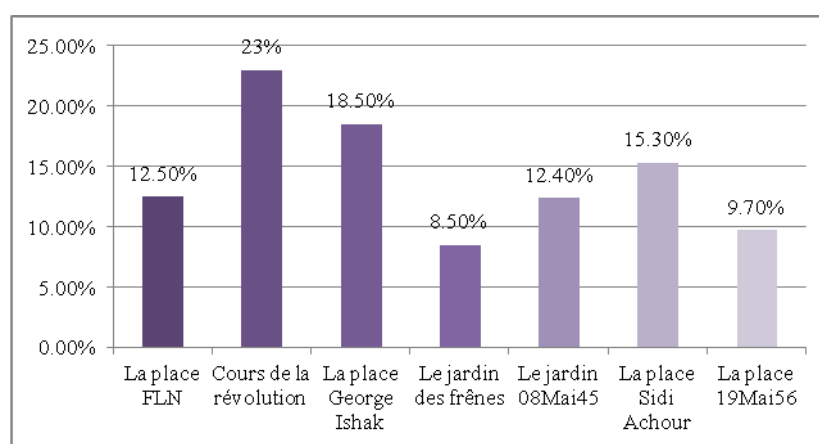


Figure 5.1 : Répartition des usagers à travers les espaces publics.

Le nombre des utilisateurs a été comparé dans les sept espaces publics étudiés. Les résultats décrits dans (figure.5.1) ont montré que le « cours de révolution » a enregistré le nombre le plus important, 23%, suivie par la place de George Ishak, 18,5%, alors que le jardin des frênes n'a recensé que 8,5%. La sensation thermique est traduite à travers une échelle de cinq points (figure.5.2), allant de : Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

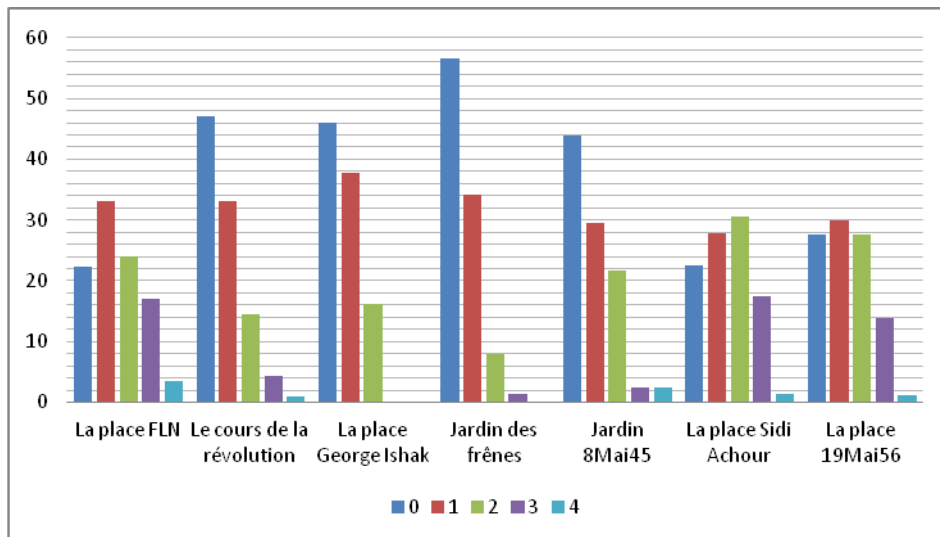


Figure 5.2 : Variation de la sensation thermique à travers les espaces publics. (Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4)).

Le jardin des frênes est l’espace public qui a recensé le plus de votants qui préféraient leurs conditions thermiques. 56,58% n’ont voté « ni chaud ni froid » et 34,21% ont voté « légèrement chaud ». Ces pourcentages valent 47,09% et 33,01% pour le cours de la révolution, 45,95% et 37,84% pour la place George Ishak, et 43,98% et 29,54% pour le jardin du 08mai45. Par contre le nombre le plus important des personnes non satisfaites est recensé dans la place de Sidi Achour et La place FLN, 30,66% et 24,11% ont voté « chaud », 17,52% et 16,96% ont voté « très chaud » respectivement. En ce qui concerne la place 19mai56, presque les deux tiers des participants éprouvaient une satisfaction vis-à-vis de leurs conditions thermiques et 27,59% du dernier tiers ont voté pour la sensation chaude. Similairement, Lay et al., (2014) ont ajouté d’autres facteurs qui justifient la fréquentation des espaces extérieurs à côté du confort thermique et qui doivent être étudiés dans l’amélioration de leurs qualités, tel que la fonctionnalité, la sécurité, la commodité, l’esthétiques, etc. (figure 5.3).

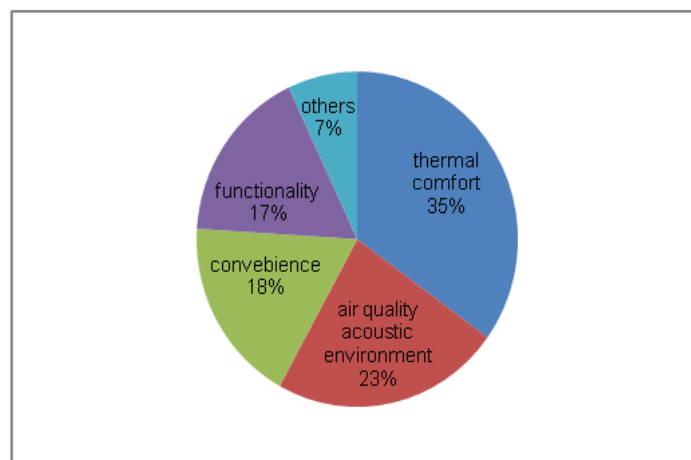


Figure 5.3 : Importance des causes relatives au choix des espaces extérieurs (d’après Lay et al, (2014)).

5.4.2. Impact du genre sur le confort thermique :

Le nombre d'homme interviewé est 514 personnes, soit un pourcentage de 57,4%. Le nombre de femme est de 381 personnes, soit un pourcentage de 42,6% (figure 5.4).

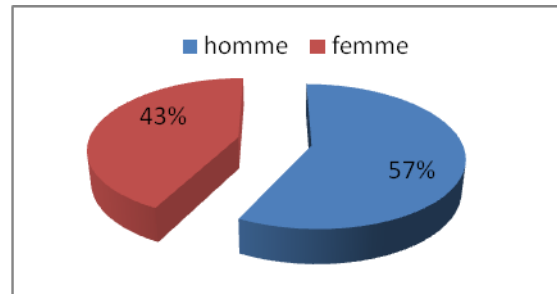


Figure 5.4 : Répartition du genre dans l'échantillon.

Le nombre d'homme est plus important que celui des femmes dans l'échantillon de cette étude parce que généralement les espaces extérieurs sont beaucoup plus fréquentés par les hommes que par les femmes (facteur culturel).

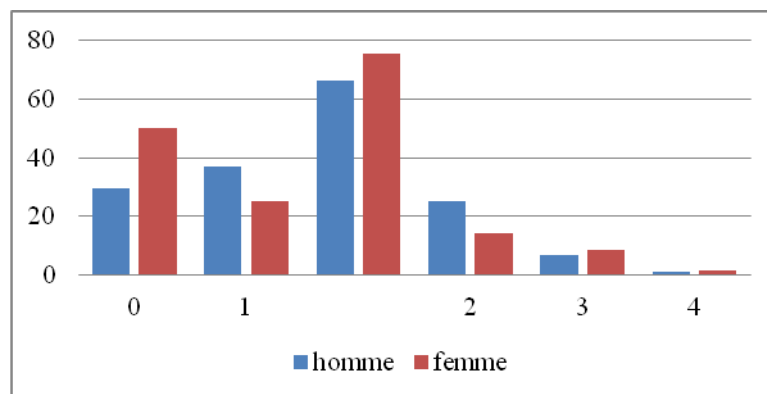


Figure 5.5 : Répartition de la sensation thermique selon le genre.
(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4)).

Parmi 381 des femmes qui ont participé dans ce travail, 76% ont exprimé leur satisfaction vis-à-vis de leur environnement thermique, on trouve 50% n'ont voté « ni chaud ni froid », et 25% ont voté légèrement chaud (figure 5.5). Comparées aux hommes, 30% n'ont voté pour « ni chaud ni froid », et 37% ont voté légèrement chaud. 25% des hommes ont voté « chaud », alors qu'on trouve seulement 14% pour les femmes. Ces résultats montrent que les femmes étaient plus tolérantes aux conditions thermiques que les hommes. Selon Lin (2009), les femmes se protègent du soleil en restant dans des zones ombragées par des arbres ou des bâtiments ou en utilisant des parapluies, des chapeaux ou d'autres objets de protection lorsqu'elles sont exposées au soleil ce qui leur permet de s'adapter plus aux conditions chaudes.

Cependant d'autres études ont trouvé le contraire. D'après Krüger et al (2010), les sujets féminins expriment beaucoup plus de sensibilité via les conditions chaudes comparés aux sujets masculins.

Une étude comparative entre les deux sexes relative à l'appréciation du confort thermique et l'utilisation de thermostat a été menée par Karjalainen (2007) sur 3094 sujets Finlandais. Les résultats montrent des différences significatives entre les deux sexes dans l'utilisation de thermostats et l'appréciation du confort thermique. Généralement les femmes préfèrent des températures ambiantes plus élevées que les hommes, elles se sentent à la fois inconfortables plus que les hommes soient dans des conditions froides ou dans les conditions chaudes. Bien que les femmes soient les plus sensibles vis-à-vis de leurs environnements thermiques, les hommes utilisent plus souvent les thermostats plus que les femmes.

5.4.3. Impact de l'âge sur le confort thermique :

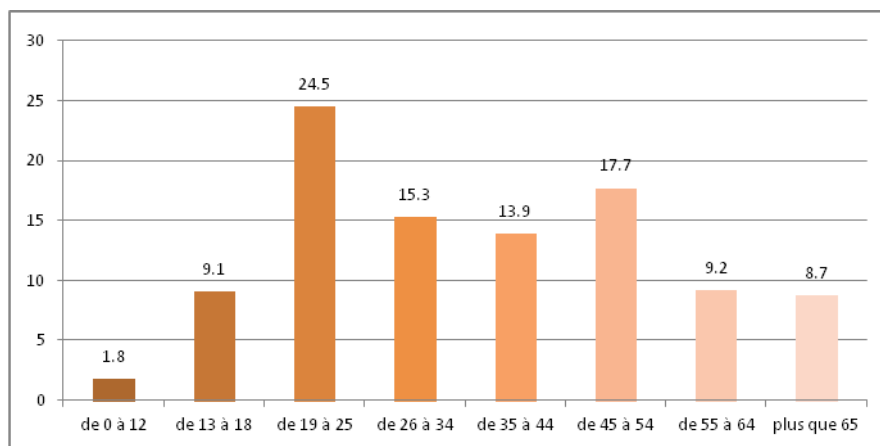


Figure 5.6 : Répartition d'âge.

Notre investigation a cerné les différentes tranches d'âge (figure 5.6). La tranche la plus importante est celle de 19 à 25ans, elle représentait 24,5% de l'échantillon. Les enfants représentaient seulement 1,8%, et les personnes âgées de plus de 65ans représentaient 8,7%.

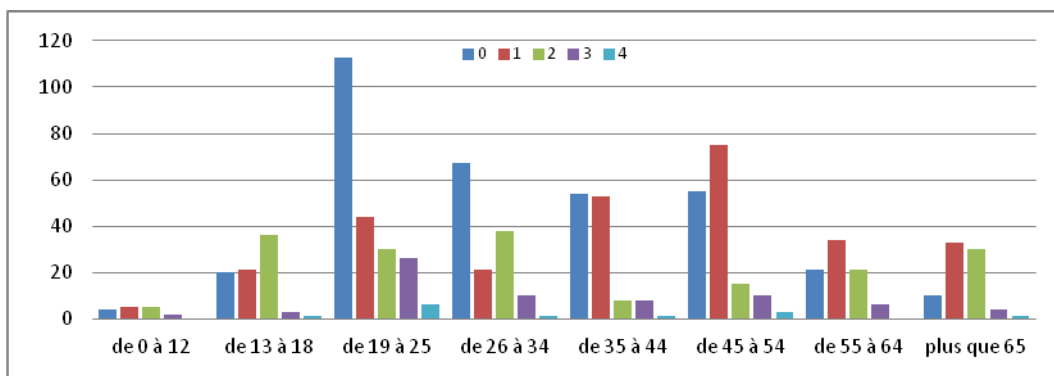


Figure 5.7 : Répartition de la sensation thermique selon l'âge.
(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

La tranche d'âge la plus satisfaite de l'environnement thermique est celle âgée de 35 à 45ans et de 45 à 54ans avec les valeurs 86,29% et 82,28% respectivement. Par contre la tranche d'âge qui a voté le plus « ni chaud ni froid », correspondait au groupe âgé de 19 à 25ans,

51,60% (Figure 5.7). Pour les personnes âgées, seulement 12,82% n'ont voté « ni chaud ni froid », 42,31% pour légèrement chaud et 38,45% ont voté « chaud ».

D'après Shooshtarian et Ridley (2016), le groupe d'âge a une influence importante sur la sensation thermique. Ceci est probablement lié aux conditions physiologiques du corps humain à travers les différents stades de la vie. L'âge a un impact sur la forme des vêtements portés et sur le niveau et le type d'activité exercée. Ces caractéristiques affectent également le taux métabolique basal de la production de chaleur, qui diminue avec l'âge. En outre à d'autres facteurs psychologiques attribués à la perception des conditions environnementales, les personnes âgées sont en général plus sensibles à la chaleur.

Contrairement, Krüger et al (2010) ont signalé que les groupes d'âge jeunes étaient les plus sensibles à la chaleur, comparés aux groupes âgés. Ils l'ont justifié par les valeurs de clos un peu élevé chez les jeunes. En outre, la plupart des personnes âgées étaient des anciens résidents qui se sont acclimaté au climat de la ville, alors que beaucoup de nouveaux arrivants étaient plus jeunes.

5.4.4. Impact du lieu de résidence sur le confort thermique :

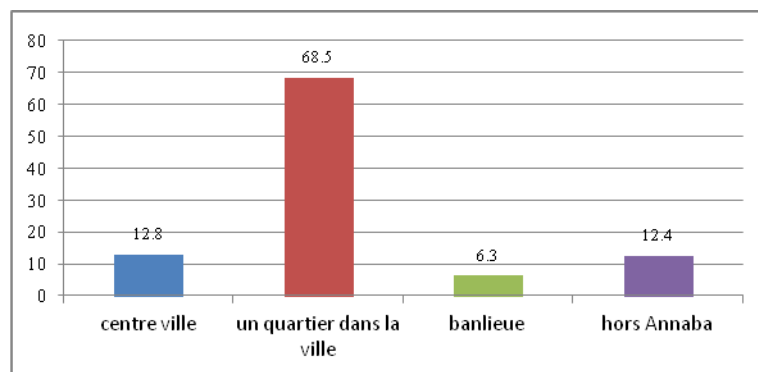


Figure 5.8 : Lieux de résidence des interviewés.

La majorité des participants habitaient à Annaba, 68,5% des personnes habitent dans un quartier à Annaba et seulement 6,3% habitaient hors Annaba (figure 5.8).

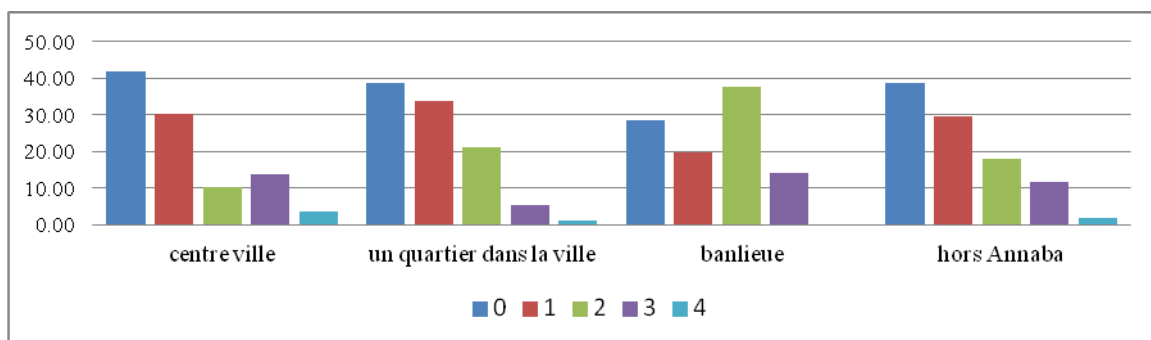


Figure 5.9 : Sensation thermique selon les lieux de résidence des interviewés.
(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

Les habitants de la ville d'Annaba sont les plus satisfaits par leur environnement thermique. 41,74% de ceux qui vivaient au centre-ville n'ont voté « ni chaud ni froid » et 38.66% pour ceux qui vivaient dans un quartier à Annaba. 28.57% pour les habitants de la banlieue et 34% pour les habitants hors Annaba. Ces résultats peuvent être justifiés par l'impact de l'acclimatation, les gens qui vivent à Annaba sont les plus adaptés au climat (figure 5.9).

5.4.5. Impact de l'exposition au soleil sur le confort thermique :

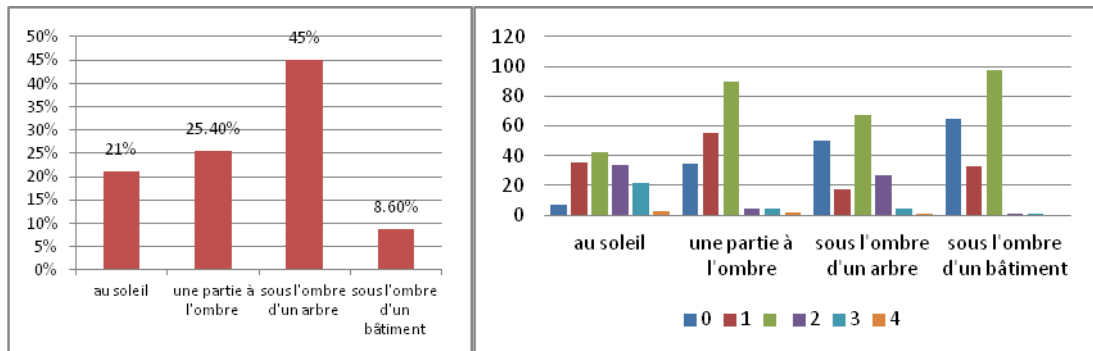


Figure 5.10 : L'impact de l'exposition au soleil sur les usagers. (Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

Durant notre enquête et campagne de mesure, le grand nombre des usagers était assis sous l'ombre des arbres (45%). 21% étaient exposés au soleil et seulement 8% s'assoient sous l'ombre d'un bâtiment (figure 5.10).

Presque la totalité (97%) des personnes discernées sous l'ombre d'un bâtiment, appréciait leur environnement thermique dont 65% n'ont voté « ni chaud ni froid » et 35,5% ont voté légèrement chaud ». Ce pourcentage est de 50,12% et 17,37% pour les personnes repérées sous l'ombre d'un arbre respectivement. Ces résultats montrent l'impact des composants des espaces verts dans l'amélioration de la qualité des espaces extérieurs et l'augmentation de leur degré de fréquentation.

5.4.6. Entourage et confort :

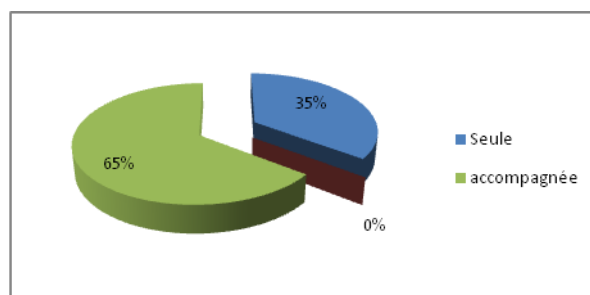


Figure 5.11 : Entourage des interviewés.

Presque les deux tiers des personnes interviewées étaient accompagnées (figure 5.11). Ce qui reflète le rôle de ces espaces dans les rencontres et le groupement ainsi que le renforcement des liens sociaux.

5.4.7. Couleur de la peau et confort :

81,9 % des interviewés avaient un teint clair et seulement 18,1% avaient un teint sombre (figure 5.12).

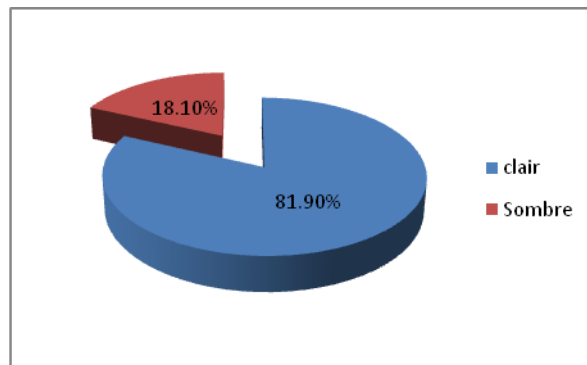


Figure 5.12 : Impact de la couleur de la peau sur le confort thermique.

74,76% des votants ayant un teint clair ont exprimé leur satisfaction des conditions thermiques, 39,29% n'ont voté « ni chaud ni froid » et 35,47% ont voté « légèrement chaud ». Cependant ceux qui avaient un teint sombre ont voté 34,57% « ni chaud ni froid » et 32,10 % ont voté « légèrement chaud ».

Selon Arens et Zhang (2006) l'absorption du rayonnement solaire par la peau varie en fonction de la couleur pour le spectre visible et le proche infrarouge. Pour le rayonnement visible (0,4 à 0,7 μm), la peau blanche absorbe environ 0,5 μm , tandis que la peau noire absorbe 0,74. Pour le spectre proche infrarouge (entre 0,8 à 1,4 μm), la peau blanche absorbe 0,6 μm , tandis que la peau noire absorbe 0,7 μm .

5.4.8. Couleur des vêtements :

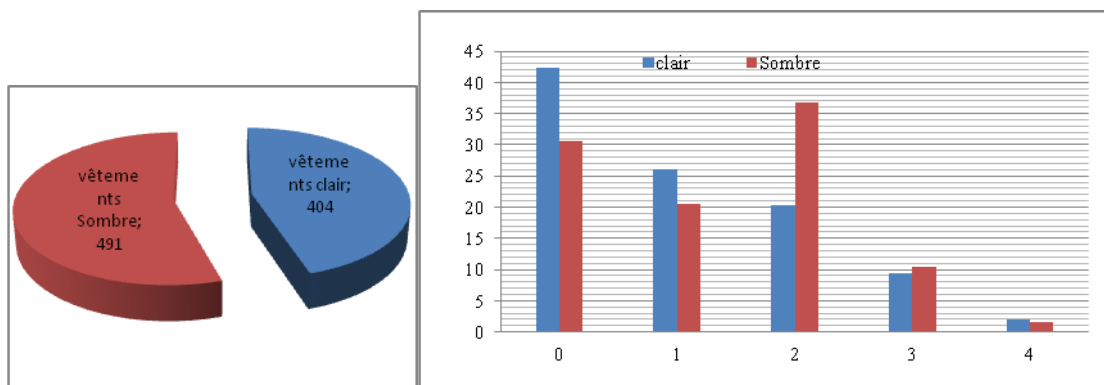


Figure 5.13 : Impact de la couleur des vêtements sur le confort thermique.
(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

Une différence de 87 personnes entre les usagers qui portaient des vêtements sombres et ceux qui portaient des vêtements clairs. 42,33% de ces derniers n'ont voté « ni chaud ni froid » comparé à 51,12% pour ceux qui portaient des vêtements sombres (figure 5.12).

5.4.9. La Durée :

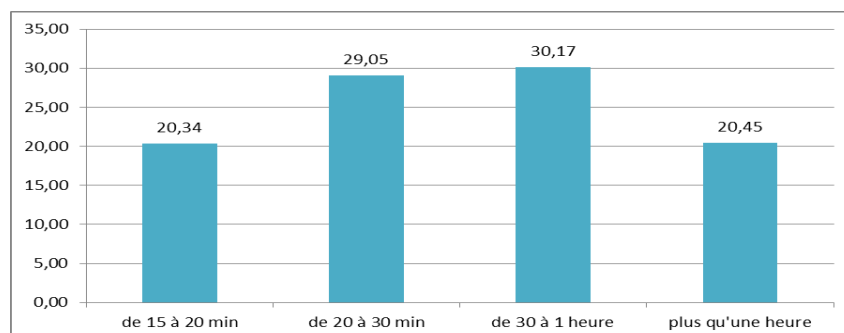


Figure 5.14 : Répartition des durées en fonction des usagers.

D'après la figure 5.13, les usagers interrogés ont passé plus que 15 minutes dans les espaces extérieurs. Cette durée est variable, on remarque : 20.34 % ont passé de 15 à 20 minutes, 29.05% de 20 à 30 minutes et 30.17% de 30 à 1 heure et 20.45% ont plus qu'une heure (figure 5.14).

Les personnes qui étaient les plus satisfaites par leurs conditions thermiques étaient ceux qui avaient passé de 30 à une heure dans ces espaces extérieurs, 43% n'ont voté « ni chaud ni froid » et 35% « légèrement chaud » (figure 5.15).

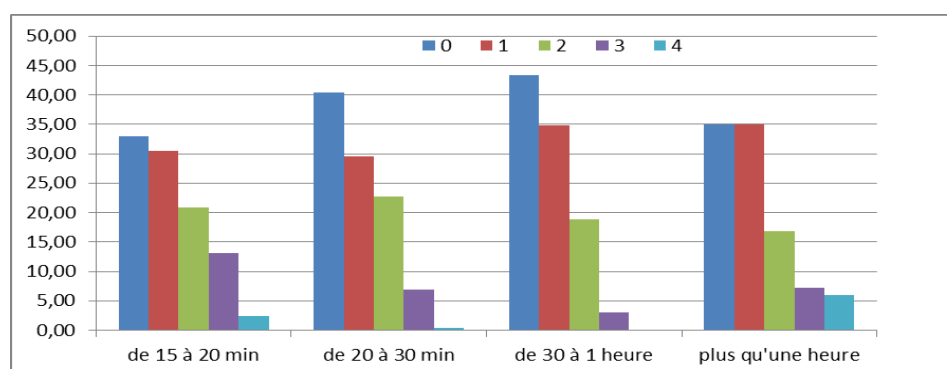


Figure 5.15 : Sensation thermique en fonction de la durée.
(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

5.4.10. Le passé thermique :

Bien que la plus part des sites étudiés sont proches des zones résidentielles, sur les 895 personnes interviewées, 352 soit un pourcentage de 39%, ont répondu qu'ils étaient dans leurs maisons avant qu'ils venaient à ces espaces.

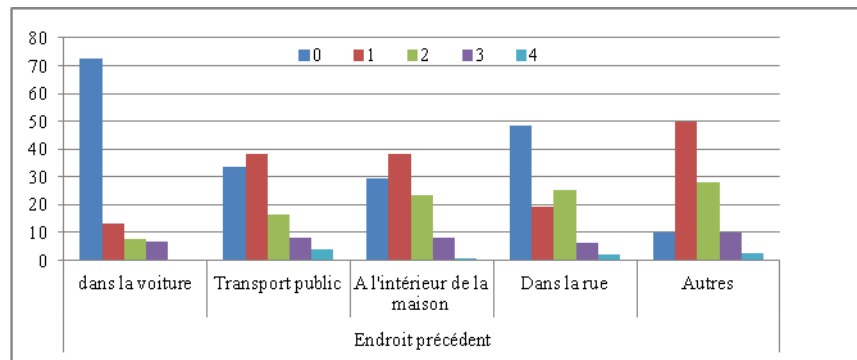


Figure 5.15 : Sensation thermique en fonction du passé thermique. (Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

Cependant les personnes qui étaient les plus satisfaites de leurs conditions thermiques figuraient dans le groupe qui était dans la voiture ou dans le transport public avec un pourcentage de 85,93% et 71,52%, dont 72,52% et 33,54% n’ont voté « ni chaud ni froid », 13,33% et 38,35% ont voté « légèrement chaud respectivement » (figure 5.15).

5.4.11. Raison de l’utilisation de l’espace public :

La majorité des personnes rencontrées sont venues pour le repos et la rencontre des amis, ce qui dévoile l’importance de ces espaces dans le renforcement des liens sociaux et l’amélioration du bien-être dans la ville (figure 5.17).

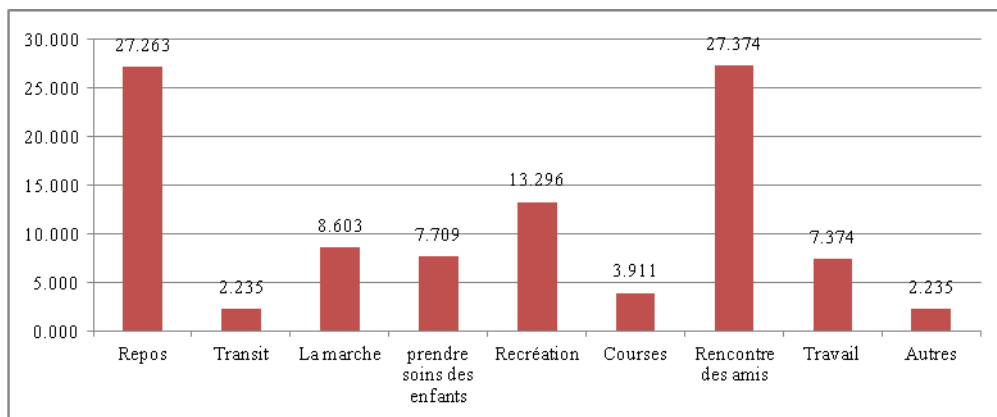


Figure 5.17 : Répartition des activités.

5.4.12. Fréquence de l’utilisation

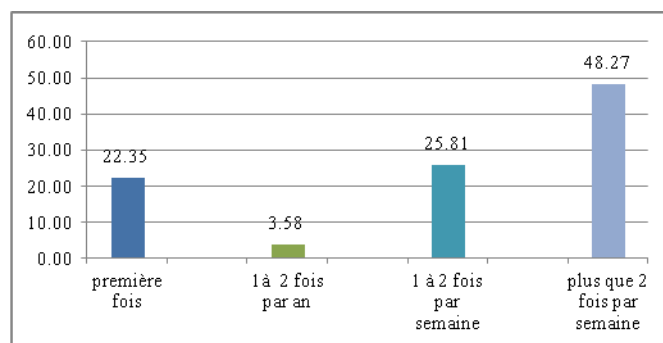


Figure 5.18 : Répartition des fréquences.

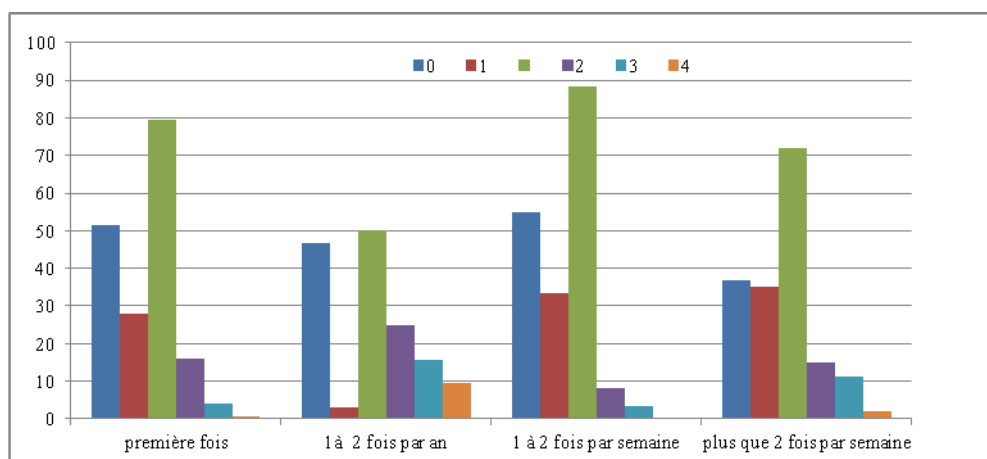


Figure 5.19 : Sensation thermique selon les fréquences.

(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

Presque la moitié des participants visitaient les sites étudiés plus que deux fois par semaine (48,27%) (figure 5.17). Les votants les plus satisfaits par rapport à ce paramètre sont ceux qui venaient une à deux fois par semaine. 55% n'ont voté « ni chaud ni froid » et 33% ont voté « légèrement chaud ». Contrairement, ceux qui venaient seulement une fois par an ont voté 25% « chaud » et 15,63% « très chaud » et 9,39% extrêmement chaud (figure 5.19).

5.4.13. Appréciation des différents paramètres climatiques :

Au cours de notre enquête, on a demandé aux usagers de déterminer le paramètre climatique qui était le plus ennuyeux. 410 ont voté pour le rayonnement solaire, 409 pour l'humidité, 377 pour le vent et seulement 205 pour la température de l'air (figure 5.20).

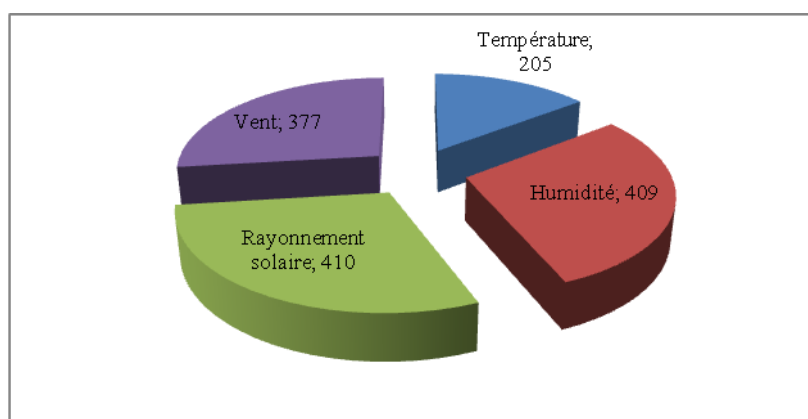


Figure 5.20 : Appréciation des différents paramètres climatiques.

5.4.14. Résistance des vêtements, taille et poids :

La résistance des vêtements varie entre 0,5 et 0,65 pour la plupart des participants. L'évaluation de l'impact de la taille et du poids est faite en fonction de l'indice de la masse corporelle. Selon Bröde et al, (2012) l'indice de la masse corporelle est calculé comme suit :

$$\text{IMC} = \text{poids} / (0,01 \times \text{taille})^2 \quad (\text{eq.5.1})$$

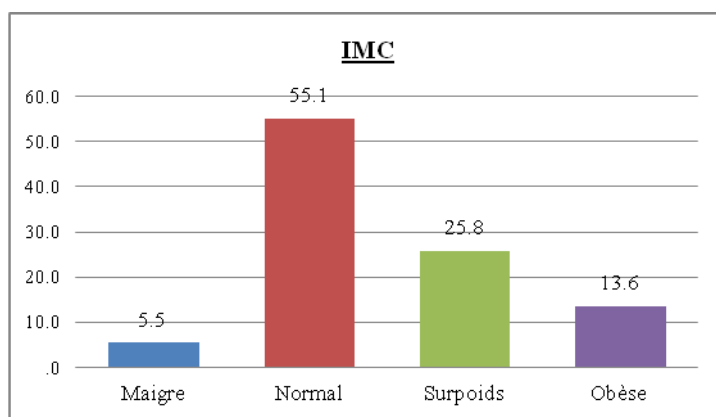


Figure 5.21 : L'indice IMC selon l'échantillon.

L'indice IMC était comparé aux valeurs suivantes :

- $IMC < 18.5 \Rightarrow$ Insuffisance pondérale (maigre).
- $18.5 < IMC < 24.9 \Rightarrow$ Poids normal.
- $25 < IMC < 29.9 \Rightarrow$ Surpoids.
- > 30 obésité.

Le calcul du IMC relatif aux enquêtés a montré que plus que la moitié ont un IMC normal (55.1%). La classe maigre ne représente que 5.5% de l'échantillon et la classe obèse 13.6%. La moyenne du poids calculé est de 68,72kg et celle de la taille est de 1,66m.

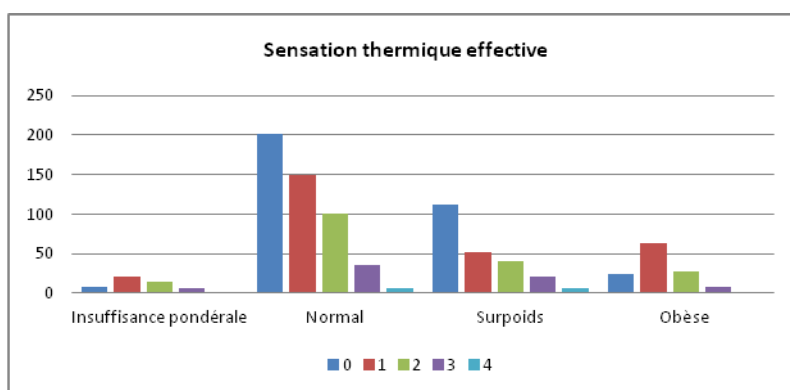


Figure 5.22 : Résistance des vêtements, taille et poids.
(Neutre (0), légèrement chaud (1), chaud (2), très chaud (3) et extrêmement chaud (4).

D'après la figure. 5.22, la masse corporelle a un grand effet sur la sensation du confort thermique. Les personnes maigres et obèses sont le plus sensible aux conditions thermique comparé aux personnes avec un IMC normal.

5.5. Développement du modèle de confort empirique propre à Annaba :

5.5.1. La méthode la régression multiple :

La régression est l'une des méthodes les plus communes et les plus appliquées en statistique pour l'analyse de données quantitatives. Elle est utilisée pour établir une liaison entre une variable quantitative et une ou plusieurs autres variables quantitatives, sous la forme d'un modèle.

Le traitement des valeurs d'une variable dépendante « y » se fait en fonction des valeurs prises par une ou plusieurs variables quantitatives indépendantes observées sur n individus.

Dans le cas le plus général et le plus simple, la fonction est traitée comme étant linéaire. La relation entre les « x » et y peut être représentée par une équation ayant la forme

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Si on s'intéresse à la relation entre deux variables, on parlera de régression simple (=bivariée) en exprimant une variable en fonction de l'autre. L'équation de régression a donc la forme :

$$y = a + bx$$

Si la relation porte entre une variable et plusieurs autres variables, on parlera de régression multiple. Elle est une extension de la régression simple. Le réel pouvoir heuristique de l'analyse de régression réside en effet dans sa capacité à prendre en compte de manière simultanée plusieurs variables indépendantes. D'une part, cela permet de réduire la grandeur des résidus et donc de rendre compte d'une plus grande part de la variation de la variable dépendante « y » (Chouquet, 2009/2010).

L'équation de régression linéaire prend alors la forme :

$$y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k + \text{résidus}$$

$$\hat{y} = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

Dans la régression linéaire, la variable dépendante est continue, les variables indépendantes introduites peuvent être continues ou catégorielles (ordinales ou dichotomiques).

Dans ce travail, l'analyse des données était effectuée en utilisant le logiciel statistique SPSS17 pour Windows. Selon la nature des variables, plusieurs types d'analyses de régression multiples peuvent être utilisés grâce à ce logiciel. Le type de régression appliqué est la régression multiple standard ou simultanée où les variables indépendantes ont été considérées simultanément. Chaque variable indépendante était évaluée en fonction de son pouvoir prédictif, supérieur à celui offert par les autres variables indépendantes.

La régression multiple est procédée entre la sensation thermique effective et les variables indépendantes suivantes : température de l'air, vitesse du vent, humidité relative et la température moyenne radiante.

Pour chaque variable indépendante, le logiciel SPSS calcule un coefficient β qui correspond à la pente de la droite de régression. Dans cette étude on a quatre variables indépendantes, l'équation de la droite de régression prendra la forme suivante :

$$Y = a + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4.$$

β_1 est un indice de la force de la relation entre X_1 - une des valeurs indépendantes introduites dans l'équation de régression- et la variable dépendante Y, une fois que le lien entre Y et les autres variables indépendantes est maintenu constant.

5.5.2. Récapitulation des observations :

Lors des campagnes des mesures la température de l'air moyenne mesurée était de 24.31°C, la température moyenne minimale et maximale étaient : 19.35°C et 36.2°C respectivement. L'humidité relative moyenne était de 41.45% alors que la minimale et la maximale étaient de 21.01 et 68.20 respectivement. La vitesse moyenne du vent est de 1.23m/s, la vitesse minimale et maximale ont atteint les valeurs 0.09m/s et 4.88m/s respectivement. Quant à la température moyenne radiante la valeur moyenne enregistrée était de 35.02°C, alors que ses deux valeurs minimale et maximale étaient 19.23°C et 68.16°C respectivement (tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Récapitulatif des observations

	Température mesurée	Humidité relative	Vitesse du vent	Température moyenne radiante
Moyenne	24,3123	41,4571	1,2994	35,0224
Minimum	19,35	21,01	0,09	19,23
Maximum	36,2	68,2	4,88	68,16

5.5.3. Les variables utilisées :

La variable dépendante est la Sensation thermique effective (STE), les variables indépendantes : température de l'air (Ta), humidité relative (HR), vitesse du vent (Vv), température moyenne radiante (Tmrt). Toutes les variables sont retenues dans le modèle (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Variables introduites/supprimées.

Modèle	Variables introduites	Variables supprimées	Méthode
1	Tmrt, HR, Vv, Ta ^a	.	Entrée

5.5.4. Statistiques descriptives

Le tableau des statistiques descriptives montre que l'étude a été menée auprès de 895 usagers répartis à travers les différents sites. Comme il présente la moyenne des variables indépendantes et dépendantes et leurs écarts type (tableau 5.3).

La série des écarts est une nouvelle série statistique qui montre de quelle façon les valeurs s'éloignent de la moyenne \bar{x} calculée au préalable. Cette série est calculée comme suite :

$$e_i = x_i - \bar{x}$$

Tableau 5.3 : Statistiques descriptives

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
Température mesurée	895	19,35	36,2	24,3123	2,89831
Humidité relative	895	21,01	68,2	41,4571	8,22745
Vitesse du vent	895	0,09	4,88	1,2994	0,73234
Température moyenne radiante	895	19,23	68,16	35,0224	10,18112
N valide (listwise)	895				

A côté du tableau des statistiques descriptives, SPSS fourni un autre tableau concerne les corrélations entre les variables étudiées.

En examinant le tableau on remarque que la corrélation entre les variables indépendantes est inférieure à 0,8 ce qui indique l'absence de risque de multicollinéarité (Comme une règle générale, il est recommandé de ne pas dépasser 0.8 dans les corrélations entre les variable indépendantes). Le coefficient de corrélation de Pearson (tableau 5.4) montre une relation très forte et significative entre la température moyenne radiante et STE, ainsi qu'entre la température de l'air et la vitesse du vent. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 0.981,0.645 et 0.981 respectivement.

Tableau 5.4 : Corrélation.

		Sensation thermique actuelle	Température mesurée	Humidité relative	Vitesse du vent	Température moyenne radiante
Corrélation de Pearson	Sensation thermique actuelle	1	0,645	-0,155	0,682	0,981
	Température mesurée	0,645	1	-0,361	0,29	0,58
	Humidité relative	-0,155	-0,361	1	-0,065	-0,227
	Vitesse du vent	0,682	0,29	-0,065	1	0,671
	Température moyenne radiante	0,981	0,58	-0,227	0,671	1
Sig. (unilatérale)	Sensation thermique actuelle	.	0	0	0	0
	Température mesurée	0	.	0	0	0
	Humidité relative	0	0	.	0,026	0
	Vitesse du vent	0	0	0,026	.	0
	Température moyenne radiante	0	0	0	0	.
N	Sensation thermique actuelle	895	895	895	895	895
	Température mesurée	895	895	895	895	895
	Humidité relative	895	895	895	895	895
	Vitesse du vent	895	895	895	895	895
	Température moyenne radiante	895	895	895	895	895

5.5.5. Évaluation de la qualité du modèle de régression

5.5.5.1. Analyse de variance

Tableau 5.5 : Analyse de variance (ANOVA)

Modèle		Somme des carrés	Ddl	Moyenne des carrés	D	Sig.
1	Régression	904,333	4	226,083	13081,625	,000a
	Résidu	15,381	890	0,017		
	Total	919,714	894			

On constate de la lecture du tableau 5.5 d'Anova que selon la valeur F obtenue pour ce modèle 13081,625 est significative à $p < 0,001$, ce qui indique que nous avons moins de 0,1 % de chance de se tromper en affirmant qu'on peut rejeter l'hypothèse nulle et le modèle contribue à mieux prédire la sensation thermique actuelle du confort.

5.5.5.2. Évaluation de l'ajustement du modèle de régression aux données

Tableau 5.6 : Récapitulatif du modèle

Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin-Watson
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Variation de F	
1	,992 ^a	,983	,983	,131	,983	13081,625	4	890	,000	1,956

- D'après le tableau 5.6 le « R » Multiple de la relation entre la variable dépendante et l'ensemble des variables indépendantes est 0,992, cette valeur est supérieure à 0,80, ce qui signifie que la corrélation est très forte. La valeur de 0,992 suggère que les données sont ajustées de manière très satisfaisante au modèle. La proportion de la variance de la variable dépendante exprimée par toutes les variables indépendantes est supérieure à 98%.
- La variation de F associée au modèle est significative ($p < .001$). Ce modèle explique donc une proportion significative de la variance de la variable sensation thermique effective. La valeur de F est calculée à partir de la variation du R^2 entre les étapes. SPSS détermine donc $p < 0,001$. Chaque étape contribue donc significativement à l'amélioration de l'explication de la variabilité de la variable dépendante.
- Le facteur de Durbin-Watson (d) est calculé à 1, 956. Cette valeur est comprise entre 1,5 et 2,5. Ce qui confirme l'absence d'auto-corrélation linéaire de premier ordre dans nos données de régression linéaire multiple.
- Les résultats suggèrent que 98,3 % PTS est expliqué par les variables indépendantes
- L'équation de base était la suivante :

$$Y_i : (b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n) + \varepsilon_i$$

Tableau 5.7 : Calcul des coefficients

Modèle	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	T	Sig.	95,0% % intervalles de confiance pour B		Corrélations			Statistiques de colinéarité		
	A	Erreur standard				Borne inférieure	Limite supérieure	Corrélation simple	Partielle	Partie	Tolérance	VIF	
(Constante)	-4,030	,054		-75,188	,000	-4,135	-3,925						
Température mesurée	,056	,002	,159	28,331	,000	,052	,059	,645	,689	,123	,597	1,674	
Humidité relative	,013	,001	,106	22,624	,000	,012	,014	-,155	,604	,098	,864	1,158	
Vitesse du vent	,075	,008	,054	9,136	,000	,059	,091	,682	,293	,040	,532	1,881	
Température moyenne radiante	,087	,001	,877	125,620	,000	,086	,089	,981	,973	,545	,386	2,591	

En remplaçant les valeurs obtenues de « b » par les coefficients fournis dans le tableau ci-dessus (tableau 5.7).

L'équation de la sensation thermique effective prédite (STE) en fonction des quatre variables microclimatiques est définie comme suit

$$Y_{\text{prédit}} = (-4,03 + 0,056Ta + 0,013HR + 0,075Vv + 0,087TMrt) \quad (\text{eq.5.2})$$

où:

Ta: température de l'air;
 Vvs: La vitesse du vent;
 HR: humidité relative;
 Tmrt: température moyenne radiante.

La valeur du Beta standardisé (β) apporte aussi une information intéressante. Elle indique le changement en écart-type de la VD pour chaque augmentation d'un écart-type de la VI quand toutes les autres valeurs sont constantes.

Pour les intervalles de confiance, les valeurs sont rapprochées avec l'absence de la valeur 0.

La valeur VIF *Variance Inflation Factor* (ou la tolérance, soit l'inverse du VIF ($1/VIF$)) permet de vérifier la multicollinéarité. D'après le tableau toutes les valeurs se situent entre 1,158 et 2,591

Tableau 5.8 : Diagnostic de colinéarité

Modèle	Dimension	Valeur propre	Index de conditionnement	Proportions de la variance				
				(Constante)	Température mesurée	Humidité relative	Vitesse du vent	Température moyenne radiante
1	1	4,735	1,000	,00	,00	,00	,00	,00
	2	,194	4,943	,00	,00	,03	,44	,00
	3	,050	9,752	,00	,02	,26	,31	,23
	4	,017	16,652	,06	,12	,37	,24	,68
	5	,004	34,822	,94	,86	,34	,01	,09

Le tableau 5.8 présente également la valeur des corrélations et des corrélations partielles. Le choix des variables suivantes est par contre basé sur la corrélation partielle, c'est-à-dire la plus forte corrélation entre les variables toujours disponibles et la partie de variance qui reste à expliquer une fois que l'on a retiré ce qui est expliqué par le premier prédicteur.

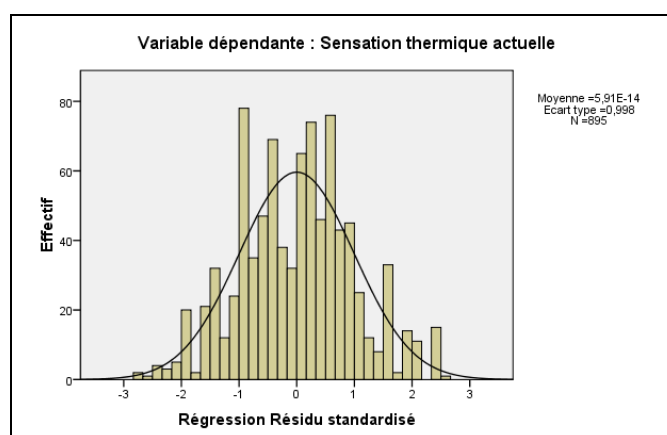


Figure 5.23 : Vérification de l'homéodasticité

Pour la vérification de l'homéodasticité, le graphe (figure 5.23) montre une répartition aléatoire des points autour du point 0 (ne forme pas un entonnoir) et ne suit pas une courbe.

Le graphique quantile-quantile (Q-Q) fourni par SPSS peut être utilisé pour évaluer la normalité des données. Cette évaluation de la normalité est une condition préalable à de nombreux tests d'analyse statistique. Figure 5.24 montre que les points se situent dans une dispersion aléatoire serrée autour de la ligne de référence, ce qui signifie qu'ils sont normalement distribués, et qu'aucune corrélation entre les variables indépendantes n'existe (connue sous le nom de colinéarité).

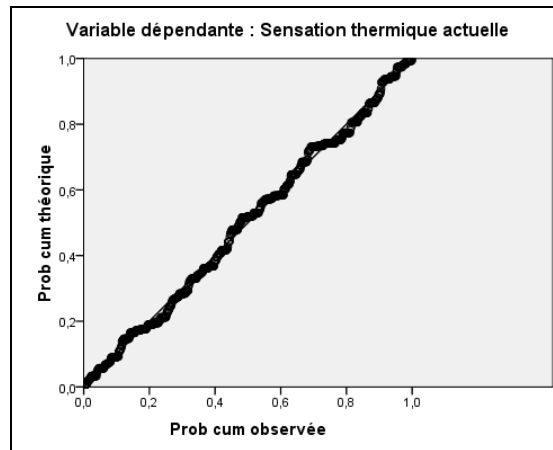


Figure 5.24 : Diagramme gaussien P-P de régression de Résidu standardisé

Selon Nikolopoulou et Lykoudis (2007), La température de l'air et le rayonnement solaire étaient les paramètres les plus dominants en ce qui concerne l'utilisation des espaces extérieurs. La vitesse du vent et l'humidité relative ont eu un faible effet dans le climat méditerranéen. Dans le cadre de cette étude, l'effet de la température moyenne radiante sur le confort thermique extérieur était significativement important (figure 5.28). La température de l'air et l'humidité relative semblent avoir un effet moyen (figure 5.25 & figure 5.26) alors que l'effet du vent est insignifiant (figure 5.27). La sensation thermique effective STE a montré une bonne corrélation avec la température moyenne radiante T_{mrt} ($R^2 = 0.9$), une corrélation moyenne avec l'humidité relative et la température de l'air ($R^2 \sim 0.5$) et une faible corrélation avec la vitesse du vent ($R^2 = 0.15$) (Figure 5.27). Ces résultats permettent de conclure que, dans des conditions de faible vitesse du vent, la température radiante moyenne a eu l'effet le plus dominant dans l'évaluation du confort thermique extérieur

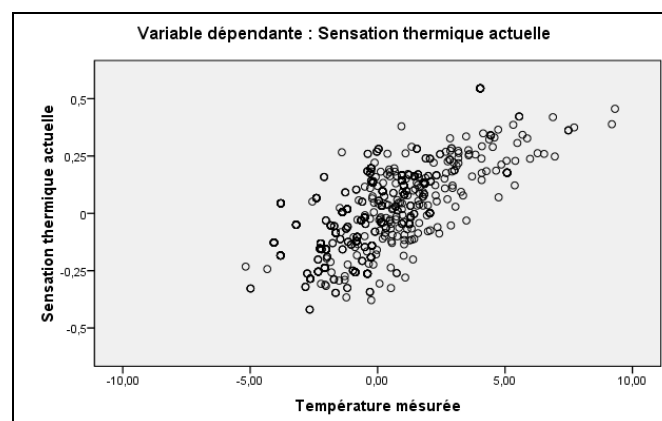


Figure 5.25 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ température de l'air

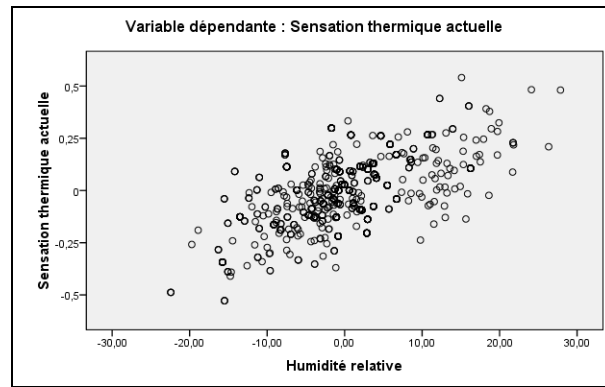


Figure 5.26 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ humidité relative de l'air

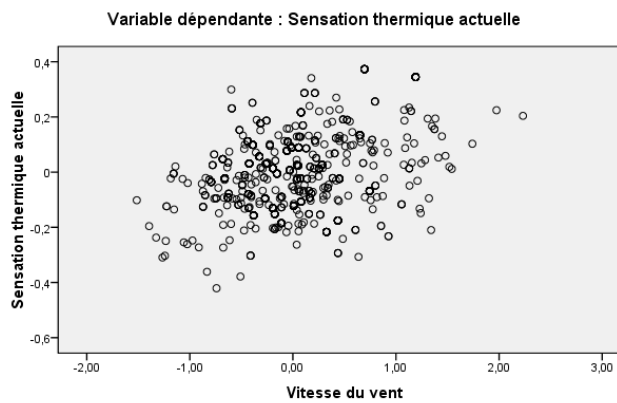


Figure 5.27 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ vitesse de l'air

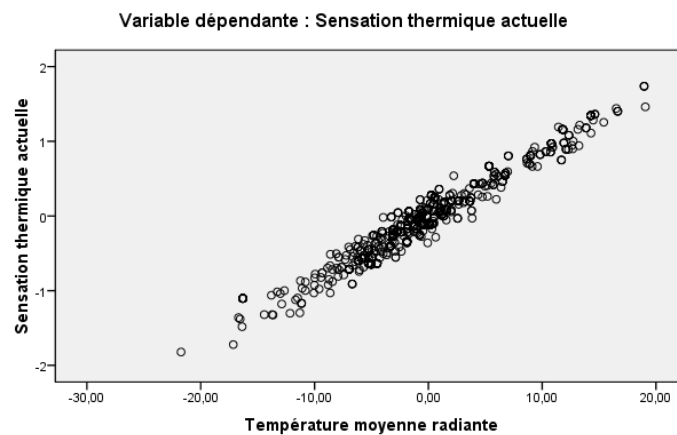


Figure 5.28 : Diagramme de régression partielle : sensation thermique actuelle/ température moyenne radiante

Selon Menteiro et Alucci (2005, 2009), la tendance actuelle est d'utiliser une température équivalente au lieu d'utiliser des intervalles.

$$STE = -4.03 + 0.056T_a + 0.013HR + 0.075V_v + 0.087T_{mrt}. \quad (\text{eq.5.3})$$

Ainsi c'est la température elle-même qui traduit les conditions de confort en fonction de l'environnement de référence.

Pour calculer TEP on considère que : $T_{Mrt}=T_a$, $HR=50\%$ et $V_v=0m/s$.

Ainsi :

$$STE = -4.03 + (0.056 + 0.087) T_a + 0.013 \times 50 = -3.38 + 0.143 T_a \quad (\text{eq.5.4})$$

$$\Rightarrow T_a = 6.99 t_{sp} + 23.63$$

T_a est la température d'environnement de référence, ainsi :

$$TEP = 6.99 + (-4.03 + 0.056 T_a + 0.013 HR + 0.075 V_v + 0.087 T_{mrt}) \quad (\text{eq.5.5})$$

$$TEP = -4.53 + 0.39 T_a + 0.09 HR + 0.52 V_v + 0.6 T_{mrt}. \quad (\text{eq.5.6})$$

Ainsi la température neutre pour l'environnement de référence est 23.63°C . Afin de déterminer les intervalles du nouvel indice TEP, les résultats des mesures et des interviews menées durant Mai 2015 à travers Annaba ont été utilisés. Les interviewés ont été demandés d'évaluer leurs conditions thermiques ainsi que de dire s'ils étaient satisfaits ou non de leurs conditions thermiques. TEP était calculée en fonction des paramètres climatiques mesurés, à savoir, température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et température moyenne radiante. Les valeurs obtenues sont par la suite comparées aux pourcentages des usagers insatisfaits (figure 5.28). La marge de satisfaction de la zone neutre a été délimitée à 88%. Cette dernière correspond à la plage de 20°C à 27°C . Pareillement, l'intervalle de la sensation « légèrement chaud », « chaud » et « très chaud » et « extrêmement chaud » sont obtenus par une augmentation de 7°C à partir de l'intervalle « neutre ». Le tableau suivant montre les limites des intervalles obtenus du TEP (tableau 5.8).

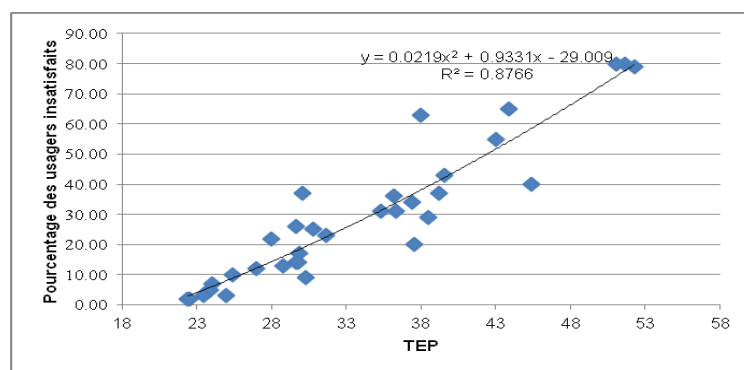


Figure 5.28 : Intervalles de confort de l'indice empirique TEP

Tableau 5.9 : Interprétation des intervalles de l'indice du confort TEP

TEP en °C	Interprétation
20-27	Neutre
27-34	Légèrement chaud
34-41	Chaud
41-48	Très chaud
>48	Extrêmement chaud

6. Conclusion :

L'échantillon de l'étude est déterminé en fonction de l'étude transversale. Il présente un bon équilibre entre l'âge (entre 18 et 60 ans) et le sexe (57,3% des hommes et 42,7% des femmes). Le nombre le plus important de répondants était âgé de 19 à 34 ans.

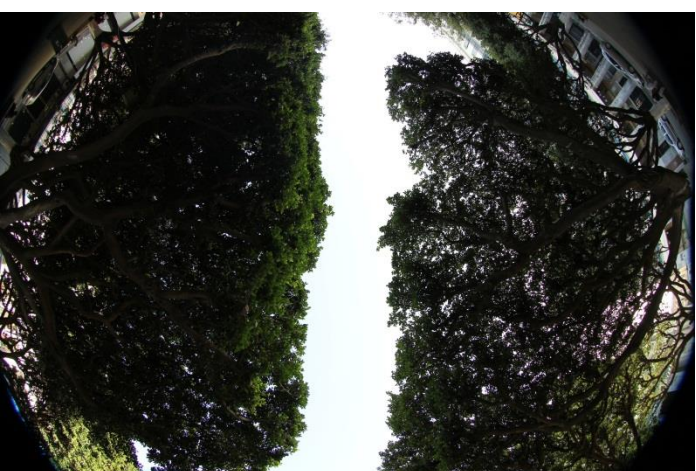
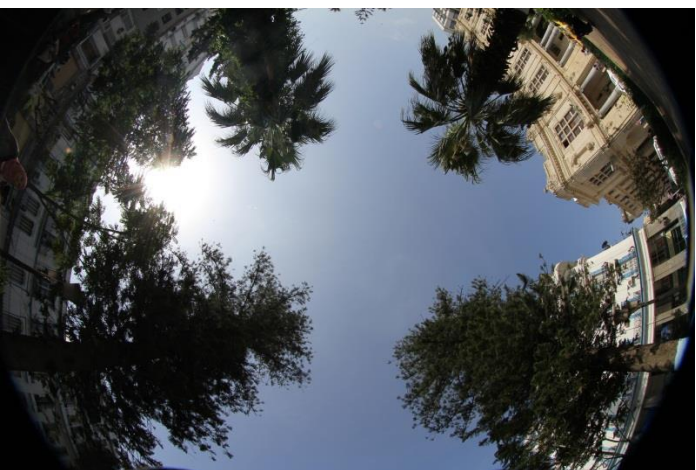
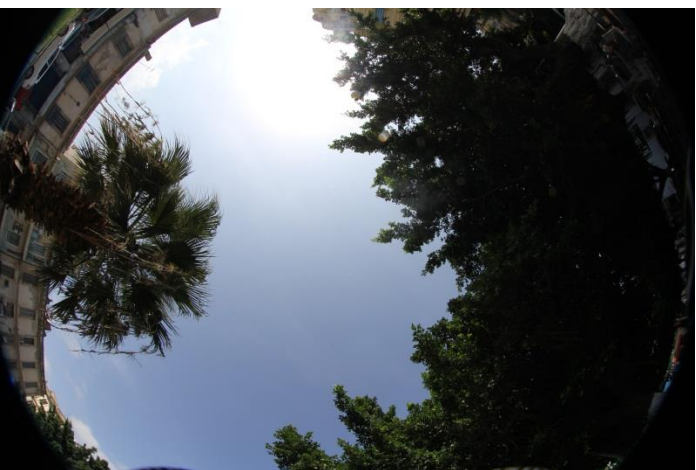
La température ambiante mesurée au cours de l'enquête variait de 19,35 à 36,20 ° C, l'humidité relative variait de 21 à 68,20%, la vitesse du vent variait de 0,09 à 3,49 m et la température moyenne radiante T_{mrt} de 19,23 à 58,92 ° C.

Le nombre inférieur des usagers est repéré dans le jardin des frênes, malgré que la majorité des individus rencontrés dans ce site ait exprimé leur satisfaction des conditions thermiques. Par conséquent, bien que le confort influence le degré d'usage des espaces extérieurs, il ne présente pas le seul paramètre déterminant. L'âge et le sexe jouent un très grand rôle sur l'appréciation du confort. Les femmes ont été trouvées plus tolérantes aux conditions thermiques ainsi que le groupe d'âge jeune (35ans à 54ans).

La projection des zones ombrées permet d'améliorer la qualité des espaces extérieurs et d'augmenter le nombre des usagers.

Grâce aux différents tests statistiques, le modèle obtenu peut être employé pour prédire le niveau du confort extérieur estival dans la ville Annaba.

Les diagrammes partiels montrent que la température moyenne radiante influence significativement la sensation du confort thermique. Ce qui confirme que dans un temps calme les échanges radiatifs présentent le facteur le plus déterminant dans l'évaluation du confort thermique.



CHAPITRE VI

Impact des indicateurs
morpho-climatiques
sur le microclimat

6.1.Introduction

L'objectif de notre étude est en premier lieu la recherche de liens supposés entre morphologie urbaine et confort extérieur en mettant l'accent sur les échanges radiatifs. Ainsi, la méthode générale que nous avons choisie est de comparer les caractéristiques d'une série de différents individus géographiques (indicateurs morpho-climatiques) à l'aide d'une méthode statistique (en l'occurrence la régression linéaire) qui nous permettra d'évaluer l'intensité des liens sur lesquels se base notre recherche.

Une analyse des conditions climatiques est obtenue à travers des parcours effectués, à travers les différents échantillons, en fonction de leur évolution au cours d'une journée type d'été (1^{er} juillet). Les paramètres mesurés sont : La température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent.

La modélisation des données a été effectuée à travers la régression linéaire et non linéaire afin de tester le pouvoir prédictif de chaque variable morphologique employé dans cette étude.

6.2.Les parcours urbains :

Cette partie concerne l'analyse de la variation des paramètres climatiques dans une dynamique de parcours. Plusieurs recherches traitant le confort thermique extérieur ont utilisé cette approche (Ait-Ameur, 2002 ; Vinet, 2000, Louafi,2010). D'après Vinet (2000), le déplacement dans l'espace urbain permet de mettre en avant les différences de situations de confort présentes dans un même lieu. En situation de déplacement, la dimension dynamique du confort peut être appréciée et des analyses du confort adaptatif peuvent se justifier.

Ait-Ameur a effectué un parcours dans la ville de Blagnac afin de déceler les variations microclimatiques (principalement la température et la vitesse de l'air) entre les différents échantillons urbains analysés. Une comparaison entre les valeurs climatiques recueillies à travers les différents points de mesure et les valeurs équivalentes recueillies dans le même intervalle de temps à la station météo. Un coefficient de recalage était calculé afin de rapprocher les deux valeurs relevées, il présente le rapport entre les valeurs mesurées et celles relevées de la station météorologique.

Nagara et al. (1996) a effectué des mesures sur terrain (température, humidité et vitesse du vent) et des interviews le long d'un parcours urbains (composé de sept points). Ce parcours présente une variété entre les espaces fermés (sous-sol) et les espaces ouverts. D'après les résultats la sensation thermique des piétons est beaucoup plus influencée par le passé thermique. La sensation d'inconfort était beaucoup plus liée aux intersections.

6.3.Paramètres météorologiques mesurés:

Les conditions thermiques extérieures varient considérablement en termes de T_a , T_g , RH, V_v et T_{mrt} . Les conditions météorologiques variaient d'un jour à l'autre jour pendant la période de mesures et parfois le changement se passe au cours des mesures. Pour diminuer ces variations tous les parcours ont été effectués pendant la journée météo type du 01 juillet 2014. Le choix des points de mesure est effectué en fonction de la variation microclimatique observées dans chaque site. Les prises de mesures ont concerné la température de l'air,

l'humidité relative et la vitesse du vent. La température du globe était calculée en fonction de l'algorithme suivant :

$$T_g = \frac{B + CT_a + 7680000}{C + 256000} \quad (\text{eq.5.1})$$

Ou T_g est la température du globe, T_a est la température de l'air. Le calcul de B et C est expliqué dans l'annexe 02.

6.4. **Problèmes rencontrés :**

Lors du déroulement des mesures plusieurs problèmes ont été confrontés. Certains sont attribués aux conditions météorologiques fluctuantes des espaces extérieurs et d'autres sont dus aux grand flux mécanique et piéton dans les sites qui se trouvent au centre-ville. La disponibilité des appareils de mesure vu le nombre des sites ainsi que la mobilisation d'un grand nombre d'étudiants afin d'assurer les mesures dans la même journée.

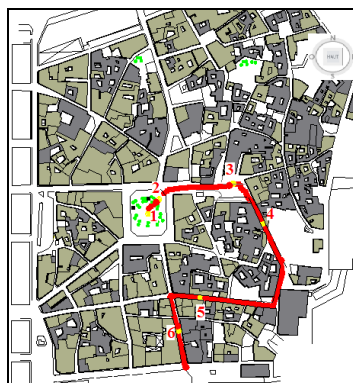
6.5. **Choix des parcours :**

Nous avons essayé de diversifier les sites de façon d'obtenir le maximum de variations climatiques en fonction des différences typologiques qui les caractérisent. Chaque site était choisi pour son caractère urbain propre (composition et morphologie), et chaque point pour la représentativité d'une caractéristique individualisée de l'espace. Les sites ont été délimités en fonction de l'homogénéité morphologique.

Le chapitre précédent (chapitre IV) a exposé le déroulement des campagnes de collecte des données climatiques et morphologiques. Au départ une moyenne des données climatiques enregistrées pendant notre parcours à travers les différents points a été calculée pour chaque site. Les écarts entre ces moyennes et les données recueillies de la station météorologique d'Annaba (les salines) ont été calculés par la suite. Ces écarts nous ont servi à faire le croisement entre les indicateurs morphologiques et les paramètres météorologiques.

6.6. **Présentation des parcours :**

6.6.1. **Présentation des parcours dans la vieille ville :**



6.1 : Présentation du parcours à la vieille ville

Le parcours choisi pour la vieille ville (figure 6.1) prend son départ de la place 19 mai 56, traversant la rue de frères Boucherit, passant par la rue El Fida, La rue Française , La place de l’hotel Mondial, la rue Rabah khan, pour finir au parking à coté de la maison de l’agriculture.

6.6.2. Présentation des parcours dans le centre ville :

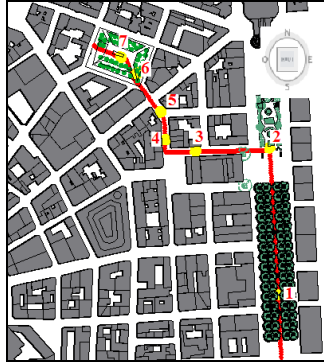


Figure 6.2 : Présentation du parcours au Centre ville.

Le parcours choisi pour le centre ville (figure 6.2) démarre du cours de la révolution, passant par la rue Tarek Ibn Ziad, traversant la rue Khemisti Mohamed, pour finir à la place George Ishak.

6.6.3. Présentation des parcours à Champs de mars :



Figure 6.3 : Présentation du parcours au Champs de Mars.

Le parcours choisi au Champs de mars (figure 6.3) prend son départ de la rue Attia Ahmed, traversant la place FLN, puis passant par la rue Hassi Beïda, La rue Chabbi Sallah pour finir à la place Nouri Hacene.

6.6.4. Présentation des parcours dans la Menadia :



Figure 6.4 : Présentation du parcours au Menadia.

Le parcours choisi pour la Menadia (figure 6.4) démarre de la place du marché, passant par l'immeuble Sigma, le jardin des frênes, le boulevard de libération pour finir au boulevard Mustapha Ben Boulaïd.

6.6.5. Présentation des parcours dans la Cité 8 mai 45 :



Figure 6.5 : Présentation du parcours à la cité du 8 mai 45.

Le parcours choisi à la cité 8 mai 45 (figure 6.5) prend son départ d'un îlot en forme de L, traversant le jardin du 8 mai 45, passant par trois îlots : le premier avec des formes en barres, et deux autres en forme de « U » pour finir au boulevard d'Afrique .

6.6.6. Présentation des parcours à Sidi Achour :

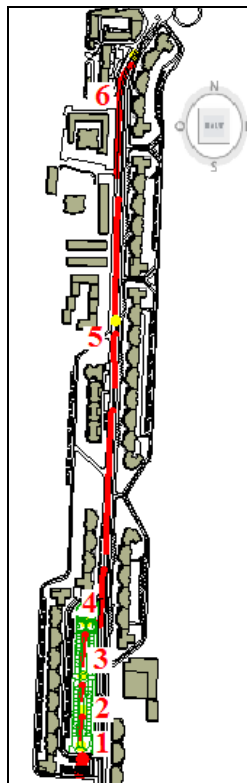


Figure 6.6 : Présentation du parcours à Sidi Achour.

Le parcours choisi à Sidi Achour (figure 6.6) prend son départ de la place publique, traversant le Boulevard de Sidi Achour pour finir au Rond point les Hongrois vers la rue Belaïd Belkacem .

6.7. Resultats des campagnes de mesure le long des parcours :

6.7.1. Interprétation du parcours de la vieille ville :

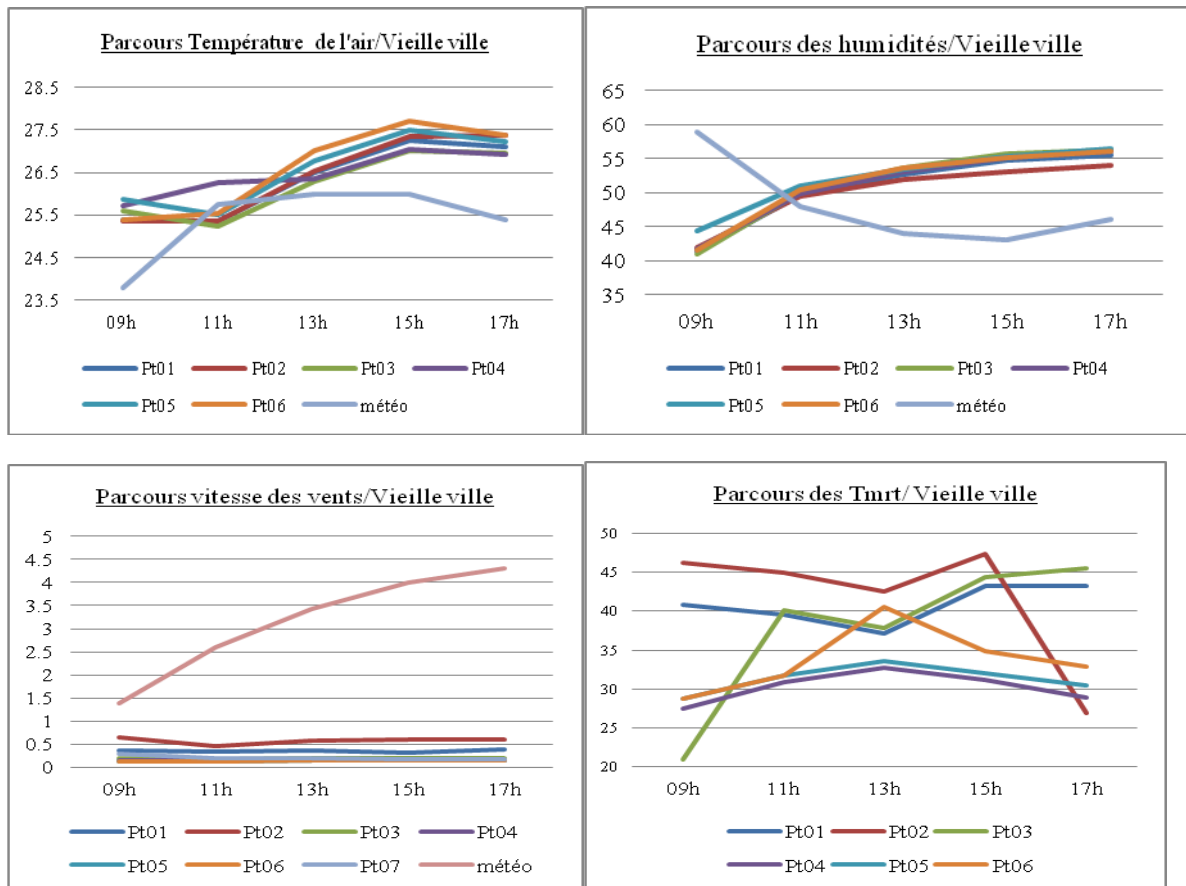


Figure 6.7 : Parcours des températures de l’air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantés à la vieille ville.

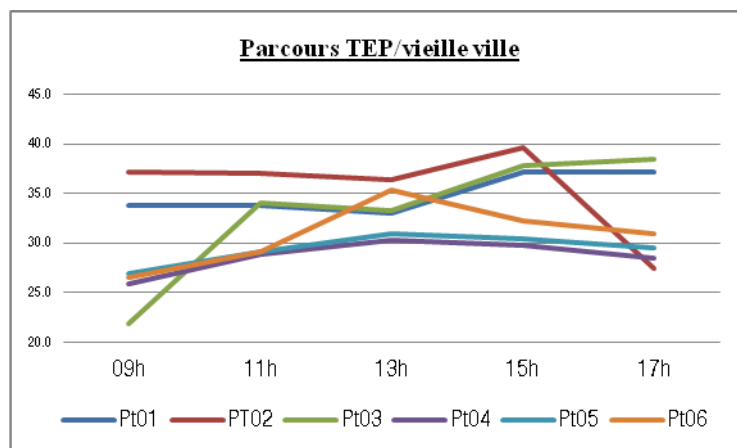


Figure 6.8 : Température equivalente prévisible calculée (la vieille ville).

Le choix des points est dicté par leurs expositions au soleil : Les points 1, 2 et 3 se trouvent dans des zones plus au moins ouvertes. La durée d'ensoleillement est proche de 10 heures. Les trois autres points se trouvent dans des canyons d'orientation et de pente variables. Les valeurs relevées de température et de l'humidité relative sont peu variables (figure 6.7). L'écart entre les températures de l'air et celle de la station météo est faible, une moyenne de 1.043°C est obtenue. Comparée aux autres sites, l'humidité relative enregistrée dans la vieille ville est la plus importante. Ces valeurs sont justifiées par le manque de ventilation et l'état dégradé des constructions. Les valeurs de TEP obtenues pendant toute la journée (figure 6.8) varient de légèrement chaud à chaud.

6.7.2. Interprétation du parcours au centre ville :

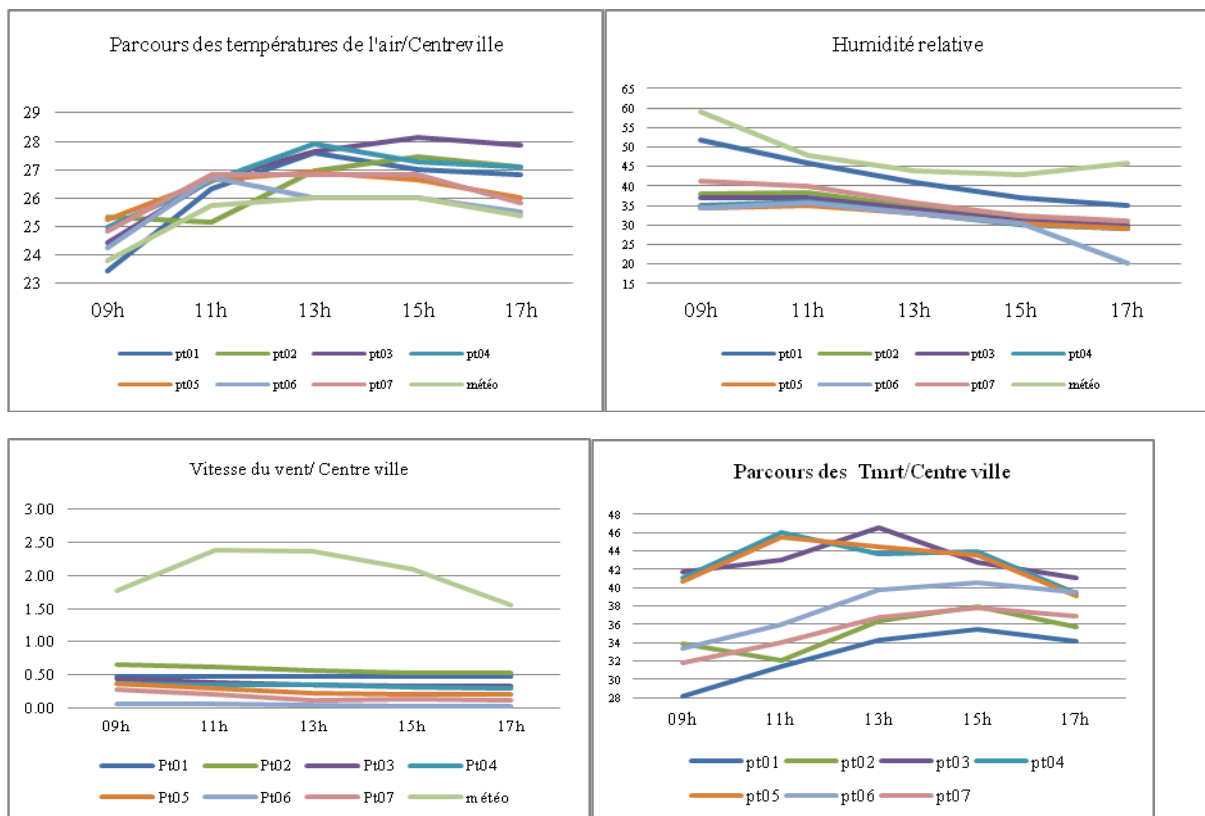


Figure 6.9 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantés au centre ville.

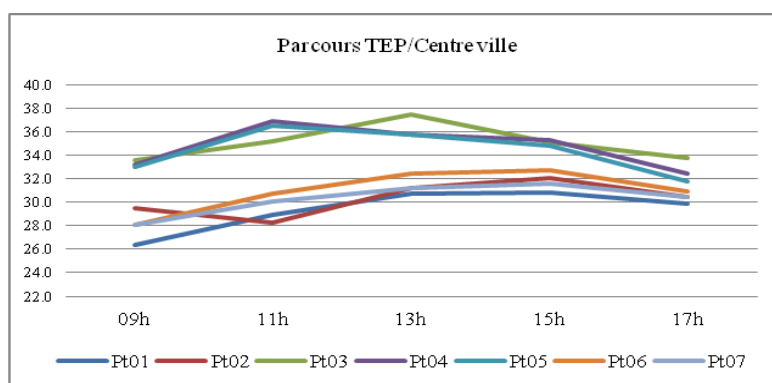


Figure 6.10 : Température équivalente prévisible (centre ville) .

Comparé aux autres sites, Le centre-ville a enregistré les écarts de températures les plus faibles par rapport aux données météo (figure 6.9).

Cet écart varie d'un point à un autre. Les points les plus frais sont ceux qui se trouvent au niveau du cours de la révolution et la place George Ishak grâce à l'impact de la végétation sur l'obstruction du rayonnement solaire (Il atteint son maximum le matin et le soir et son minimum à midi). On a enregistré un écart de 1.62°C à 13h pour le point 01, 1 et 1.11 à 11h pour les points 7 et 8 respectivement. A côté de l'effet de la végétation, notre parcours au centre-ville a révélé l'impact de l'orientation et le rapport d'aspect H/L des canyons urbains : Les canyons orientés perpendiculairement à la mer sont les plus larges, ils ont l'avantage de profiter des brises de mer et compenser l'exposition au rayonnement à cause du rapport d'aspect important. Les canyons qui sont parallèle à la rue, orientés N/S, sont les plus étroits, ils génèrent une ambiance assez agréable grâce à l'ombre des bâtiments.

Les écarts d'humidité les plus faibles sont enregistrés au niveau du point 05 grâce à la ventilation (brise de mer). En ce qui concerne la vitesse du vent un effet d'atténuation à cause de la végétation est enregistré pour les points 3,7 et 8. Cet effet s'affaiblit pour les points qui sont exposés aux couloirs de ventilation générés suite à un effet de canalisation (disposition des bâtiments).

Les résultats de TEP obtenus traduisent l'effet de la végétation, on enregistre les valeurs 26.4°C, 28.3°C et 28,1°C pour les points pt1, pt7 et pt8 respectivement à 09h.

Ces valeurs correspondent à une sensation qui varie entre confortable et légèrement chaud.

Les études sur les canyons urbains (Ali - Toudert et Mayer, 2006 ; Johansson , 2006b) ont montré qu'en général les rues N -S ont tendance à être plus confortable que les rues E - O . En effet, la rue orientée N- S (pt5 et pt 6) est exposée au rayonnement solaire pendant une période plus courte que la rue E-O (pt4) et assure les conditions de confort les plus agréables dans ce tissu.

6.7.2.1. **Interprétation du parcours dans Champs de Mars :**

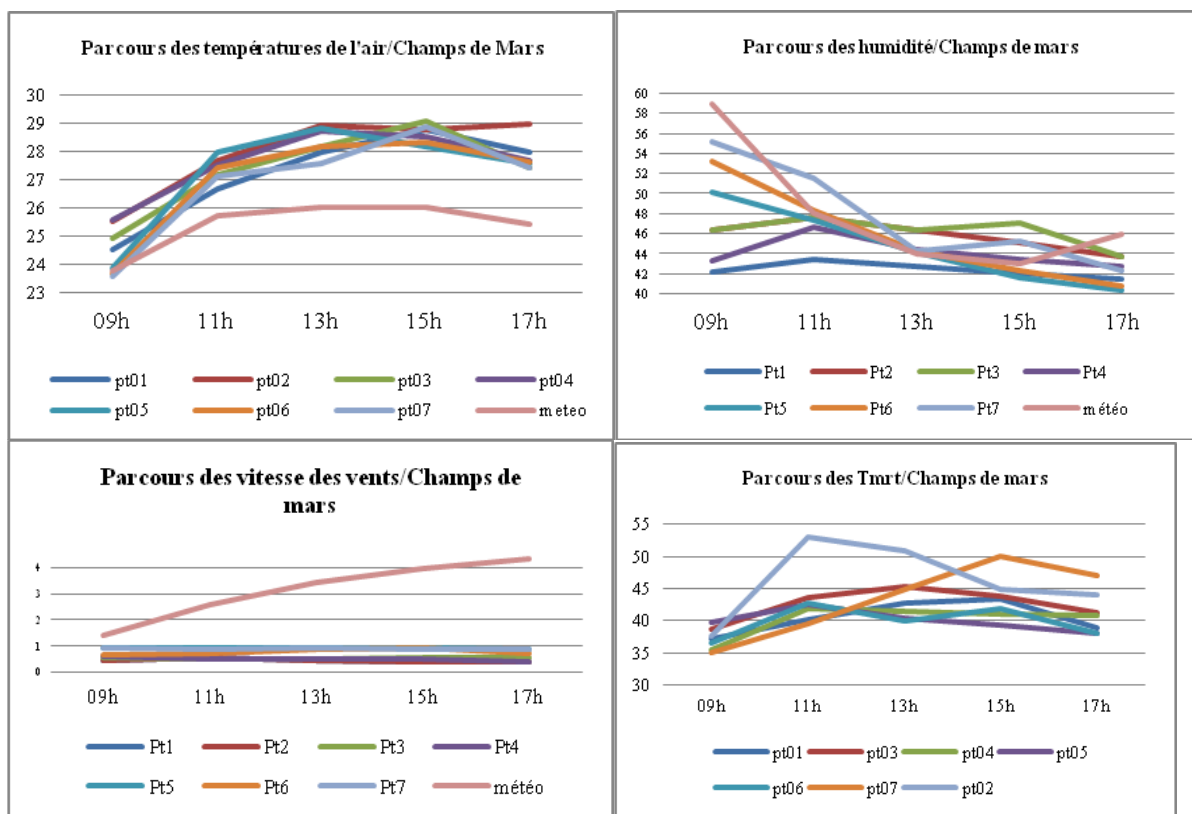


Figure 6.11 : Parcours des températures de l’air, Humidité relative, vitesse des vents et températures moyennes radiantes (Champs de mars).

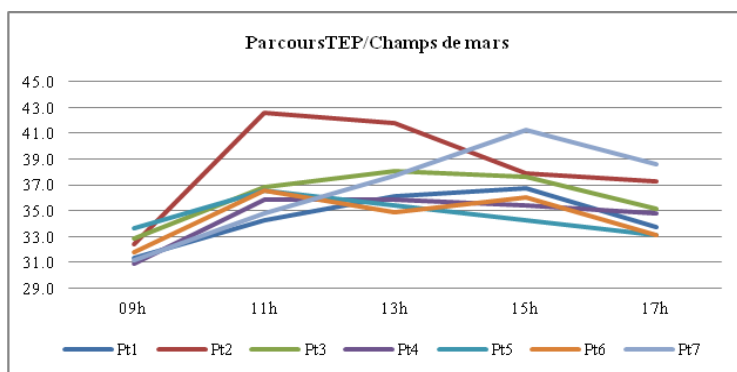


Figure 6.12 : Température équivalente prévisible (Champs de mars).

Les écarts de température de l’air entre le site Champs Mars et la station météo varient en fonction de l’emplacement des points de mesures (figure 6.11). Au niveau de pt1 on a enregistré des écarts qui varient de 0.73 en début de journée jusqu’à 2.56°C en fin de journée. Ces écarts sont inférieurs à ceux enregistrés au niveau des points pt2 et pt3.

En effet, pt1 bénéficie d’une orientation NE/SO (exposé au brise de mer) et d’un rapport d’aspect de H/W=2. La température moyenne radiante varie de 37.14 à 43.5°C à cause de l’effet d’ombre. L’indice du confort TEP évalué (figure 6.12) varie de 31.3°C à 33.7°C.

L'importance des écarts de température obtenus pour les points 2,3 et 7, est liée à l'exposition de ces derniers au rayonnement solaire.

Les écarts de température pour les points 5 et 6 varient de 0.1 à 2.84 et -0.11 et 2.33 respectivement et présentent les écarts les plus faibles pendant notre parcours.

Ces deux points bénéficient de l'ombre pendant presque toute la journée, ainsi la chaleur du soleil est tempérée grâce au brise d'air créé par les zones ombrées. L'orientation SE/NO et le rapport d'aspect est de l'ordre de 02.

Les meilleurs résultats du TEP sont obtenus pour les points 5 et 6 avec les valeurs qui varient de 31.1°C à 31.8°C.

L'humidité relative, enregistrée le long de notre parcours, est supérieure à celle de la station météorologique. Les écarts sont variables. Ils atteints leur valeur minimale au niveau des points 02 et 03 à cause de la végétation.

Les vitesses du vent enregistrées sont faibles. Ces résultats sont expliqués par l'effet d'amortissement causé par les bâtiments.

6.7.3. Interprétation du parcours dans la Menadia :

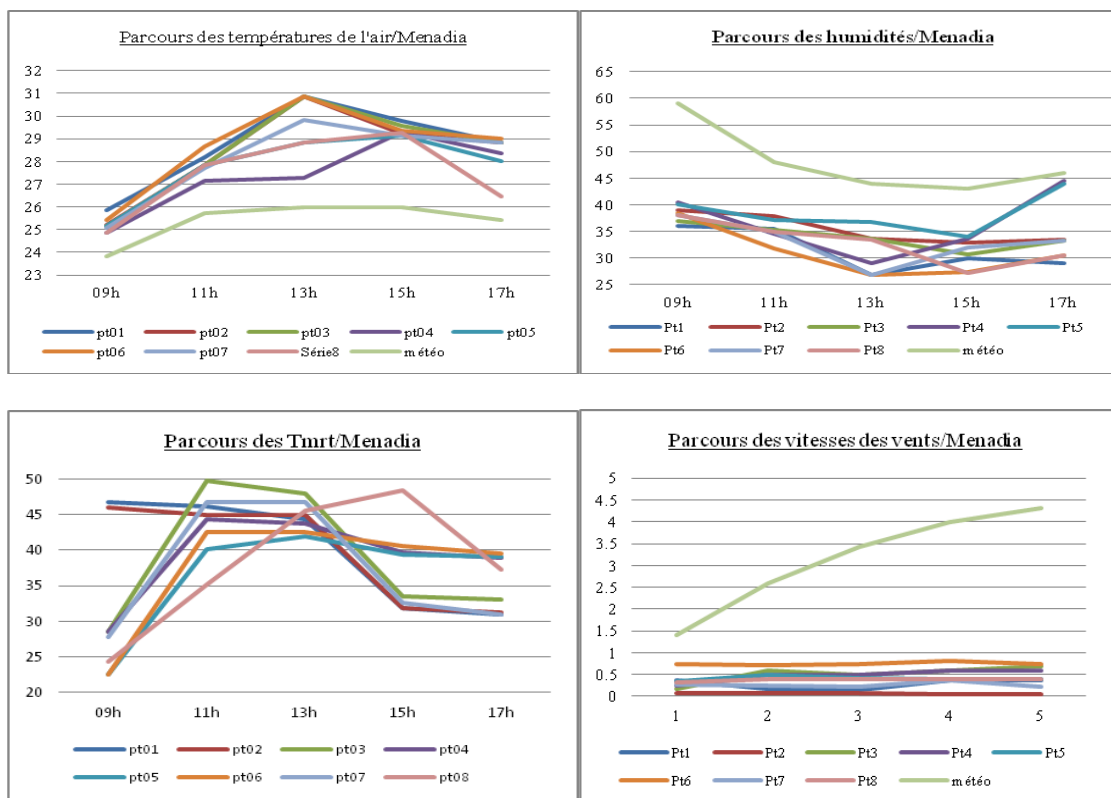


Figure 6.13 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantés (Ménadia)

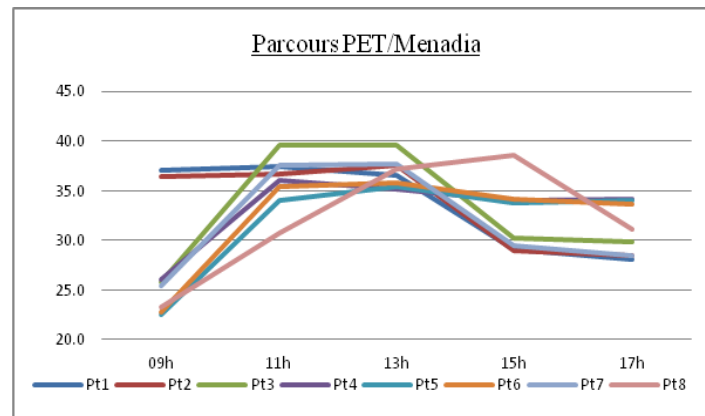


Figure 6.14 : Température equivalente prévisible (Menadia).

Notre parcours au Menadia a fait ressortir l'impact de la pente et son orientation ainsi que la disposition et la hauteur des bâtiments. Le tracé du Menadia est caractérisé par un axe principal : La rue de libération, orientée SO/NE. Un axe secondaire perpendiculaire à la voie principale orienté SE/NO, d'une pente de 12,5%. Etant proche de la mer ces deux axes jouaient d'une bonne ventilation grâce aux brises de mer. La porosité des îlots a contribué à l'augmentation de la ventilation et le renouvellement de l'air. Elle est toujours associée à un rafraîchissement thermique dû aux pertes de chaleur par convection. Les températures les plus élevées sont relevées au niveau du point pt1, qui se trouve dans la place du marché ; espace découvert et exposé au soleil pendant une longue période de la journée. Le point pt3 subit l'action combiné de la brise de pente et l'ombre projetée des deux bâtiments. Les points pt2, pt4 et pt5 reflètent l'influence de la végétation. Seulement, les valeurs obtenues de TEP sont plus agréables pour les pt4 et pt5 grâce à la densité des arbres et celles obtenues au niveau de pt4 sont meilleures que pt5 suite à l'effet du passage sous le bâtiment sur l'écoulement de l'air, où on a remarqué une certaine fraîcheur à cause de la convection. Le même phénomène se produit au niveau du pt6 mais cette fois la vitesse est plus importante à cause l'effet de la brise de mer. Le point pt8 est soumis à l'effet d'ombre du bâtiment orienté NO en plus aux décrochements qui se trouve au niveau de la façade presque toute la journée.

6.7.4. Interprétation du parcours dans la Cité 08 Mai 45 :

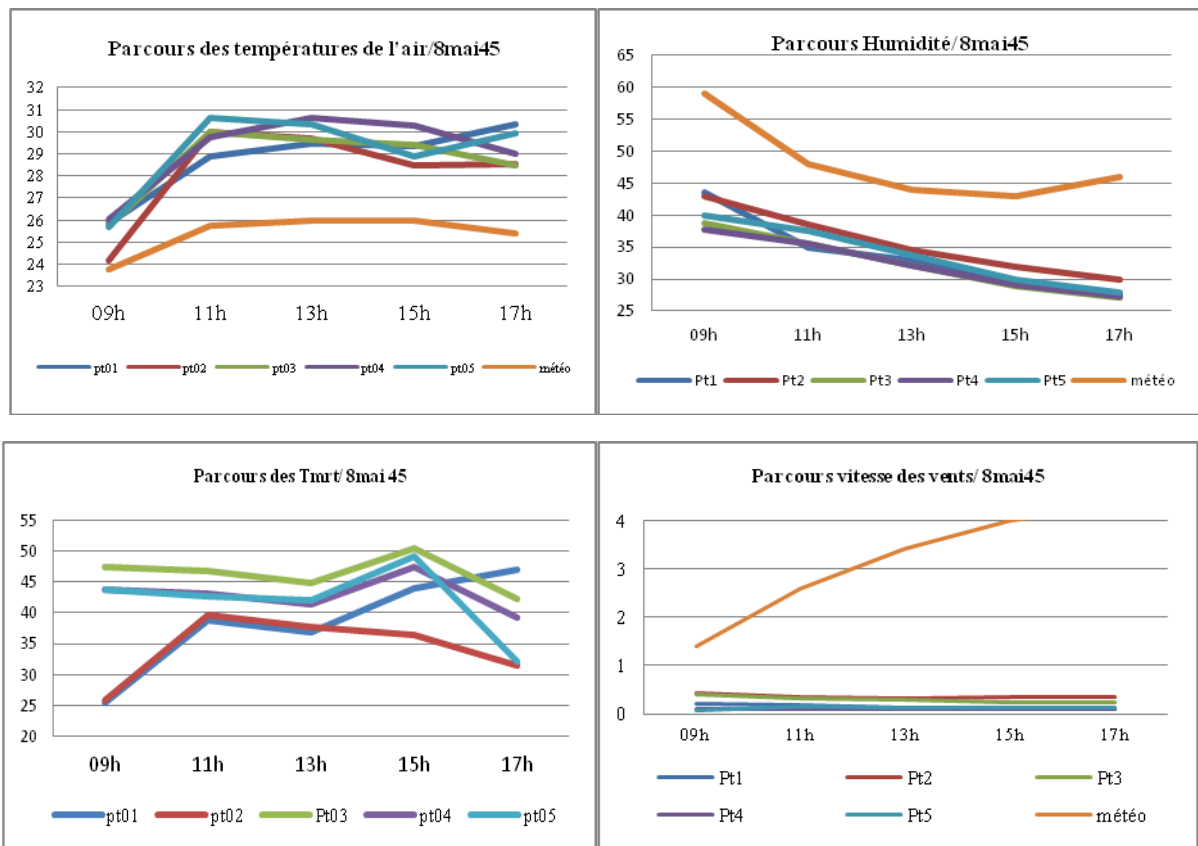


Figure 6.15 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (8Mai 45).

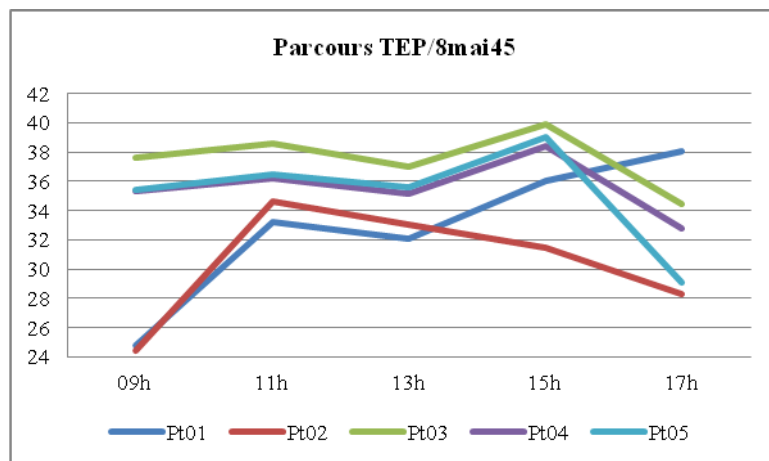


Figure 6.16 :Température equivalente prévisible (8mai 45).

Les valeurs des températures obtenues à la cité 08mai 45 sont considérablement importantes comparés à la station météo. L'écart le plus important est obtenu à 17h au niveau du point 01 (orientation Ouest de l'îlot).

Les valeurs de l'humidité enregistrées sont plus importantes que celles enregistrées à la station météo les valeurs les plus importantes sont enregistrées au niveau du point pt2 qui se trouve dans le jardin, suivi par le dernier point de notre parcours pt5. Les vitesses du vent sont

très faibles comparée à la station météo à cause l'effet de ralentissement causé par les bâtiments et la végétation.

Les valeurs calculées de la Tmrt sont variables, les valeurs les plus faible sont obtenues pour le point pt2, et le point pt1 pendant le matin. Le point pt3 enregistre les valeurs les plus importantes à cause de l'impact du revêtement (asphalte) et l'ouverture au ciel SVF (0.54) qui ont favorisé l'interception et le stockage du rayonnement solaire.

Ces résultats sont semblables à ceux du TEP. Les valeurs obtenues à 15h00 pour les 05 points sont respectivement : 36°C, 31°C, 39.9°C, 39°C et 38.4°C.

Généralement on peut dire que la morphologie des îlots caractérisée par la multiplication du nombre de façades a engendré l'augmentation du piégeage radiatif et donc l'énergie thermique absorbée en fonction de la nature des matériaux de revêtement.

6.7.5. Interprétation des parcours dans la Cité Sidi Achour :

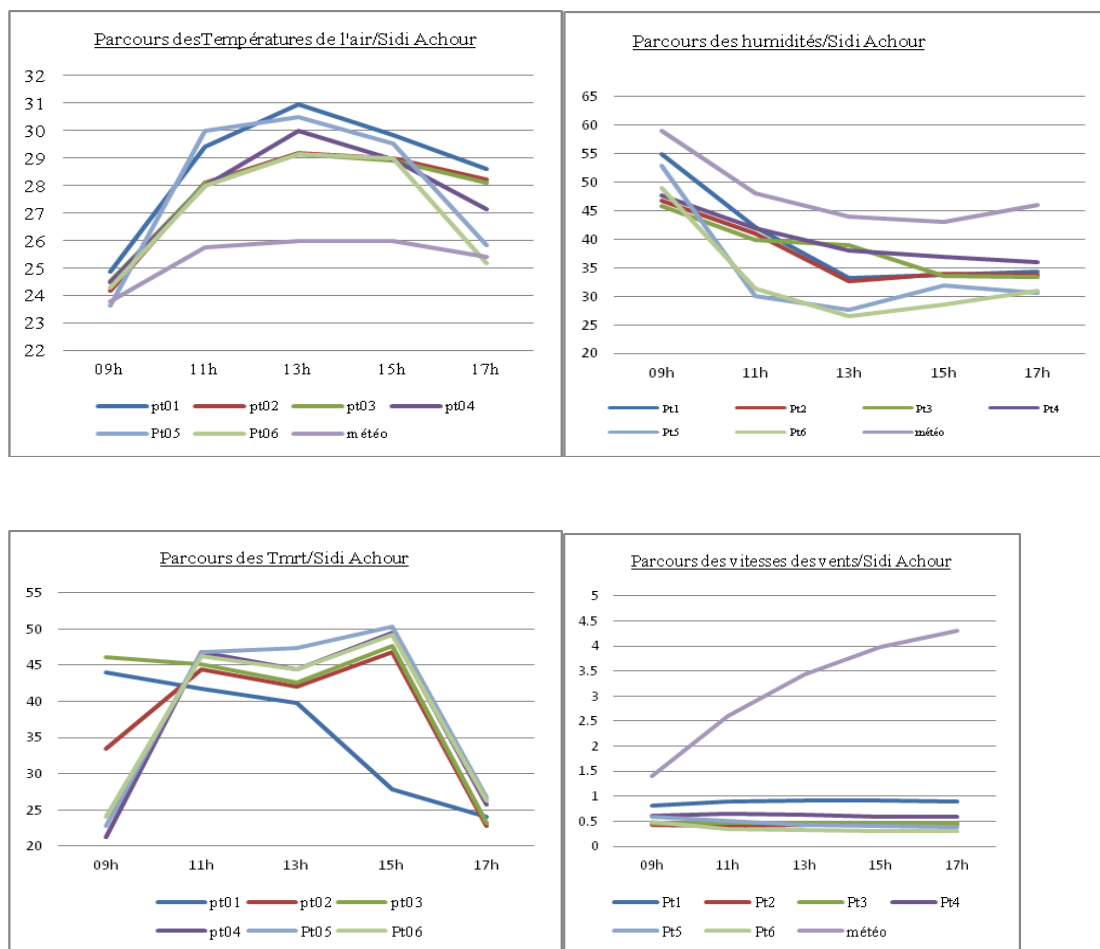


Figure 6.17 : Parcours des températures de l'air, Humidités relatives, vitesses des vents et températures moyennes radiantes (Sidi Achour).

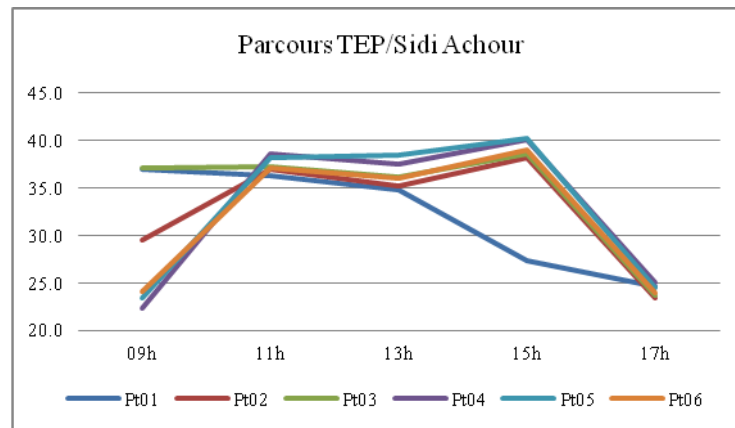


Figure 6.18 : Température effective équivalente prévisible

La moyenne des écarts de température à Sidi Achour (figure 6.17) est de 2.31°C. L'écart le plus important est enregistré à 13h pour le point pt01. Ce même point a enregistré les vitesses du vent les plus importantes ce qui explique un effet de convection, qui a contribué à l'augmentation de la température de l'air.

Ces écarts sont expliqués par l'effet de multi-réflexion des façades. La disposition des constructions a induit un effet de canalisation du vent (effet laminaire), vitesse du vent est uniforme pour tous les points (à l'exception du point 01). Les résultats obtenus des humidités montrent que Sidi Achour est encore plus humide que la station météo.

Les valeurs obtenues du TEP (figure 6.16) reflètent une sensation légèrement chaude au début de journée puis chaude pendant les autres heures de la journée.

6.8. Croisement des indicateurs morphologiques avec les paramètres climatiques mesurés :

6.8.1. Choix de la méthode statistique d'analyse :

L'objectif de cette partie est de vérifier si les valeurs obtenues des paramètres climatiques : T_a , HR, V_v et l'indice du confort TEP dépendent des valeurs des indicateurs morphologiques, et que si la connaissance de ces valeurs permet de prédire le niveau du confort dans ces espaces.

Après avoir sélectionné les indicateurs de la morphologie urbaine (variables explicatives), les indicateurs du confort (variables à expliquer) et que nous avons également déterminé les individus géographiques (les sites) que nous allons comparer (l'échelle d'agrégation de ces indicateurs), la phase suivante de cette recherche consiste en l'analyse de la liaison entre ces variables. Premièrement on a choisi une méthode statistique fiable qui nous permettra d'estimer les relations mathématiques qui existent entre les indicateurs de morphologie urbaine et les indicateurs du confort qui caractérisent les six sites étudiés.

Il est à noter, que le nombre minimal de sujets dans un échantillon est : $5k$ où k est le nombre de variables prédictives. Selon Wenning, en réponse à la question initiale de nombre de données nécessaires, une règle simple et rapide serait de recueillir 6 points de données au minimum. Ainsi le nombre de sites nous permet de tester la régression linéaire simple.

6.8.2. Modélisation des données :

Soient X et Y deux grandeurs statistiques quantitatives observées. X présente les valeurs des indicateurs morphologiques calculées pour les différents sites de l'étude (densité surfacique, densité volumique, porosité, CUT, CF, rugosité et l'indice de végétation). Y présente la différence entre les paramètres climatiques mesurés sur sites (la température et l'humidité relative de l'air et le vent) et les valeurs collectées à l'échelle de la station météo ainsi que l'indice du confort empirique TEP. Notre objectif est d'évaluer l'influence de la variable indépendante X sur la variable dépendante Y . On a procédé par l'analyse de liaison entre X et Y comme suit :

- Analyse graphique (Diagramme nuage de points)
- Test de corrélation entre X et Y (Calcul de coefficient de corrélation de Pearson et Steamers).
- Caractériser la forme de la liaison (la relation) entre X et Y (positive ou négative, linéaire ou non linéaire, monotone ou non monotone).
- Tester si la liaison est statistiquement significative.
- Quantifier l'intensité de la liaison.
- Vérifier la significativité de la relation
- Obtention des modèles.

6.8.3. Analyse graphique

Pour vérifier l'existence de cette relation des diagrammes de nuage de points croisant les modalités x et y sont établis avec XLSTAT. Nous plaçons en abscisse la variable X , en ordonnée la variable Y , chaque observation est positionnée dans le repère ainsi constitué. L'intérêt est multiple : nous pouvons situer les proximités entre les valeurs ; étudier la forme globale des points, voir notamment s'il existe une forme de liaison ou de régularité ; détecter visuellement les points qui s'écartent des autres. La forme des points permet de caractériser la relation linéaire à l'aide de trois critères : Intensité de la relation, forme de la relation et le sens de la relation.

6.8.3.1. Analyse graphique de la température de l'air :

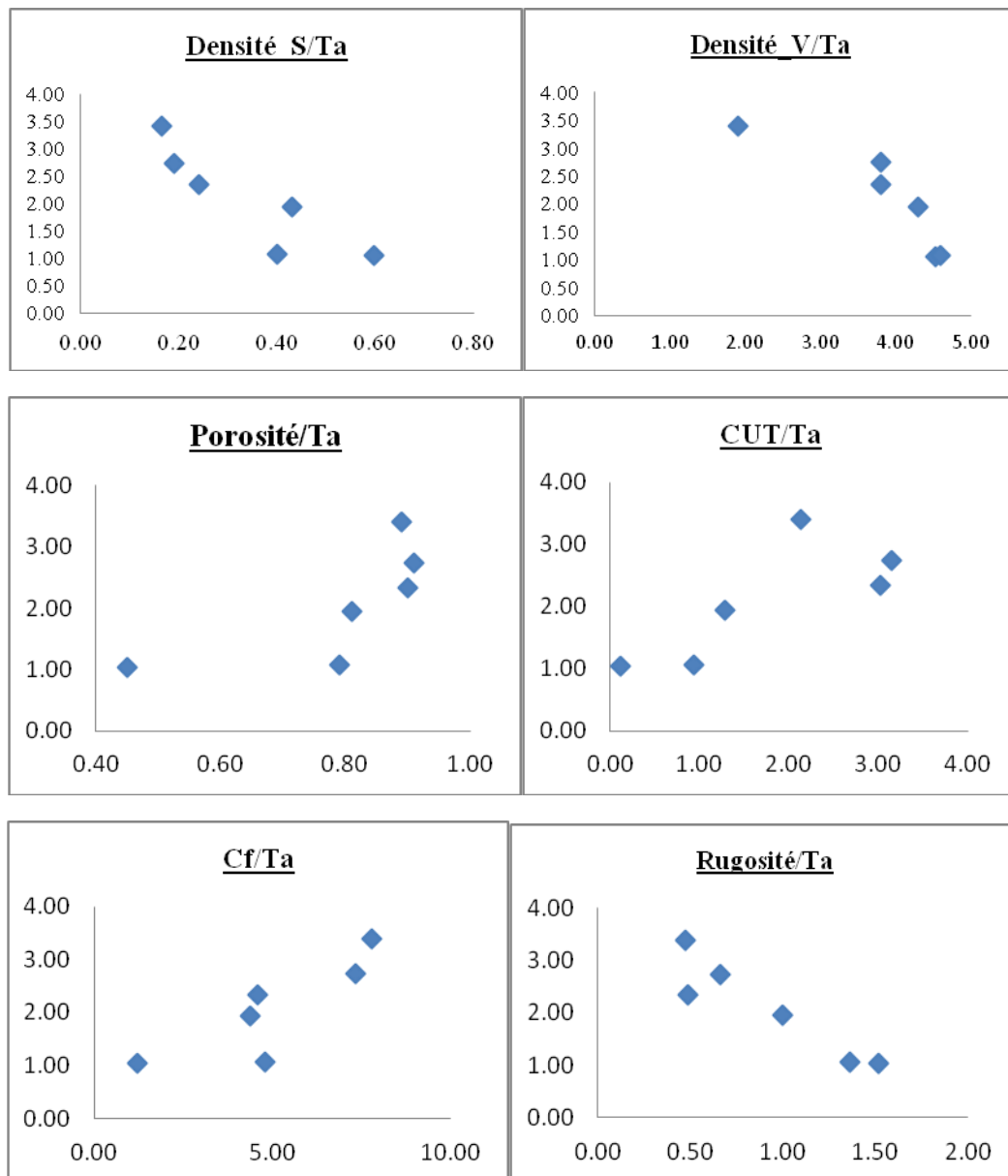


Figure 6.19 : Diagrammes nuage de points, température et les indicateurs morphologiques

D'après l'observation des diagrammes nuage de point (figure 6.19) on remarque que la liaison de la température de l'air avec la densité volumique et la densité surfacique est non linéaire, monotone et négative. La liaison entre la température de l'air et la rugosité est de type linéaire monotone et négatif. La liaison avec CUT est de type non linéaire monotone et positif. Pour les autres graphs la disposition des points montre que les valeurs de CF et de la porosité ne donnent aucune indication sur la valeur de la température de l'air.

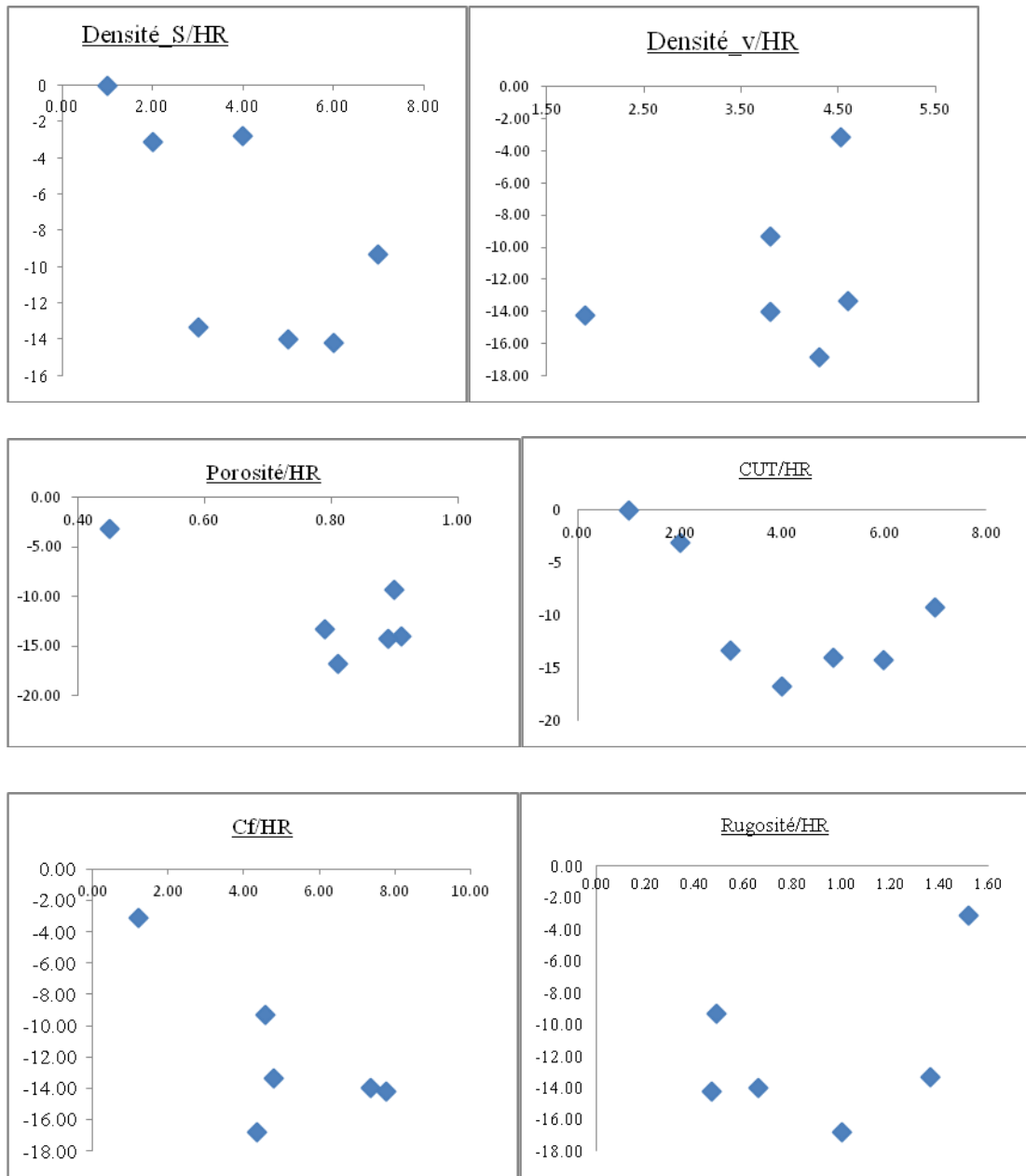
6.8.3.2. Analyse graphique de l'humidité relative de l'air :

Figure 6.20 : Diagrammes nuage de points, humidité et les indicateurs morphologiques

L'observation des diagrammes nuage de points (figure 6.20) relatifs à l'humidité relative a révélé une relation non linéaire entre ce paramètre et les deux indicateurs morphologiques CUT et rugosité.

La disposition des points dans les autres graphes montre l'absence de toute liaison entre X et Y et que les valeurs de la densité surfacique, la densité volumique, la porosité et CF ne donnent aucune indication sur la valeur de HR.

6.8.3.3. Analyse graphique de la vitesse du vent :

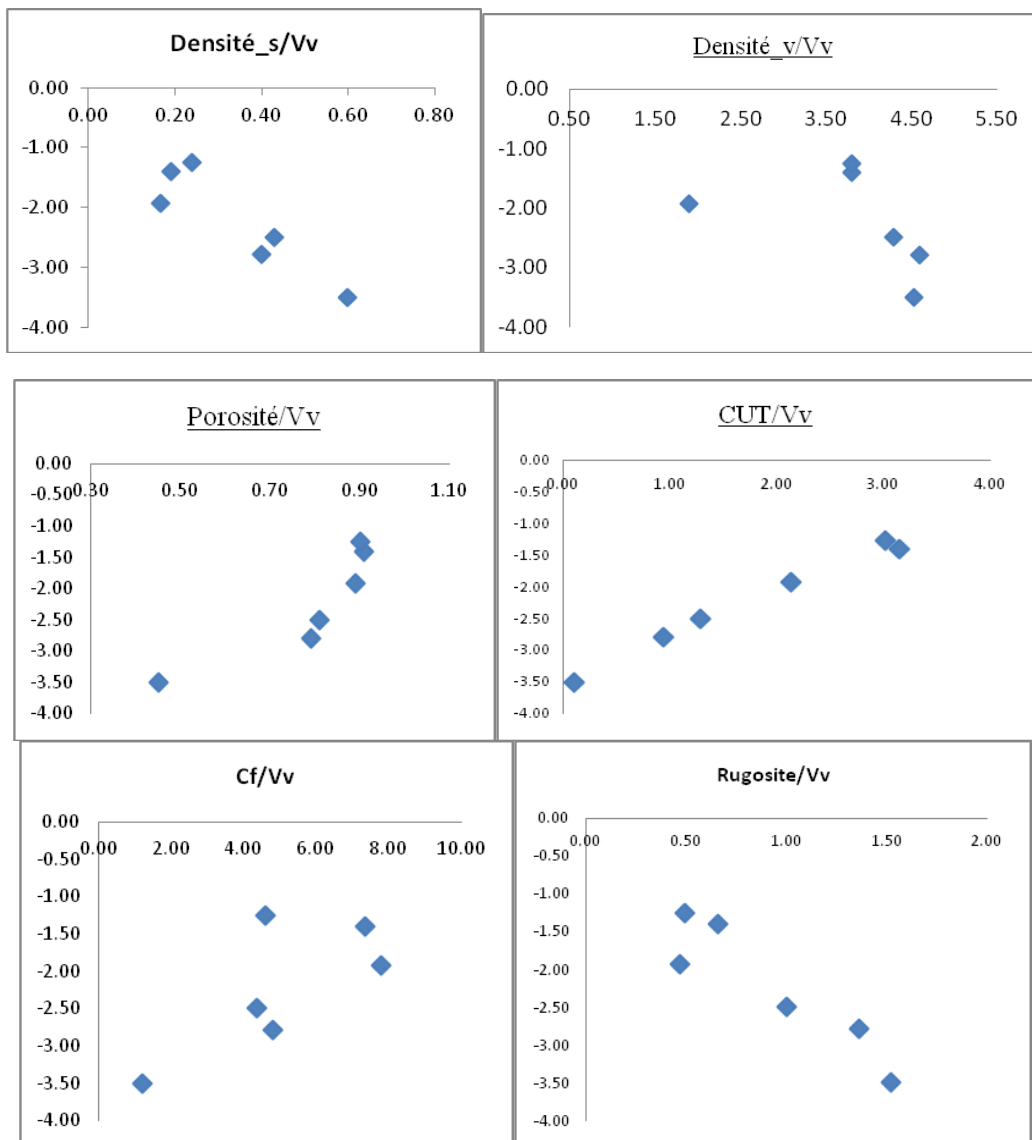


Figure 6.21 : Diagrammes nuage de points, vitesse du vent et les indicateurs morphologiques

La lecture des diagrammes nuage (6.21) de point relatifs à la vitesse du vent et les différentes variables morphologiques montre une liaison linéaire négative avec la densité surfacique et la rugosité et une liaison linéaire positive avec la CUT et Cf. une liaison non linéaire positive avec la porosité.

En ce qui concerne la densité volumique, cet indicateur ne donne aucune indication sur la vitesse du vent.

6.8.3.4. Analyse graphique de l'indice du Confort empirique « TEP »:

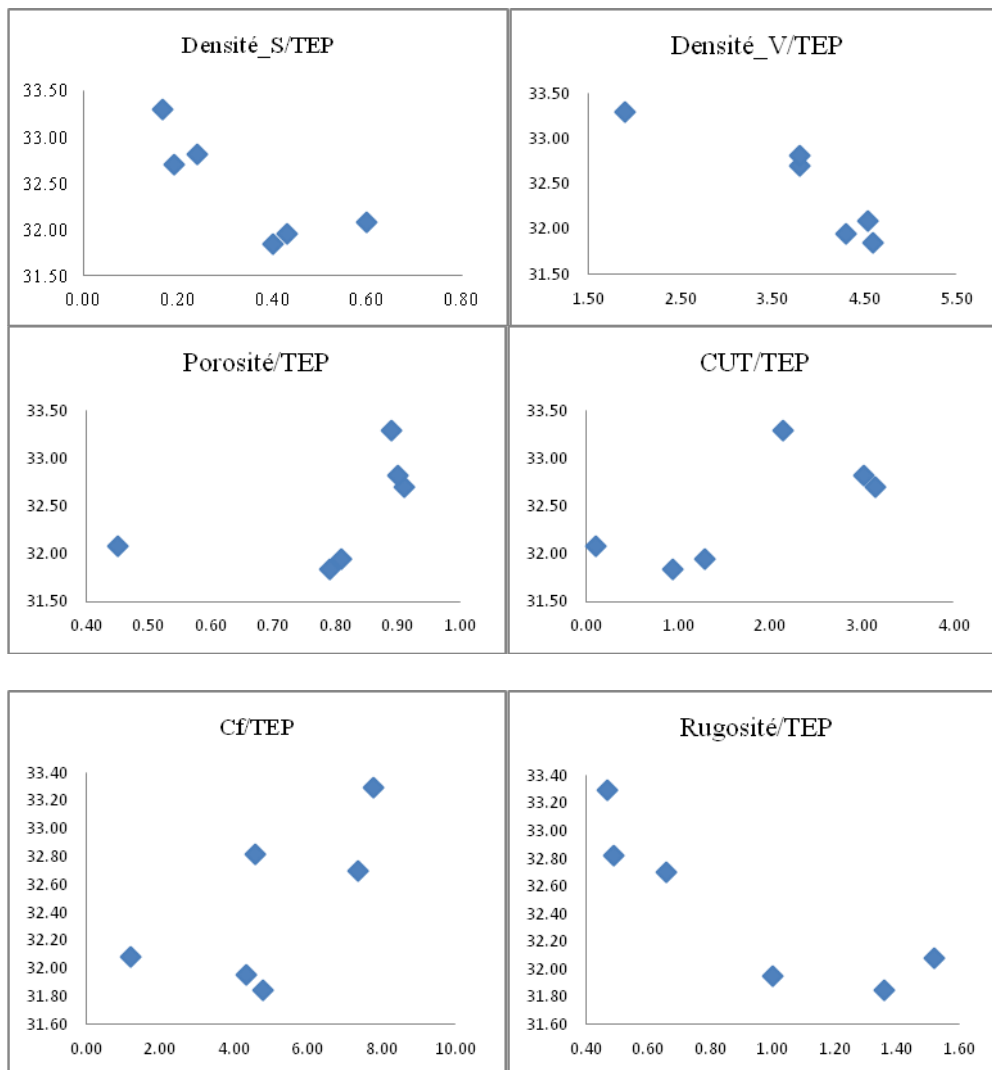


Figure 6.22 : Diagrammes nuage de points, TEP et les indicateurs morphologiques

Les diagrammes nuage de points relatif à TEP et les différentes variables morphologiques montrent une distribution plus ou moins linéaire positive entre TEP et CF, et une liaison négative entre TEP et les deux variables : la densité surfacique et la rugosité (figure 6.22). Une liaison non linéaire négative entre TEP et la densité volumique.

La distribution des points pour les diagrammes de la porosité et CUT ne donne aucune indication ce qui montre que ces deux indicateurs n'expliquent pas la variation de TEP.

6.9. Caractérisation des variables/ test de corrélation :

Les coefficients de corrélation permettent de donner une mesure synthétique de l'intensité de la relation entre X et Y et son sens. Dans notre étude deux coefficients ont été utilisés :

- a- Le coefficient de corrélation de Pearson pour analyser les relations linéaires, il mesure la dépendance linéaire entre les deux variables. C'est un test de corrélation paramétrique car

il dépend de la distribution des données. Il présente la méthode, la plus couramment utilisée pour calculer le coefficient de corrélation entre deux variables.

- si r est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre X et Y
- si r est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative entre X et Y
- si r est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive entre X et Y

Le signe de r indique donc le sens de la relation tandis que la valeur absolue de r indique l'intensité de la relation c'est-à-dire la capacité à prédire les valeurs de Y en fonction de celles de X.

Le coefficient de corrélation de Spearman pour analyser les relations non-linéaires. Ce coefficient est donc très utile lorsque l'analyse du nuage de point révèle une forme curviligne dans une relation qui semble ne pas bien s'ajuster à une droite. On notera également qu'il est préférable au coefficient de Pearson lorsque les distributions X et Y sont dissymétriques et/ou comportent des valeurs exceptionnelles. Le test de corrélation de Spearman est basé sur un test de rang (méthodes non paramétriques). Il est recommandé lorsque les données ne proviennent pas d'une distribution normale.

Ce test est effectué grâce au programme XLSTAT1. Les corrélations sont calculées dans plusieurs fonctions de XLSTAT. Dans notre recherche, nous avons utilisé l'outil : Tests de Corrélation/Association / Tests de corrélation.

6.9.1. Température de l'air :

a- Test de corrélation Pearson :

Tableau 6.1 Matrice de corrélation (Pearson) de Ta et les indicateurs morphologiques

Variables	Densité/s	Densité/v	Porosité	cut	Cf	Rugosité	Ta
Ta	-0,887	-0,885	0,699	0,772	0,841	-0,929	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$.

La matrice de corrélation de Pearson (tableau 6.1) révèle une relation négative très forte entre la température de l'air et la rugosité ($r=-0,929$) et une relation positive très forte entre la température de l'air et Cf ($r=0,841$).

b- Test de corrélation Spearman :

Tableau 6.2 Matrice de corrélation (Spearman) de Ta et les indicateurs morphologiques

Variables	Densité/s	Densité/v	Porosité	cut	cf	Rugosité	Ta
Ta	-0,943	-0,928	0,829	0,829	0,829	-0,943	1

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$.

¹XLSTAT est un logiciel dont l'interface s'appuie entièrement sur Microsoft Excel, tant pour la récupération des données que pour la restitution des résultats. Les calculs sont en revanche totalement indépendants de Microsoft Excel et ont été développés avec le langage de programmation C++.

La matrice de corrélation de Spearman (tableau 6.2) dévoile une liaison non linéaire négative très forte entre la température de l'air et les deux variables densité surfacique et densité volumique ($r=-0.943$, $r=-0.928$ respectivement).

6.9.2. Humidité relative de l'air :

a- Test de corrélation Spearman :

Tableau 6.3 Matrice de corrélation (Spearman) de HR et les indicateurs morphologiques

Variables	Densité/s	Densité/v	Porosité	cut	cf	Rugosité	RH
RH	0,371	0,377	-0,314	-0,314	-0,429	0,429	1

La matrice de corrélation de l'humidité relative avec les deux variables : Cut et la rugosité est faible $r=-0.314$ et $r=0.429$ respectivement (tableau 6.3).

6.9.3. Vitesse de l'air :

a- Test de corrélation Pearson :

Tableau 6.4 : Matrice de corrélation (Pearson) entre Vv et les indicateurs morphologiques :

Variables	Densité/s	Densité/v	Porosité	Cut	Cf	Rugosité	WS
Vv	-0,91	-0,483	0,882	0,994	0,73	-0,926	1

La matrice de corrélation de Pearson montre une liaison linéaire très forte entre la variable dépendante (vitesse de l'air) et les variables indépendantes : densité surfacique, Cut et la Rugosité, $r=-0.91$, $r=0.994$, $r=-0.926$ respectivement (tableau 6.4).

b- Test de corrélation Spearman :

Tableau 6.5 Matrice de corrélation (Spearman) entre Vv et les indicateurs morphologiques.

Variables	Densité/s	Densité/v	Porosité	Cut	Cf	Rugosité	WS
Vv	-0,714	-0,754	0,943	0,943	0,486	-0,829	1

Le coefficient de corrélation de Spearman (tableau 6.5) révèle une relation non linéaire très forte entre la vitesse du vent et la porosité ($r=0.943$).

6.9.4. Indice du confort TEP :

a- Test de corrélation Pearson :

Tableau 6.6 Matrice de corrélation (Pearson) entre TEP et les indicateurs morphologiques.

Variables	Densité/s	Densité/v	Porosité	Cut	Cf	Rugosité	TEP
TEP	-0,821	-0,901	0,536	0,71	0,672	-0,87	1

Le coefficient de corrélation de Pearson calculé pour TEP et la densité surfacique et la rugosité montre une relation linéaire négative forte entre TEP et ces deux variables, $r=-0.821$, $r=0.870$ respectivement (Tableau 6.6).

b) Test de corrélation Spearman :

Tableau 6.7 Matrice de corrélation (Spearman) entre TEP et les indicateurs morphologiques

Variabes	Densité/s	Densité/v	Porosité	Cut	Cf	Rugosité	TEP
TEP	-0,714	-0,928	0,6	0,6	0,486	-0,829	1

Le coefficient de corrélation de Spearman (tableau 6.7) nous montre une liaison négative très forte entre TEP et la densité volumique ($r=-0.928$).

6.9.5. Vérification de la significativité des relations :

En fonction des tests de corrélation nous allons tester la significativité des régressions selon le tableau suivant :

Tableau 6.8 Test de significativité des régressions

Variabes	Régression linéaire simple	Régression non linéaire
Température de l'air	La rugosité, Cf	Densité surfacique, densité volumique
Vitesse du vent	Densité surfacique, Cut, rugosité	La porosité
TEP	Densité surfacique, rugosité	Densité volumique

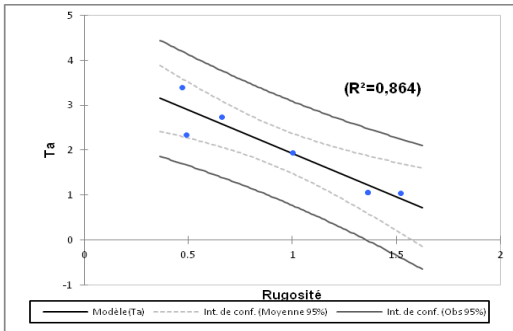
La régression linéaire est sans aucun doute la méthode statistique la plus utilisée. Une relation est linéaire si l'on peut trouver une relation entre X et Y de la forme : $Y = a (X) + b$ et les nuages de points peuvent s'ajuster à une ligne (tableau .6.8).

6.9.5.1. La vérification de la signification de la régression linéaire :

6.9.5.1.1. La vérification de la signification de la régression linéaire de la température de l'air avec la rugosité

La vérification de la signification de la régression linéaire de la température de l'air avec la rugosité a donné les résultats suivants :

Observations	6,000
Somme des poids	6,000
DDL	4,000
R ²	0,864
R ² ajusté	0,829
MCE	0,149
RMCE	0,386



Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	1	3,764	3,764	25,323	0,007
Erreur	4	0,595	0,149		
Total corrigé	5	4,358			

La figure 6.23 : Régression de Ta par rugosité

La figure 2.23 fournit des résultats sur les coefficients d'ajustement du modèle. Le R^2 (coefficient de détermination) donne une idée du % de variabilité de la variable à modéliser, expliqué par la variable explicative. Le tableau d'analyse de la variance nous permet de tester si l'on peut considérer que la variable explicative sélectionnée (la rugosité et Cf) apporte une quantité d'information significative au modèle (hypothèse nulle H_0) ou non. En d'autres termes, c'est un moyen de tester si la moyenne de la variable à modéliser (température de l'air) suffirait à décrire les résultats obtenus ou non.

Dans notre cas, 86% de la variabilité de la température de l'air est expliquée par la rugosité.

Le test du F de Fisher est utilisé (niveau choisi est 5%). Etant donné que la probabilité associée au F est dans ce cas inférieure à 0.05, cela signifie que l'on prend un risque de se tromper de moins de 0.7% ainsi la variable explicative apporte une quantité d'information significative au modèle.

Tableau 6.09 : Paramètres du modèle (T_a).

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	3,855	0,384	10,027	0,001	2,788	4,923
Rugosité	-1,926	0,383	-5,032	0,007	-2,988	-0,863

Le tableau 6.09 : fournit les détails sur le modèle. Il est essentiel lorsque le modèle doit être utilisé pour faire des prévisions, des simulations ou s'il doit être comparé à d'autres résultats. Dans notre test l'intervalle de confiance montre l'absence d'une valeur négative ($H \neq 0$). Le test de probabilité relatif à test de Student (vérifier la distribution non centrale des données) est inférieur à 5%.

Ainsi l'équation du modèle prendra la forme suivante :

$$T_a = 3,8551703654005 - 1,92571832069664 * \text{Rugosité} \quad (\text{eq.6.1})$$

La figure 6.23 permet de visualiser les données, la droite de régression, et les deux intervalles de confiance (le plus proche de la courbe est l'intervalle autour de la moyenne de l'estimateur, le second est l'intervalle autour de l'estimation ponctuelle aussi appelé intervalle de prédiction). On voit ainsi clairement une tendance linéaire, et l'absence des valeurs suspectes en dehors le second intervalle de confiance.

6.9.5.1.2. La vérification de la signification de la régression linéaire de la température de l'air avec Cf :

La vérification de la signification de la régression linéaire de la température de l'air avec Cf a donné les résultats suivants :

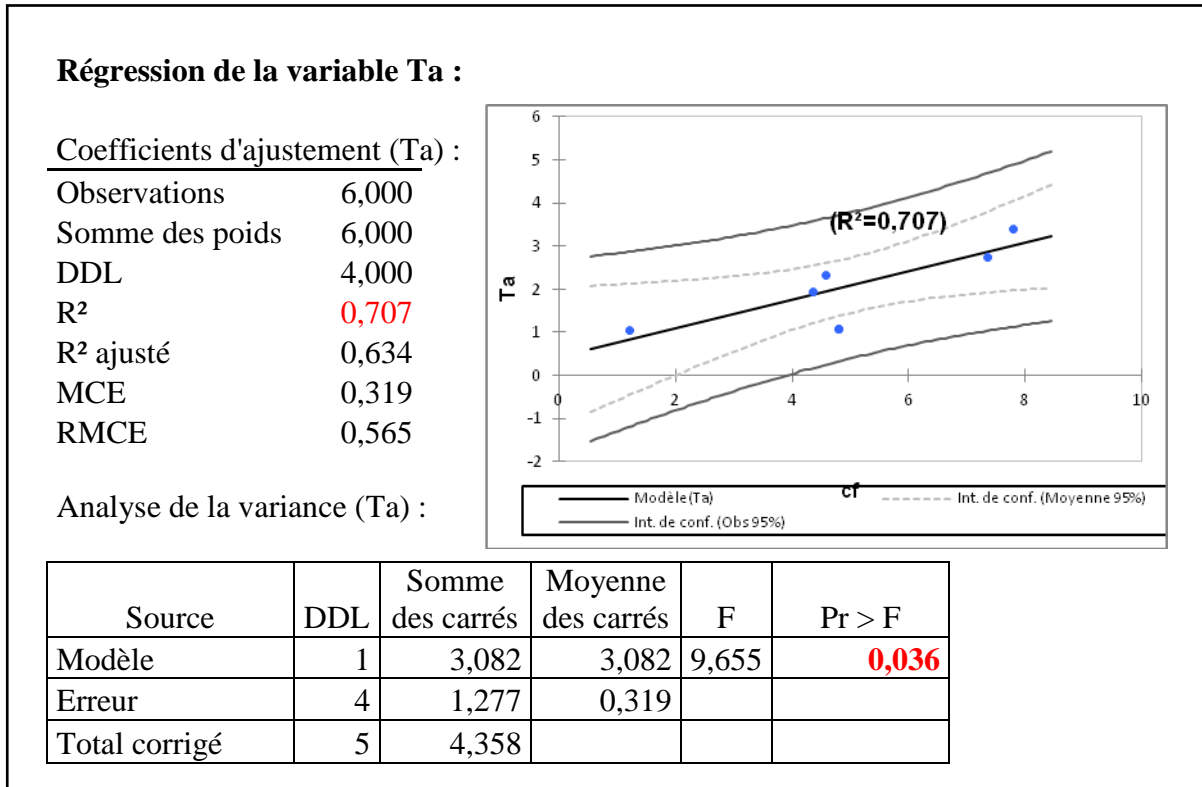


Figure 6.24 : Régression de Ta par cf

Paramètres du modèle (Ta) :

Tableau 6.10 : coefficients d'ajustement de régression de la variable Ta

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	0,438	0,579	0,757	0,491	-1,170	2,047
cf	0,330	0,106	3,107	0,036	0,035	0,624

D'après le tableau des Coefficients d'ajustement (tableau 6.24) on remarque que 70% de la variabilité de la température de l'air est expliquée par Cf.

Le test probabilité relatif au F de Fisher est significatif ainsi que le t de Student (inférieur à 5%).

Ainsi la variation de la température de l'air peut aussi s'expliquer significativement par la variable explicative Cf.

Ainsi le modèle prédictif prendra la forme suivante :

$$Ta = 0,438441464187834 + 0,329545732603391 * cf \quad (\text{eq.6.2})$$

6.9.5.1.3. La vérification de la signification de la régression linéaire de la vitesse du vent avec la densité surfacique :

La vérification de la signification de la régression linéaire de la vitesse du vent avec la densité surfacique a donné les résultats suivants :

Régression de la variable Vv :

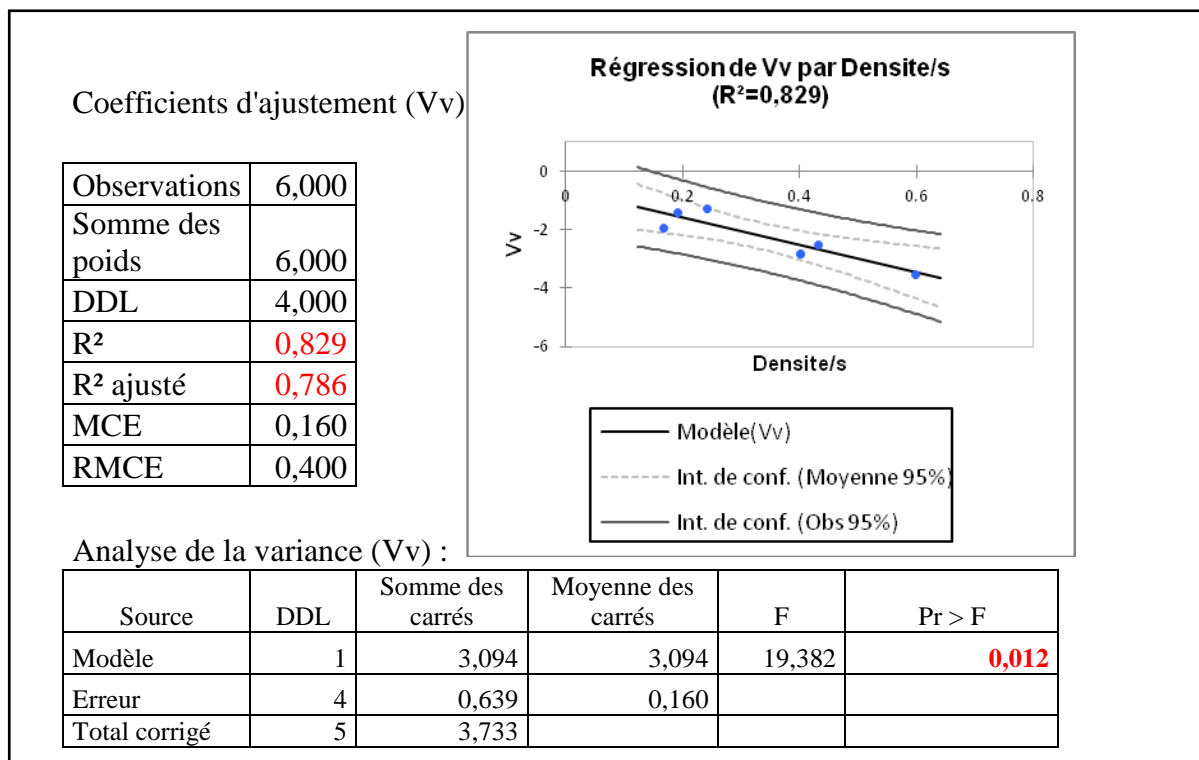


Figure 6.25 : Régression de la vitesse du vent par Densité/S

Paramètres du modèle (Vv) :

Tableau 6.11 : coefficients d'ajustement du modèle de régression vitesse du vent/Densité de surface.

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-0,647	0,395	-1,639	0,176	-1,742	0,449
Densité/s	-4,692	1,066	-4,403	0,012	-7,651	-1,733

D'après le tableau (6.11) des Coefficients d'ajustement on remarque que 82% de la variabilité de la vitesse de l'air est expliquée par la densité surfacique.

Le test probabilité relatif au F de Fisher est significatif ainsi que le test de Student (inférieur à 5%). La probabilité est de 1.2%.

Ainsi la variation de la vitesse de l'air peut aussi s'expliquer significativement par la variable explicative de la densité surfacique.

Ainsi l'équation du modèle est la suivante :

$$Vv = -0,646801196847934 - 4,69199789673884 * \text{Densité/s} \quad (\text{eq.6.3})$$

6.9.5.1.4. La vérification de la signification de la régression linéaire de la vitesse du vent avec CUT :

La vérification de la signification de la régression linéaire de la vitesse du vent avec CUT a donné les résultats suivants

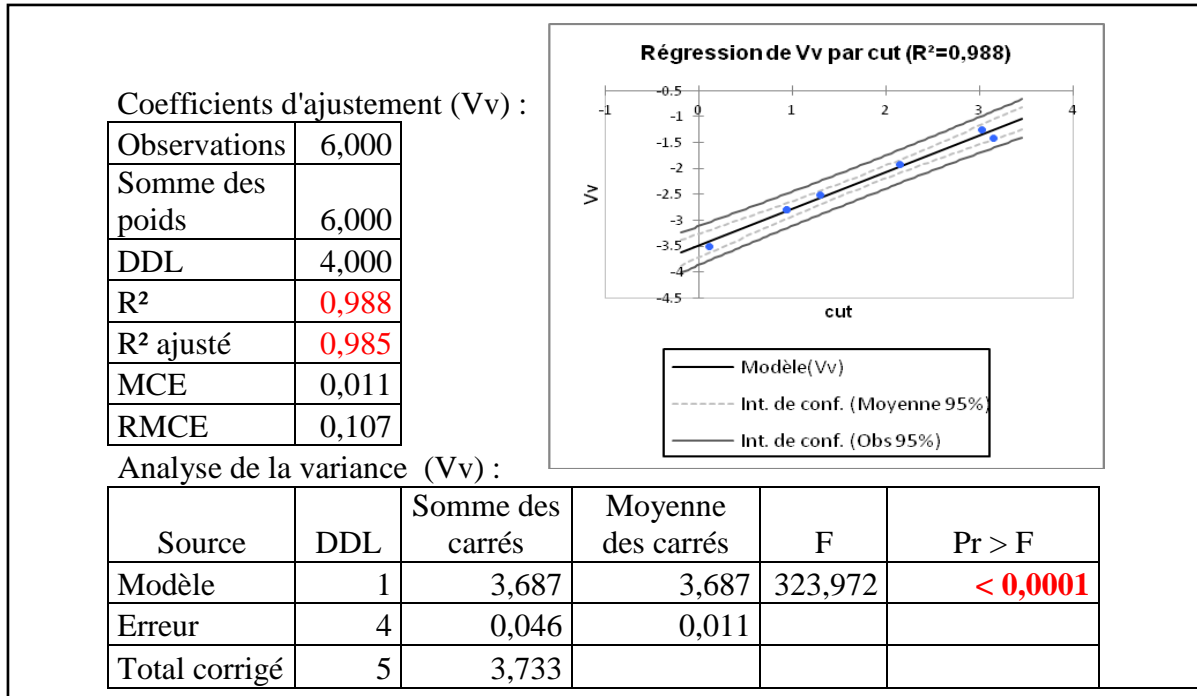


Figure 6.26 : Régression de la vitesse du vent par Cut

Paramètres du modèle (Vv) :

Tableau 6.12 : coefficients d'ajustement du modèle de régression vitesse du par Cut.

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-3,491	0,083	-42,276	< 0,0001	-3,721	-3,262
Cut	0,711	0,040	17,999	< 0,0001	0,602	0,821

D'après le coefficient de détermination R², 98% de la variabilité de la variable dépendante vitesse du vent est expliqué par Cut. Le p-value relatif au test de Fisher et Student est inférieur à 5% (<0.001%). Ces résultats montrent que la variable Cut peut être utilisée pour expliquer la variation de la vitesse du vent.

Ainsi l'équation du modèle prendra la forme suivante :

$$Vv = -3,49130859684247 + 0,711207872990015 * cut \quad (\text{eq.6.4})$$

6.9.5.1.5. La vérification de la signification de la régression linéaire de la vitesse du vent avec la rugosité :

La vérification de la signification de la régression linéaire de la vitesse du vent avec la rugosité a donné les résultats suivants :

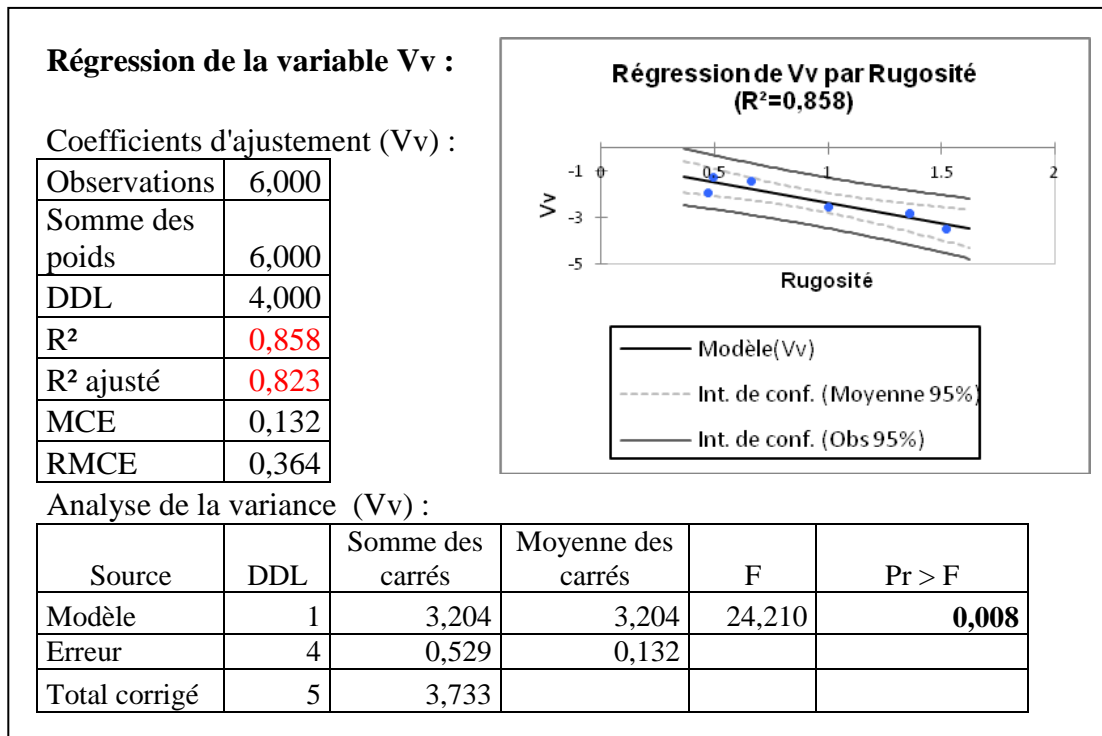


Figure 6.27 : Régression de la vitesse du vent par la rugosité

Paramètres du modèle (Vv) :

Tableau 6.13 : coefficients d’ajustement du modèle de régression vitesse du par la rugosité.

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-0,600	0,363	-1,653	0,174	-1,607	0,407
Rugosité	-1,777	0,361	-4,920	0,008	-2,779	-0,774

Le coefficient de détermination calculé pour la régression linéaire de la vitesse du vent et rugosité montre que 85% de la variabilité de la vitesse du vent est expliquée par la rugosité. Cette régression est significative : le p-value relatif au test de Fisher est Student est distinctement inférieur à 5% (0.8%).

Le modèle de régression qui prédit la vitesse de l’air en fonction de la rugosité est le suivant :

$$Vv = -0,599810691347823 - 1,77662268014581 * \text{Rugosité} \quad (\text{eq.6.5})$$

6.9.5.1.6. La vérification de la signification de la régression linéaire de TEP avec la densité surfacique:

La vérification de la signification de la régression linéaire de TEP avec la densité surfacique a donné les résultats suivants :

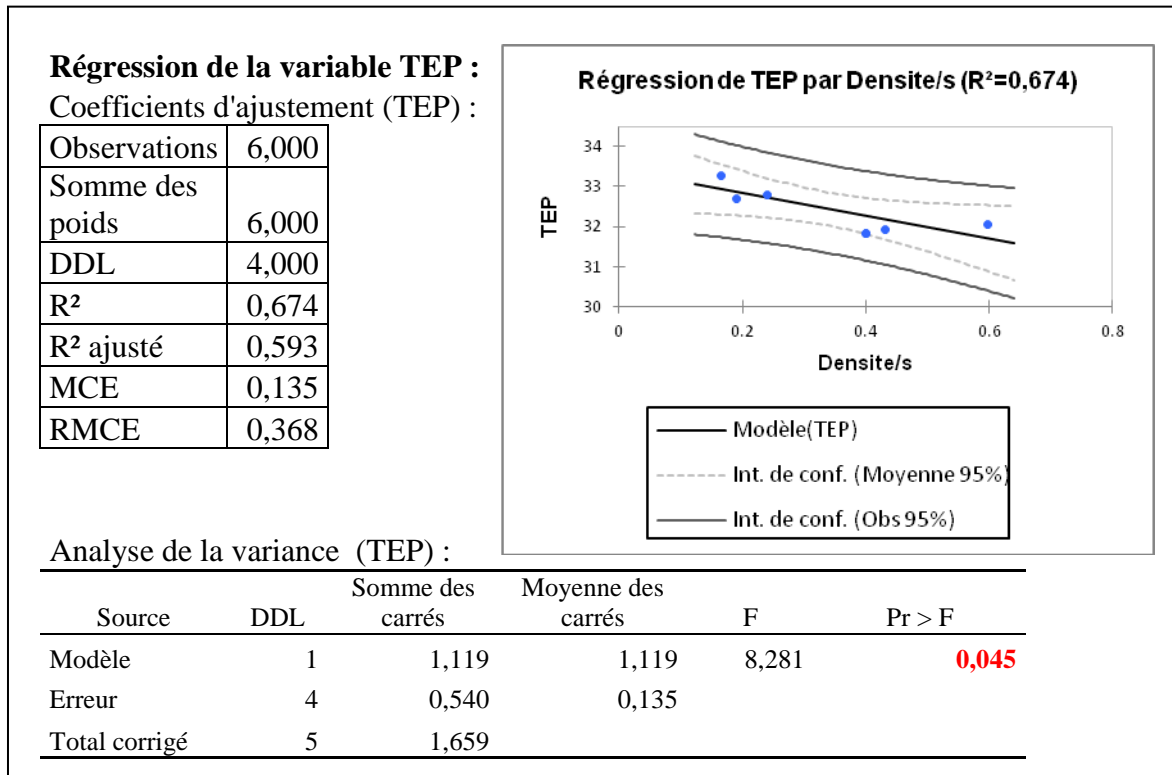


Figure 6.28 : Régression de TEP par la densité/s

Paramètres du modèle (TEP) :

Tableau 6.14 : coefficient d'ajustement du modèle de régression TEP par la densité surfacique.

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	33,397	0,363	92,016	< 0,0001	32,390	34,405
Densité/s	-2,821	0,980	-2,878	0,045	-5,543	-0,099

Le coefficient de détermination montre que 67% de la variation de la variable dépendante TEP est expliqué par ce modèle de régression (figure 6.28). Le p-value des tests de Fisher et Student est inférieur à 5% (4.5%). Ainsi ce modèle explique significativement la variation de TEP en fonction de la densité surfacique.

Son équation s'écrit comme suit :

$$\text{TEP} = 33,3974651278868 - 2,82132761910049 * \text{Densité/s} \quad (\text{eq.6.6})$$

6.9.5.1.7. La vérification de la signification de la régression linéaire de TEP avec la rugosité :

La vérification de la signification de la régression linéaire de TEP avec la rugosité a donné les résultats suivants :

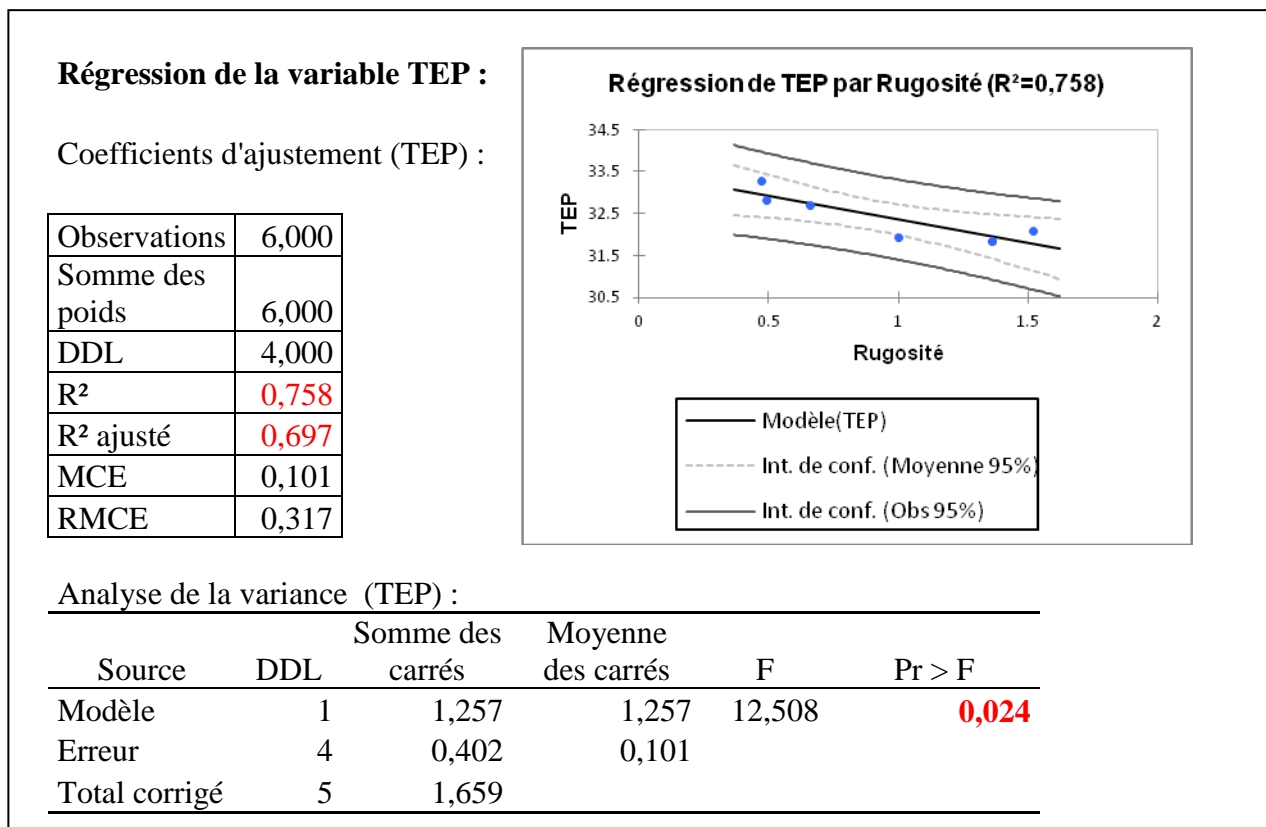


Figure 6.29 : Régression de TEP par la rugosité

Paramètres du modèle (TEP) :

Tableau 6.15 : coefficient d'ajustement du modèle de régression TEP par la rugosité.

Source	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	33,467	0,316	105,850	0,0001	32,589	34,344
Rugosité	-1,113	0,315	-3,537	0,024	-1,987	-0,239

Le coefficient de détermination obtenu montre que 75% de la variabilité de PET est expliquée par la rugosité.

Cette relation est significative, le p-value des deux tests statistiques de Fisher et Student est inférieur à 5% (2.4%).

L'équation du modèle de la régression linéaire s'écrit comme suit :

$$\text{TEP} = 33,4666575787916 - 1,11295259677701 * \text{Rugosité} \quad (\text{eq.6.7})$$

6.9.5.2. Régression non linéaire :

6.9.5.2.1. Signification de la régression non linéaire de la température de l'air et la densité surfacique :

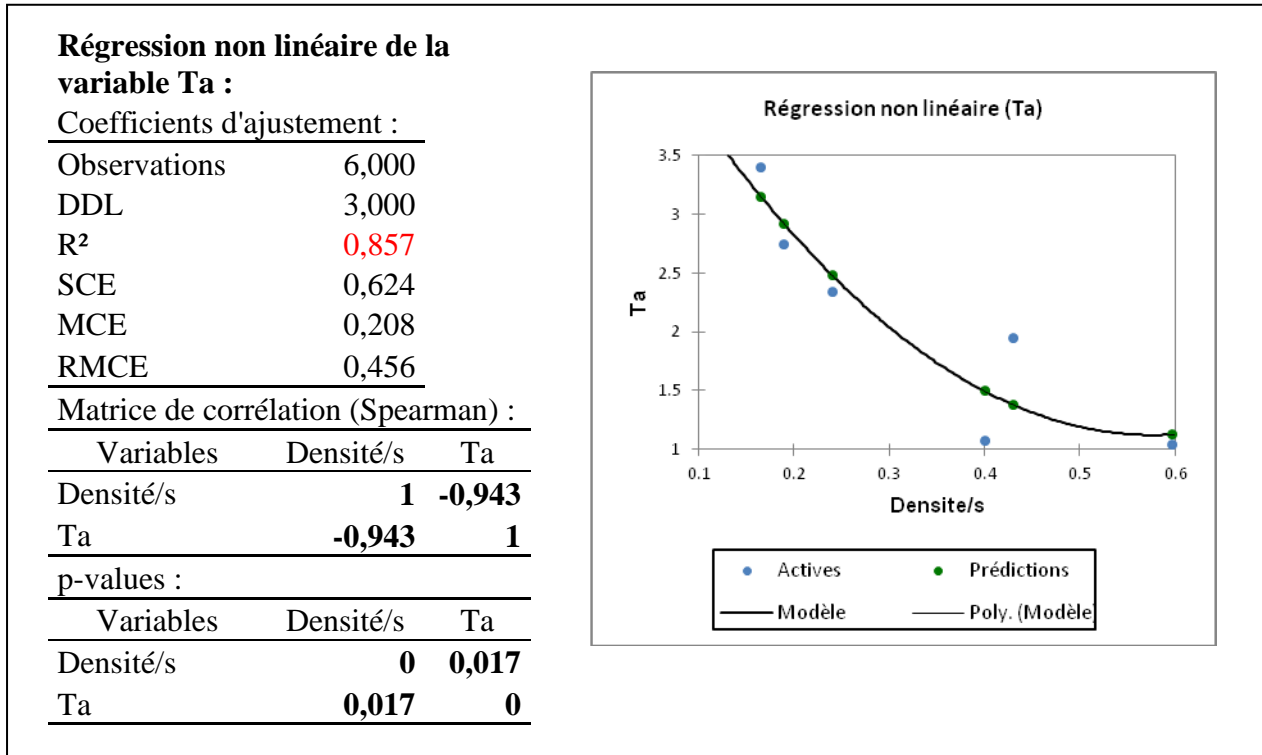


Figure 6.30 : Régression non linéaire de la température de l'air et la densité surfacique.

Le p-value du coefficient de corrélation Spearman (-0.943) associé à cette liaison non linéaire est de 0.017 (< 0.05).

Le coefficient de détermination montre que 85% de la variabilité de la température de l'air peut être expliqué par ce modèle.

L'équation du modèle prédictif s'écrit comme suit :

$$Ta = 5,107 - 13,82 * Densité/s + 11,989 * Densité/s^2 \quad (\text{eq.6.8})$$

6.9.5.2.2. Signification de la régression non linéaire de la température de l'air et la densité volumique :

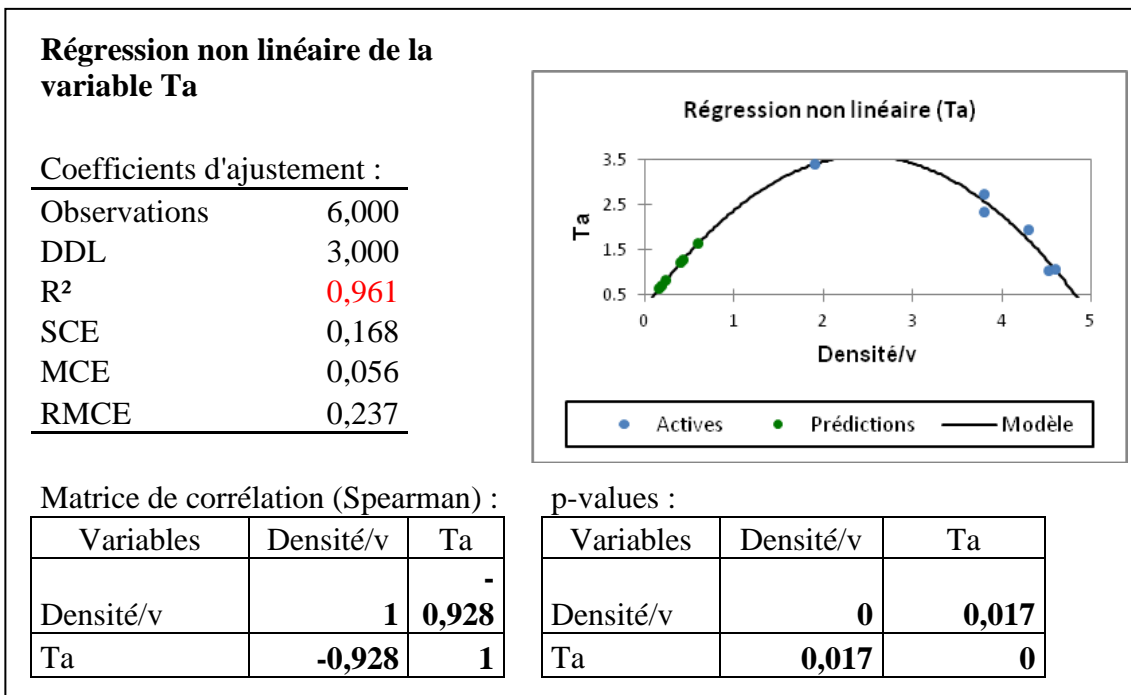


Figure 6.31 : Régression non linéaire de la température de l'air et la densité volumique

Le p-value du coefficient de corrélation Spearman (-0.928) associé à cette liaison non linéaire est de 0.017 (< 0.05).

Le coefficient de détermination montre que 92% de la variabilité de la température de l'air peut être expliqué par ce modèle.

L'équation du modèle prédictif s'écrit comme suit :

$$Ta = 0,214 + 2,72 * Densité/v - 0,55 * Densité/v^2 \quad (eq.6.9)$$

6.9.5.2.3. Signification de la régression non linéaire de la vitesse de l'air et porosité :

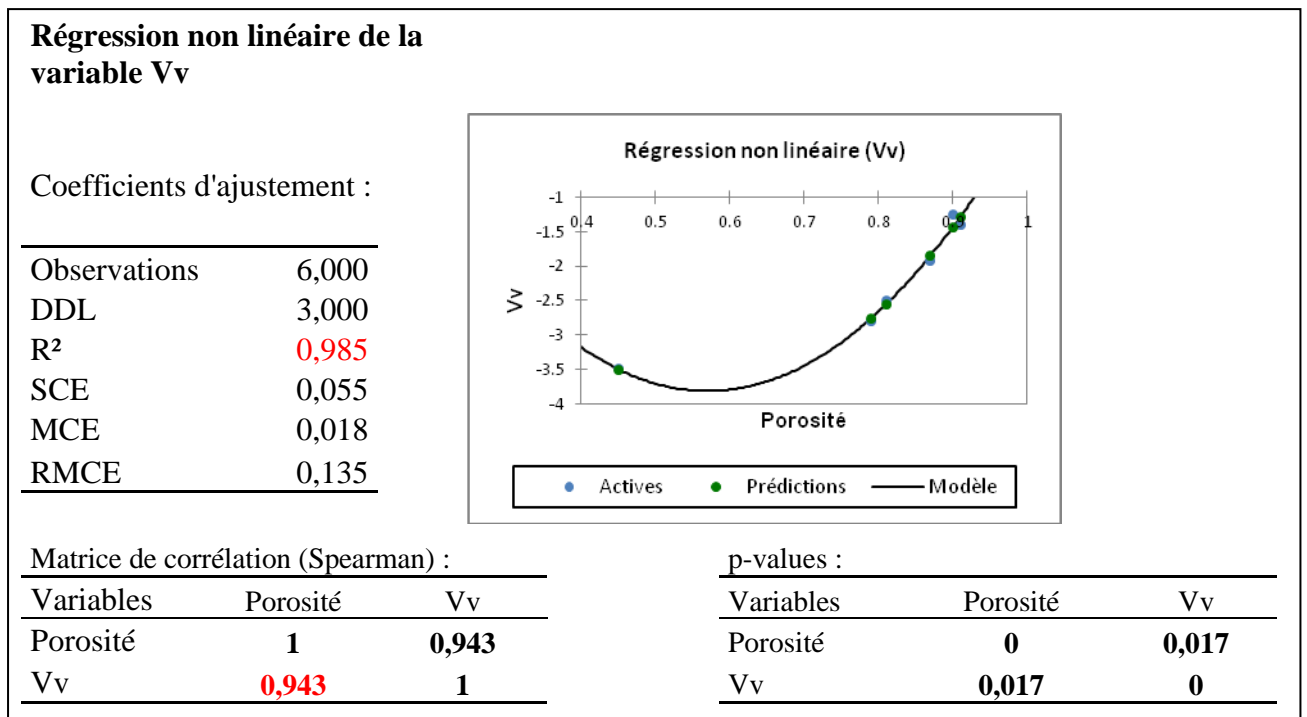


Figure 6.32 : Régression non linéaire de la vitesse du vent et la porosité

Le p-value du coefficient de corrélation Spearman associé à cette liaison non linéaire est de 0.017 (< 0.05). Le coefficient de détermination montre que 98% de la variabilité de la vitesse de l'air peut être expliquée par ce modèle.

L'équation du modèle prédictif s'écrit comme suit :

$$Vv = 3,30 - 24,98 * Porosité + 21,91 * Porosité^2 \quad (eq.6.10)$$

6.9.5.2.4. Signification de la régression non linéaire de TEP et la densité volumique :

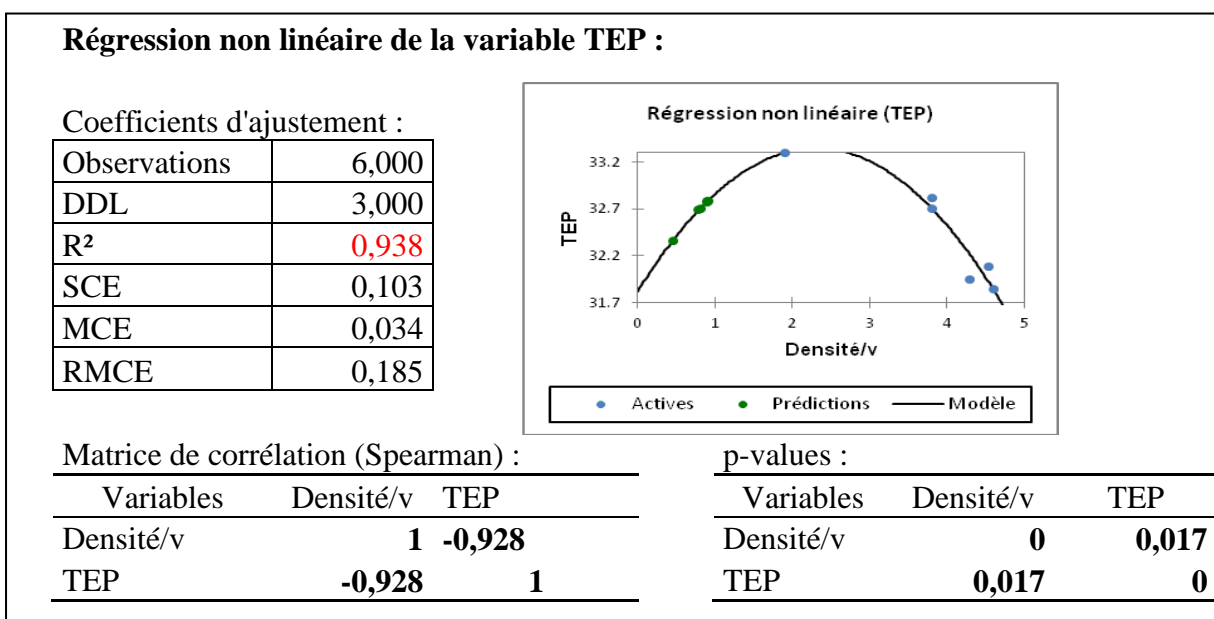


Figure 6.33 : Régression non linéaire de TEP et la densité volumique

Le p-value du coefficient de corrélation Spearman (0.938) associé à cette liaison non linéaire est de 0.017 (< 0.05).

Le coefficient de détermination montre que 93% de la variabilité de TEP peut être expliqué par ce modèle.

L'équation du modèle prédictif s'écrit comme suit :

$$\text{TEP} = 31,82 + 1,32 * \text{Densité}/v - 0,286 * \text{Densité}/v^2 \quad (\text{eq.6.11})$$

6.10. Conclusion :

Dans cette partie de la recherche, on a essayé de comparer les mesures obtenues à travers les différents sites, dans une dynamique de parcours. L'objectif est d'évaluer l'impact des indicateurs morphologiques sur le microclimat et voir s'ils peuvent nous apporter des explications sur la variation des paramètres météorologiques et le confort extérieur.

Les paramètres météorologiques mesurés ainsi que les indices du confort calculés, issues des parcours montrent l'impact de la disposition des bâtiments et l'aménagement extérieurs sur les conditions thermiques extérieures.

La végétation avait une grande influence, seulement elle variait en fonction de la densité des arbres et leur emplacement.

La géométrie de la rue (orientation et prospect), jouait un grand rôle non seulement dans les échanges radiatifs mais aussi sur l'écoulement d'air et la provocation de la ventilation naturelle.

Les îlots ouverts augmentent le nombre des façades réceptrices et favorise le piégeage radiatif, cependant ils créent une porosité qui peut servir au rafraîchissement lorsqu'elle est étudiée en fonction des brises de mer.

Le croisement des indicateurs morphologiques avec les paramètres climatiques a révélé des relations de régression linéaire telles que :

- La température de l'air et la rugosité et Cf.
- La vitesse du vent et la densité de surface, la rugosité et Cut.
- Le confort thermique et la densité de surface ainsi que la rugosité.

Des relations de régression non linéaires sont obtenues avec :

- La température de l'air et la densité de surface et la densité volumique.
- La vitesse du vent et la porosité.
- Le confort thermique et la densité volumique.

Cependant, malgré l'importance de l'humidité relative, d'après notre enquête (chapitre précédent), on n'a pas pu caractériser la relation entre cette variable et les variables morphologiques.

Malgré l'importance des régressions obtenues on a trouvé qu'une variable morphologique peut expliquer la variation d'une variable météorologique et ne pas expliquer les autres, alors que les paramètres climatiques sont très liés. Le nombre des échantillons n'a pas permis de tester la possibilité d'utiliser la régression multiple afin d'introduire toutes ces relations dans un seul modèle.

Ce qui nous oriente à élargir les échantillons dans les études futures ainsi que la période de l'investigation.

Chapitre VII

Evaluation physiologique du confort extérieur

```
Editor - D:\doct\matlab\juillet\comfa 09h\comfa cours\comfa10.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
1 | % Bilan = Meta+Pabs-Conv-Evap-Tremis;
2 | % PERSON Metabolic rate [W/m2]
3 | Met=90;
4 | % Person albedo
5 | Ap=0.5;
6 | % Person emissivity
7 | ep=0.98;
8 | % Person equivalent diameter[m]
9 | D=0.17;
10 | % Clothing resistance[m2K/W]
11 | rco=0.042;
12 | % Clothing permeability
13 | P=175;
14 | % CLIMATE Air temperature [°C]
15 | Ta=23.41;
16 | % Relative humidity[%]
17 | RH=0.57;
18 | % Wind velocity[m/s]
19 | w=0.45;
20 | %Global horizontal irradiance[W/m2]
21 | K=724;
22 | %Diffuse horizontal irradiance[W/m2]
23 | Kd=117;
24 | %Solar height[°]
25 | Hsol=42.7;
26 | %SKY % direct solar radiation on the person or transmissivity of shading between sun and person ( if shaded by building t =0)
27 | t=1;
28 | % T = 1 s'il n'y a pas d'obstruction;
29 | % T = 0 si l'obstacle est un bâtiment ou une paroi opaque; Conception des ambiances urbaines
30 | % 0<T<1 si l'obstacle est végétal. En général, on considère qu'un arbre à feuilles caduques transmet 15 à 30 % du rayonnement solaire direct en été et 55 à 70%
31 | %Sky temperature[°C]
32 | Tsky=0.0552*(Ta+273.15)^(1.5)-273.15;
33 | %Sky view factor
34 | SVF;
35 | %OBJECT IN THE SKY Objects in the sky temperature[°C]
```


7.1. Introduction :

Ce chapitre traitera la relation entre les indicateurs morphologiques évalués à l'échelle des espaces publics et les trois indices de confort : l'indice de confort empirique TEP et les deux indices de confort thermique physiologiques PET et COMFA+*. L'objectif est d'examiner quels sont les indicateurs morphologiques qui expliqueraient significativement la variation du confort thermique extérieur à l'échelle des espaces publics. Ainsi que déduire l'outil le plus approprié et qui répond le plus aux attentes des concepteurs afin d'évaluer le niveau du confort extérieur. Au départ une calibration des deux indices physiologiques PET et COMFA+* est effectuée. Les résultats obtenus de la simulation ont été comparés à ceux obtenus de l'indice du confort empirique. L'objectif est l'adaptation de ces indices au contexte de l'étude.

Les valeurs de COMFA+* sont obtenues grâce à un programme qu'on a développé sous Matlab. Les valeurs introduites relatives à la température, l'humidité et la vitesse de l'air correspondent aux valeurs mesurées sur site. Le rayonnement reçu était calculé en fonction d'un programme sous Excel, établi par Yaiche, R, C.D.E.R, décembre 2013, qui calcule la quantité du rayonnement solaire Global, direct et diffus, selon la méthode Liu Jordan, pour les différents plans et orientations dans les différents sites d'Annaba.

En ce qui concerne l'évaluation du rayonnement direct et diffus reçu par les différentes parois (B1, B2, B3, B4), le logiciel Townscope a été utilisé.

Le deuxième indice physiologique PET a été calculé grâce au modèle Envi-met Biomet.

7.2. Développement de COMFA+*:

Actuellement un grand intérêt est porté sur le rôle des structures urbaines dans la définition du microclimat urbain, l'accent est porté sur le domaine radiatif (Dessi, 2008).

En effet, en identifiant les variables les plus importantes qui influent sur les échanges radiatifs, il est possible de calibrer les actions de conception à entreprendre afin d'améliorer le confort extérieur. Ces éléments englobent : la morphologie, la végétation, le revêtement, les matériaux, occultation et l'eau. Après avoir identifié les points de regroupement des usagers, Des mesures des paramètres microclimatiques ont été entreprises à savoir : température de l'air et de surface, humidité relative, vitesse du vent. Le rayonnement direct et diffus a été évalué numériquement.

Ces données ont été par la suite exploitées dans COMFA+. Les équations introduites représentent un fusionnement du model conçu par Brown et Gillespie (1986) , Kenny et al (2009) et Dessi et al (2008).

7.2.1. Introduction de l'impact des bâtiments dans le modèle COMFA :

L'équation du modèle COMFA s'écrit comme suit :

$$TB = M + K_{abs} + L_{abs} - (Conv + Evap + TR_{emitted}) \quad (eq.7.1)$$

Où M est le métabolisme, K_{abs} est le rayonnement solaire absorbé, L_{abs} est le rayonnement thermique absorbé, Conv sont les pertes ou les gains de chaleur par convection, Evap présente les pertes de chaleur par évaporation et $TR_{emitted}$ est le rayonnement thermique émis (longue longueur d'onde).

K_{abs} : le rayonnement solaire absorbé est calculé comme suit :

$$K_{bs} = (T + D + S + R) \times (1 - A_p) \quad (eq.7.2)$$

T : Rayonnement solaire direct intercepté par l'utilisateur = $(k - k_d) \times t_t / (\tan(e_{solaire} \times \pi/180) \times \pi)$, t_t est la quantité du rayonnement solaire direct reçu par une personne.

D : Rayonnement solaire diffus intercepté par l'utilisateur

S : Rayonnement solaire réfléchis des objets tels que les arbres

G : Rayonnement solaire réfléchis du sol

A_p : Albédo de l'utilisateur

B : Rayonnement solaire réfléchis par les bâtiments

Les valeurs de D, S, R étaient calculées en prenant en considération la présence des bâtiments et leurs impacts sur l'obstruction du sol et du ciel.

Dans le but d'introduire l'impact des bâtiments, un nouveau facteur de vue BVFi entre l'utilisateur et les bâtiments est introduit. Les bâtiments et le sol réfléchissent le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Leur ensoleillement dépend de leur orientation comme ils peuvent contribuer à l'occultation d'une partie du sol. C'est pourquoi il est important d'évaluer la quantité du rayonnement réfléchi par les bâtiments envers l'utilisateur en considérant les parties ensoleillées du bâtiment et du sol.

Le rayonnement thermique absorbé par une personne peut être calculé comme suit :

$$L_{abs} = \epsilon_p (V + G + F + U) \quad (eq.7.3)$$

V, G et F considérés comme des corps gris, calculés en fonction des équations suivants:

V est le rayonnement thermique émis par le ciel

$$V = SVF' \sigma \epsilon_{sky} T_{sky}^4 \quad (eq.7.4)$$

G Rayonnement émis par le sol

$$G = GVF \sigma \epsilon_g T_g^4 \quad (eq.7.4)$$

F Rayonnement émis par les objets

$$F = OVF \sigma \varepsilon_o T_o^4 \quad (\text{eq.7.5})$$

G Rayonnement émis par les constructions (l'élément introduit dans le bilan)

La quantité du rayonnement émise par les bâtiments est évaluées an fonction de:

$$U = \sum_i BVF_i \sigma \varepsilon_b T_{bi}^4 \quad (\text{eq.7.6})$$

Les valeurs météorologiques introduites se réfèrent à une journée type d'été (01 juillet, chapitre VI)

Le rayonnement reçu était calculé en fonction d'un programme sous Excel, établi par Mr. M.R. Yaiche qui calcule la quantité du rayonnement solaire Global, direct et diffus, selon la méthode « Liu Jordan », pour les différents plans et orientations dans les différents sites d'Annaba.

7.2.2. Evaluation du facteur de forme :

L'état stationnaire dans le confort correspond à la condition dont la quantité de chaleur stockée dans le corps=0, en d'autres termes les pertes sont égales aux gains. Les pertes de chaleur par rayonnement représentent la partie la plus importante dans l'équation, elles dépendent du facteur d'angle entre l'être humain et les surfaces environnantes.

Suite à plusieurs expérimentations Fanger a déterminé la valeur de ce paramètre pour plusieurs positions d'une personne dans une enceinte rectangulaire, comme il a établi plusieurs diagrammes pour tirer ces valeurs. Ces méthodes ont été développées pour englober d'autres positions et d'autres formes telles que les surfaces inclinées (Kalispie et Summers, 1985).

Seulement lorsqu'on utilise des méthodes numériques l'exploitation des diagrammes n'est pas possible.

Cannistraro et al, (1992) ont développé un algorithme dérivé des données expérimentales de Fanger et qui peut être appliqué pour les deux positions d'une personne debout et assise entourée par des surfaces orthogonales.

Il a été remarqué à partir des diagrammes de Fanger que le facteur de vue entre une personne et une enceinte suit une loi exponentielle commençant par la valeur $F_{p-A} = 0$ pour $b/c=0$, jusqu'à une valeur de saturation $F_{p-A} = F_{sat.}$ a, b et c sont les coordonnées de l'utilisateur dans l'espace public (figure 7.1).

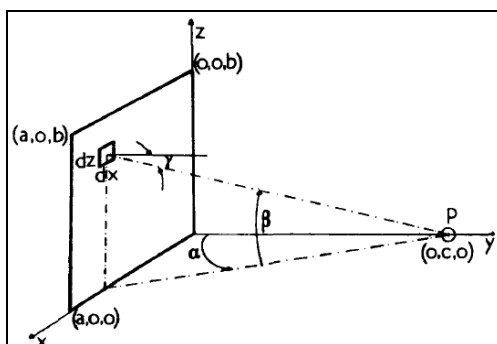


Figure 7.1: Coordonnées entre une personne (P) et une surface dans un environnement rectangulaire. (D’après P.O. Fanger, 1972).

Selon Fanger (1973) l’enceinte peut être divisée en plusieurs surfaces selon six cas (figure 7.2) présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7.1: Description des situations analysées.

Situation	Identification conventionnelle	Posture	Orientation du sujet	Description
1	SEK1	Assise	Connue	Rectangle vertical devant la personne et au-dessus de son centre, ou derrière lui et au-dessous de son centre
2	SEK2	Assise	Connue	Rectangle vertical devant la personne et au-dessous de son centre, ou derrière lui et au-dessus de son centre
3	SEK3	Assise	Connue	Rectangle vertical sur la paroi latérale au-dessus et en avant de l'espace, ou au-dessous et derrière son centre
4	SEK4	Assise	Connue	Rectangle vertical sur la paroi latérale au-dessous et en avant du centre, ou au-dessus et derrière son centre
5	SEK5	Assise	Connue	Rectangle horizontal dans le plafond et en avant de son centre, ou sur le plancher et derrière son centre
6	SEK6	Assise	Connue	Rectangle horizontal au plafond et derrière son centre, ou sur le plancher et en avant de son centre
7	SEU1	Assise	inconnue	Rectangle vertical au-dessus ou en dessous du centre de la personne
8	SEU2	Assise	inconnue	Rectangle horizontal au plafond ou au sol
9	STK1	Debout	Connue	Rectangle vertical devant ou derrière la personne, au-dessus ou au-dessous de son centre
10	STK2	Debout	Connue	Rectangle sur la paroi latérale, avant ou derrière, au-dessus ou au-dessous du centre de la personne
11	STK3	Debout	Connue	Rectangle au plafond ou au sol, en avant ou en arrière, au-dessus ou au-dessous du centre de la personne
12	STU1	Debout	inconnue	Rectangle vertical au-dessus ou en dessous du centre de la personne
13	STU2	Debout	inconnue	Rectangle horizontal au plafond ou au sol

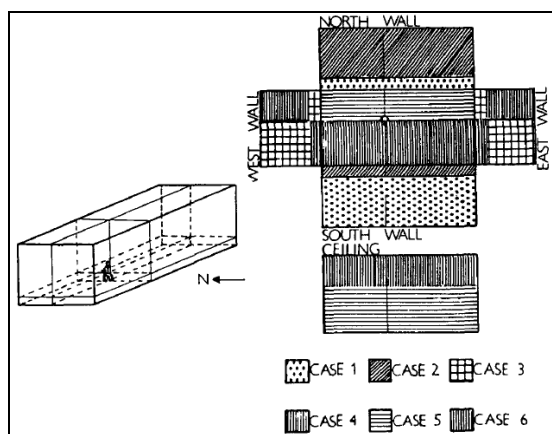


Figure 7.2: Répartition de l’enclosure en fonction de six situations géométriques.

L'équation proposée pour calculer le facteur de vue entre une personne et une enceinte orthogonale est la suivante :

$$F_{P-A} = F_{\text{satmax}}(1-\exp[-(a/c)/\tau]) \times (1-\exp[-(b/c)/\gamma]) \quad (\text{eq.7.7})$$

Où: F_{satmax} , τ et γ sont des coefficients qui varient en fonction de la position de l'utilisateur (Tableau 7.2)

Tableau 7.2: Paramètres utilisés dans l'équation pour une personne assise avec leurs coefficients de corrélation.

Situation	$\tau = A + B(a/c)$				$\gamma = C + D(b/c) + E(a/c)$			
	F_{max}	A	B	R_r	C	D	E	R_r
SEK1	0.132	1.14505	0.14524	0.983	0.74379	0.10312	0.02967	0.837
SEK2	0.103	1.33522	0.14454	0.985	0.60637	0.14678	0.04628	0.906
SEK3	0.131	1.41607	0.09957	0.964	0.76196	0.07182	0.05578	0.858
SEK4	0.104	1.15253	0.13945	0.988	0.73371	0.09442	0.03688	0.856
SEK5	0.130	1.31858	0.12807	0.975	1.00432	0.03802	0.06189	0.783
SEK6	0.101	1.51966	0.12266	0.957	0.84923	0.10471	0.05704	0.948
SEU1	0.118	1.21590	0.16890	0.992	0.71739	0.08733	0.05217	0.927
SEU2	0.116	1.39569	0.13021	0.986	0.95093	0.07967	0.05458	0.853

Tableau 7.3: Paramètres utilisés dans l'équation pour une personne debout avec leurs coefficients de corrélation.

Situation	$\tau = A + B(a/c)$				$\gamma = C + D(b/c) + E(a/c)$			
	F_{max}	A	B	R_r	C	D	E	R_r
STK1	0.121	1.06238	0.16322	0.991	0.61838	0.08305	0.04338	0.906
STK2	0.119	1.50894	0.13674	0.970	0.66134	0.07363	0.05443	0.860
STK3	0.115	1.43489	0.12402	0.966	1.42996	-0.03349	0.05650	0.576
STU1	0.120	1.24186	0.16730	0.992	0.61648	0.08165	0.05128	0.895
STU2	0.116	1.59512	0.12788	0.951	1.22643	0.04621	0.04434	0.598

Dans cette recherche on a calculé le facteur de forme pour chaque point dans l'espace public en fonction de cet algorithme et grâce à un programme qu'on a développé sous Excel. La matrice des différentes valeurs obtenues, était par la suite introduite dans le programme COMFA+* qu'on a rédigé sous Matlab.

7.2.3. Introduction des activités rigoureuse et des propriétés des vêtements :

Un autre apport a été apporté par Kenny et al. (2009), afin d'améliorer la précision de COMFA. Ainsi, les activités physiques modérées à vigoureuses et l'effet de la vitesse du vent sur l'isolation des vêtements et la résistance à la vapeur ont été intégrés.

En effet, dans ce travail on a employé un nouveau modèle appelé COMFA+* qui utilise tous les paramètres mentionnés ci-dessus. Il présente un fusionnement des trois modèles :

- Le modèle COMFA initial.
- Le modèle COMFA+
- Le modèle COMFA*

Les équations de COMFA* reprises dans ce travail sont mentionnées dans le présent tableau (7.4).

Tableau 7.4 les modifications portées sur les équations du modèle initial de COMFA

COMFA initial	COMFA*
La résistance de la peau : $r_t = 0.1Ma + 65$	$r_t = \frac{PCP}{0.13Es + 15}$ Es sont les pertes évaporatives à travers la sueur (Wm^{-2}), p est la densité de l'air (kgm^{-3}), c_p est la chaleur spécifique de l'air ($Jkg^{-1} °C^{-1}$).
La vitesse relative de l'air La vitesse du vent est remplacée par v_r	$v_r = \sqrt{v_w^2 + v_a^2}$ où v_w est la vitesse du vent et v_a la vitesse de l'activité.
La résistance des vêtements $r_c = r_{co} (1 - 0.05(0.196P)^{0.4} V^{0.5})$ $r_c = r_{co}$	$r_c = r_{co} (-0.37(1 - \exp^{-\frac{vac}{0.72}}) + 1)$ r_{co} est la résistance statique des vêtements. $r_{co} = Icl \times 186.6 \text{ s m}^{-1}$, où $1 \text{ clo} = 186.6 \text{ s m}^{-1} = 0.1555 \text{ m}^2 \text{ °C}^{-1} \text{ W}^{-1}$ Icl isolation de vêtements vac la vitesse de l'activité $Icl = 1.372 - 0.01866Ta - 0.0004849Ta^2 - 0.000009333Ta^3$ équation originalement développée pour UTCI
Perméabilité à l'air $rcvo$	$rcv = rcvo(0.80 (1 - \exp^{-\frac{vr}{1.095}}) + 1)$
T_{sk} la température de la peau, r_c est la résistance des vêtements (sm^{-1})	$T_{sk} = \frac{T_c - T_a}{r_t + r_c + r_a} (r_a + r_c) + T_a$

7.3. Résultats obtenus de COMFA+*:

La matrice des valeurs obtenues de COMFA+* à partir de notre programme est visualisée à travers une grille grâce à Matlab R 2009 a. L'indice du confort a été évalué pour chaque point de la grille (Tebhani & Bouchahm, 2016). Cette visualisation nous a permis de discerner l'impact de chaque élément morphologique (bâtiment, surface minérale et végétale, matériaux, etc.) sur le confort extérieur. Comme il a été rapporté par Katzschner et al (2005), le zonage du confort thermique présente un outil facile à utiliser et facile à comprendre pour l'ensemble des planificateurs et des architectes (Katzschner et al, 2003).

Les résultats présentés ci-dessous correspondent au 01 juillet. Afin d'étaler l'étude du confort thermique pour obtenir une plus grande variété de conditions microclimatiques, la comparaison était faite entre les valeurs obtenues le matin, à midi et le soir.

Tableau 7.4 : Valeurs de COMFA+* enregistrées à 09h le 1^{er} juillet 2014

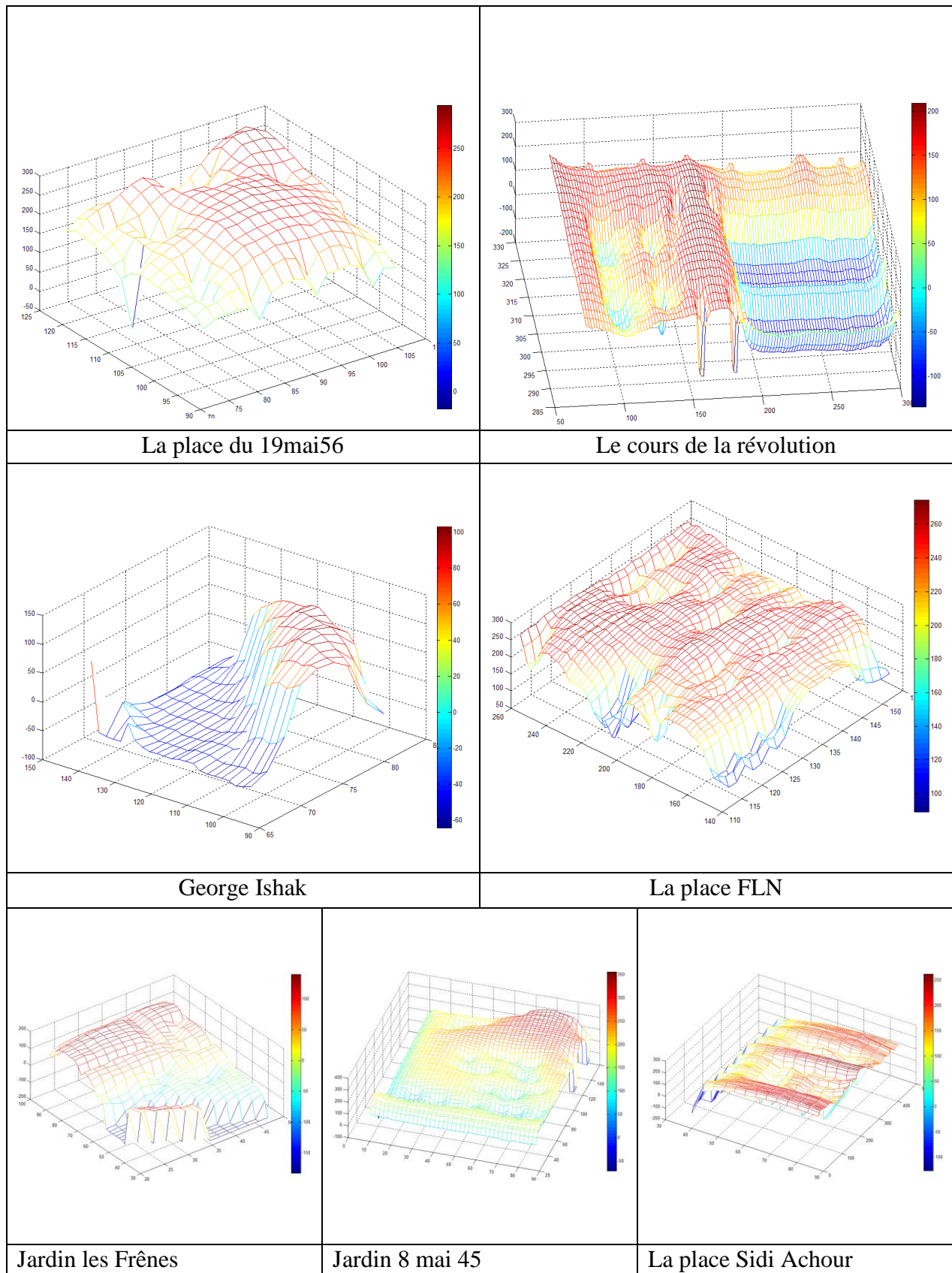
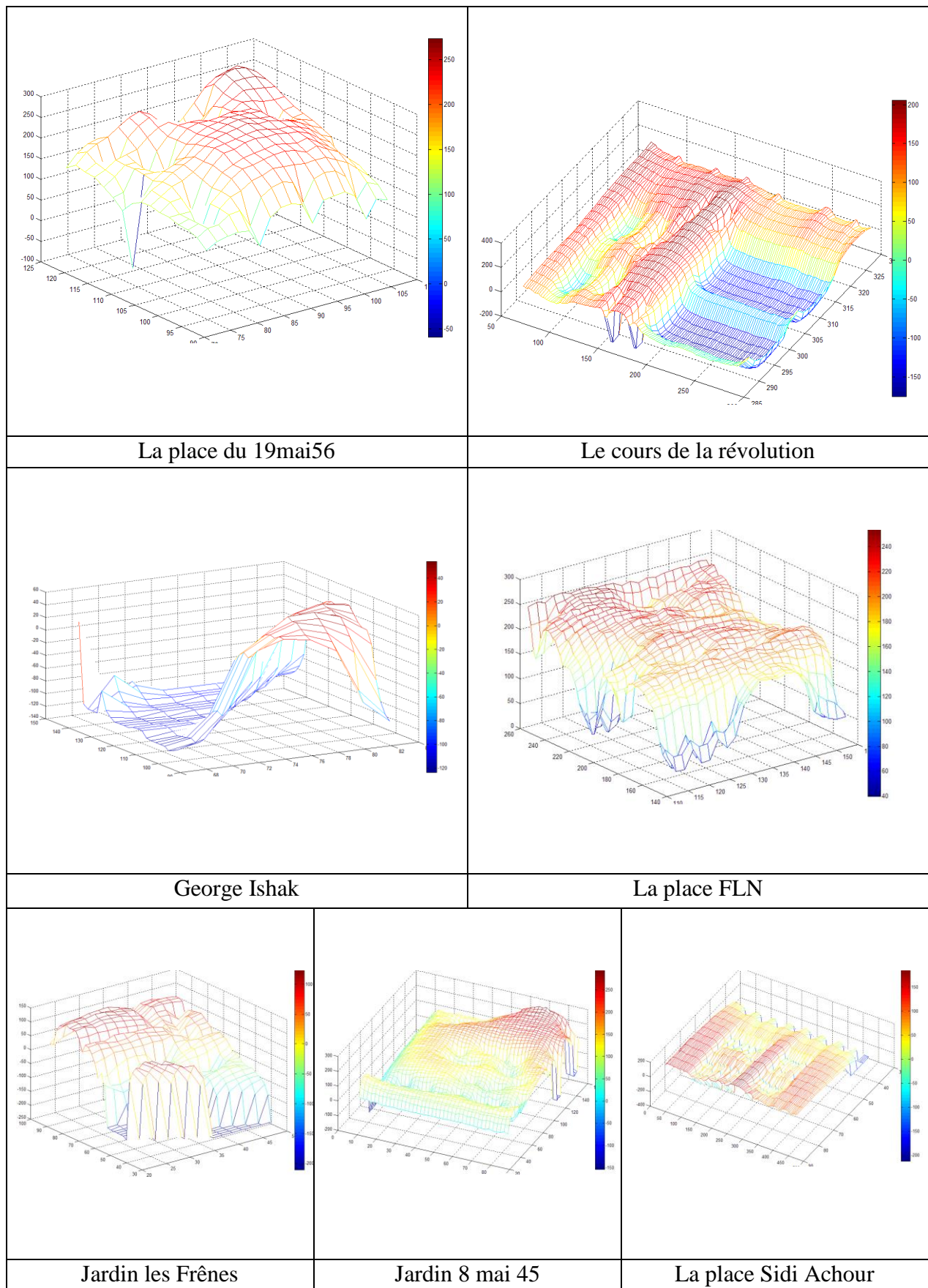


Tableau 7.5: Valeurs de COMFA+* enregistrées à 13h le 1^{er} juillet 2014



7.4. La température physiologique équivalente PET :

PET peut être calculé à partir du modèle MEMI (Munich Energy Balance Model for Individuals) basé sur l'équation du bilan énergétique du corps humain le modèle à deux nœuds de Gagge. Les modèles MEMI et COMFA sont similairement centrés sur T_{c} , T_{sk} et la température de surface des vêtements. Le modèle MEMI se diffère de COMFA dans l'estimation du métabolisme et du taux de la sueur par âge et sexe, ainsi que par les températures T_{cl} et T_s . Ces deux paramètres se diffèrent du modèle de Gagge (1971) par rapport au calcul du taux de la sueur ; la surface corporelle, la densité du flux sanguin allant du noyau central vers la peau, la densité du sang et la capacité calorifique spécifique du sang, dans le calcul du flux thermique du noyau central vers la peau (Hoppe, 1999). Même si COMFA n'utilise pas certaines informations spécifiques, sa capacité à prédire précisément la sensation thermique des usagers a été démontrée par Kenny et al. (2009a, b) pour des taux modérés de métabolisme et de sueur. (Vanos, 2011).

Le calcul du PET est précédé par la simulation numérique des différents espaces publics par le modèle Envi-met. Les fichiers ATM générés sont par la suite utilisés par un autre modèle développé par le même groupe Biomet. Les résultats du PET obtenus sont visualisés par Leonardo.

Tableau 7.6 : Valeurs PET enregistrées à 09h le 1^{er} juillet 2014

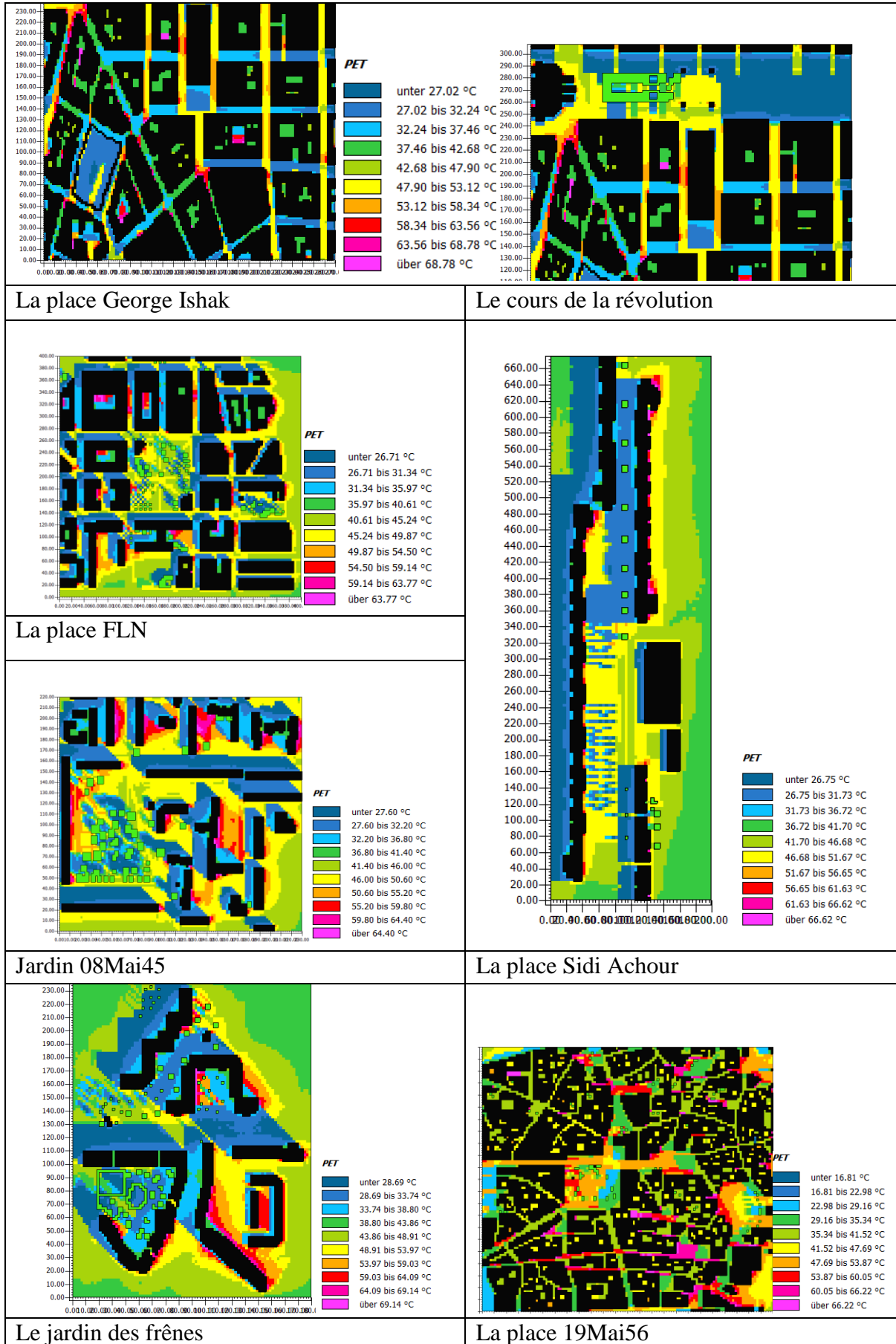
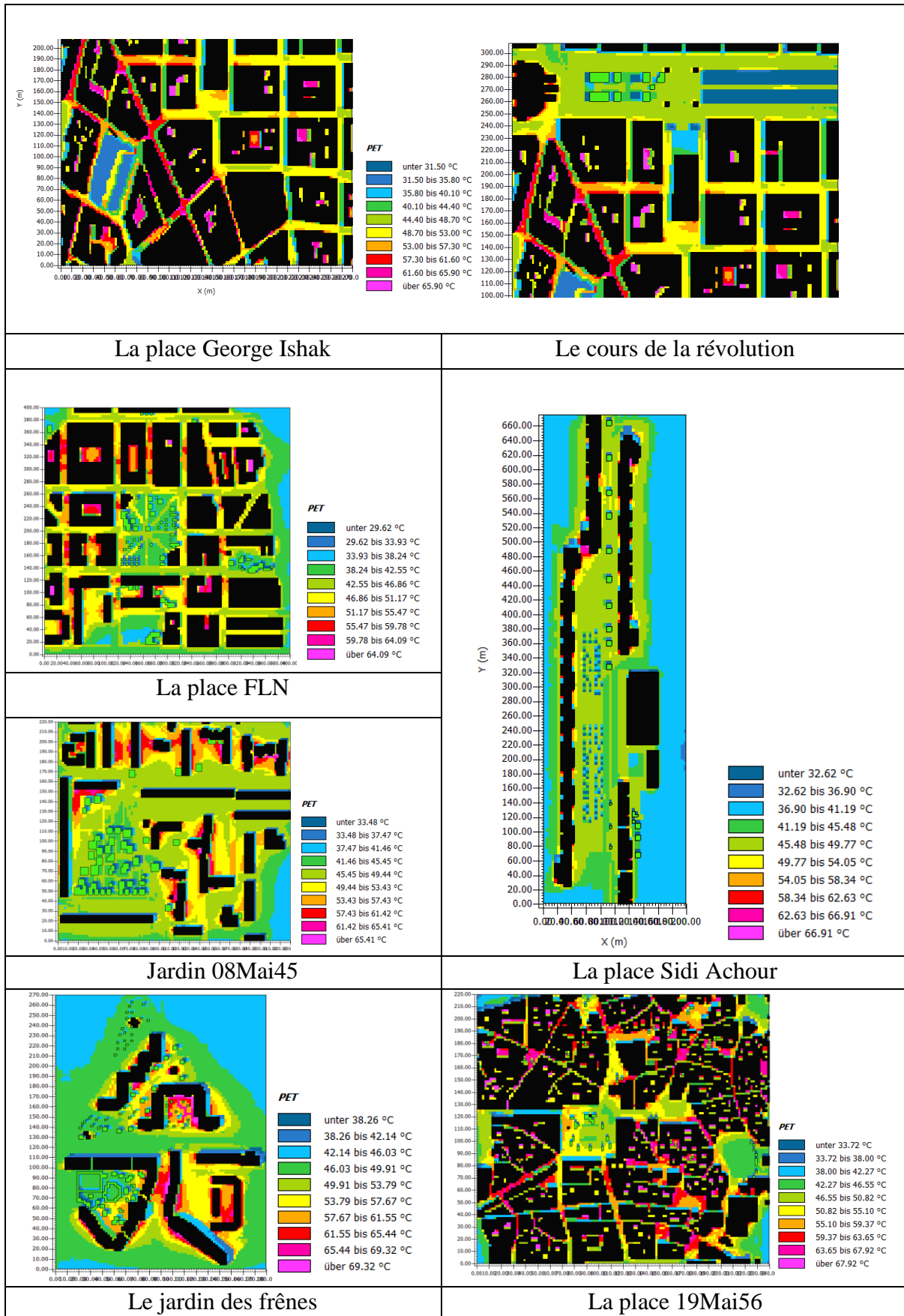


Tableau 7.7 : Valeurs PET enregistrées à 13h le 1^{er} juillet 2014



7.5. Calibration des indices du confort : COMFA+* et PET :

Pour étudier le confort thermique, les intervalles des indices du confort thermique extérieur doivent être considérés en fonction de la zone urbaine étudiée et ne pas se référer uniquement à des valeurs universelles. En effet, pour pouvoir appliquer ces indices à Annaba, il est important de les calibrer en fonction de la sensation subjective du confort thermique des usagers afin de tenir compte des effets de l'acclimatation et de l'adaptation (Katzschner, 2004).

Avant de discuter les résultats obtenus à travers les différents espaces publics, les deux indices du confort : PET et COMFA+* étaient calibrés. Les différents intervalles ont été définis en fonction des données météorologiques recueillies à partir des mesures et des entretiens réalisés lors de nos investigations. Chaque indice a été comparé à six valeurs (investigation s'est déroulée pendant l'été). La calibration a été effectuée en modifiant les limites des intervalles de chaque indice afin de minimiser la différence entre la sensation thermique exprimée par les usagers et celle prédite (tableau 7.8).

Tableau 7.8. La calibration du PET et COMFA+*.

PET	COMFA+*	Interprétation
17 to 22	-50 to +50	Un peu froid
22 to 27	+50 to +100	Neutre
27 to 33	+100 to +150	Un peu chaud
33 to 37	+150 to +200	Chaud
37 to 42	+200 to +250	Très chaud
>43	>250	Extrêmement chaud

Pour être en mesure de comparer la distribution spatiale des usagers et la situation microclimatique correspondante, une équipe d'enquêteurs et de personnes responsables des mesures mobiles à travers les différentes zones ont été mobilisée. Cette approche inspirée des travaux Katzschner, nous a permis d'attribuer aux données objectives, une calibration basée sur des données empiriques.

Selon Katzschner (2010), la régression linéaire ne peut être utilisée dans la calibration. En effet suite à l'hypothèse que les échelles de mesure des différentes catégories (extrêmement chaud, très chaud, chaud, légèrement chaud, confortable, légèrement froid) ont des intervalles différents. Ce qui signifie que la marge définie pour très chaud et chaud est différente de la marge définie pour chaud et légèrement chaud (figure 7.3).

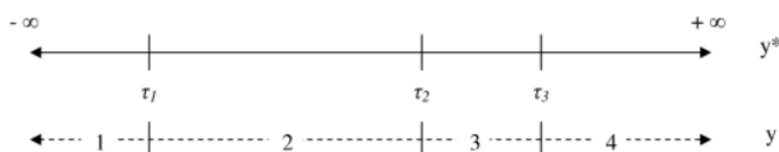


Figure 7.3: Visualisation des différences entre les points de coupes des intervalles en fonction des réponses des usagers (d'après Nonnenmacher, 2005 in Katzschner, 2010),

Les résultats obtenus de la calibration montrent que la zone du confort du PET correspond à 22°C à 27°C alors qu'elle correspond à +50 to +100 W/m² pour COMFA+* (tableau 7.8).

7.6. Résultats et discussions :

7.6.1. La place 19 mai 56 :

Cette placette est inscrite dans un tissu traditionnel dense. Le rapport H/W=0,24. Elle est entourée par quatre parois B1, B2, B3 et B4, orientées Est, Sud, Ouest et Nord respectivement (figure 7.4).

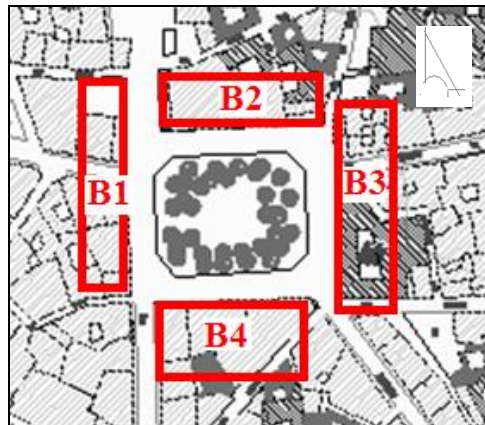


Figure 7.4 : Orientation des parois B1, B2, B3 et B4 dans la place 19 mai 56.

La quantité du rayonnement direct et diffus reçu varie le long de la journée. On enregistre 605wh/m² à 8h et 41wh/m² à 15h pour le rayonnement direct et 173wh/m² et 156wh/m² en rayonnement diffus respectivement.

Cette quantité est non uniformément distribuée à travers les différentes parois. La partie supérieure de la paroi B2 reçoit 224wh/m² alors que la partie inférieure ne reçoit que 175wh/m² à midi. Respectivement B3 reçoit 220wh/m² et 147wh/m² à midi et B1 reçoit 230wh/m² et 173wh/m².

La quantité du rayonnement direct reçu par le sol le matin est variable. La quantité la plus importante (611wh/m²) est obtenue pour les zones les plus exposées (SVF=0,72). La valeur minimale (68wh/m²) est enregistrée dans la partie Est où une grande quantité est obstruée grâce à l'effet d'ombre de la paroi B4.

Le même scénario se reproduit pendant l'après-midi. Seulement 69wh/m² de rayonnement direct est reçu à 15h dans la zone ouest proche de la paroi B2. Cette quantité augmente dans les zones les plus exposées pour atteindre 620wh/m².

La répartition du rayonnement diffus est soumise à la configuration spatiale de la place. 72wh/m² est enregistrée dans les zones proches des parois et 126wh/m² en s'éloignant.

En ce qui concerne le confort, les valeurs obtenues de COMFA+* varient de 150w/m² à 200w/m² le matin, traduisant une sensation de légèrement chaud à chaud. Elles atteignent 250w/m² au début de l'après-midi (vers 13h). Ces valeurs traduisent l'impact du rayonnement

et l'effet des multi-réflexions générées par les parois qui entourent cet espace public. A 9h la paroi B4 (Est) reçoit 517wh/m² en rayonnement direct et 124wh/m² en rayonnement diffus. La paroi B1 (Ouest) reçoit 524wh/m² en rayonnement direct et 142wh/m² en rayonnement diffus l'après-midi. Ces parois ont une texture rugueuse et dégradée, l'albédo est de 0,3.

Au début de la journée, on remarque que seulement 30% de la place est confortable. On enregistre des valeurs qui varient de 120w/m² à 150w/m² pour COMFA+* et 22,98°C à 29,16°C pour PET.

Ces valeurs augmentent en se rapprochant des parois à cause de l'effet des multi-réflexions.

L'après-midi les zones du confort s'amenuisent en faveur des zones d'inconfort. Les zones proches des arbres (7%), présentent des zones légèrement chaudes avec un COMFA+* = 130w/m². Les zones chaudes présentent 10% (COMFA+*=190w/m²) et 83% sont des zones très chaudes dont COMFA+* dépasse 220w/m². Les valeurs du PET enregistrées à 13h dépassent 44°C (extrêmement chaud) pour plus que 85% de la surface de la place. Des valeurs inférieures à 38°C sont obtenues pour les zones proches des arbres est des deux parois Est et Ouest.

Les valeurs obtenues du PET pour les rues sont proportionnelles à L'orientation est le rapport longueur largeur. Deux coupes ont été effectuées selon les deux axes : Nord/Sud et Est/Ouest afin de mettre en évidence l'impact de l'orientation et rapport H/W sur le confort extérieur.

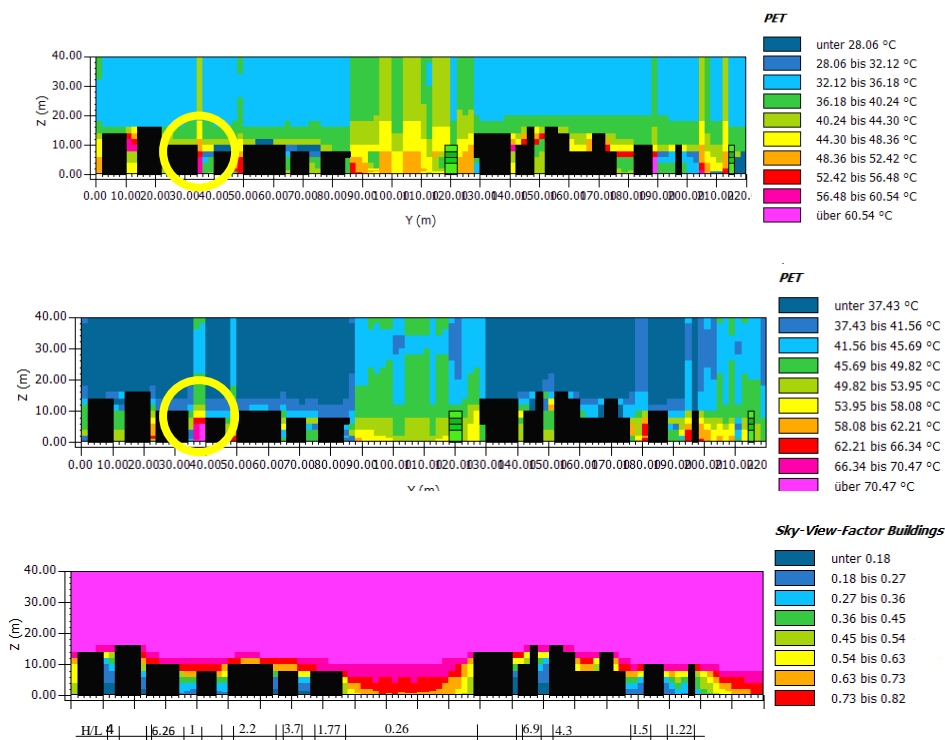


Figure 7.5 : Coupe aa N/S a 9h et 15h

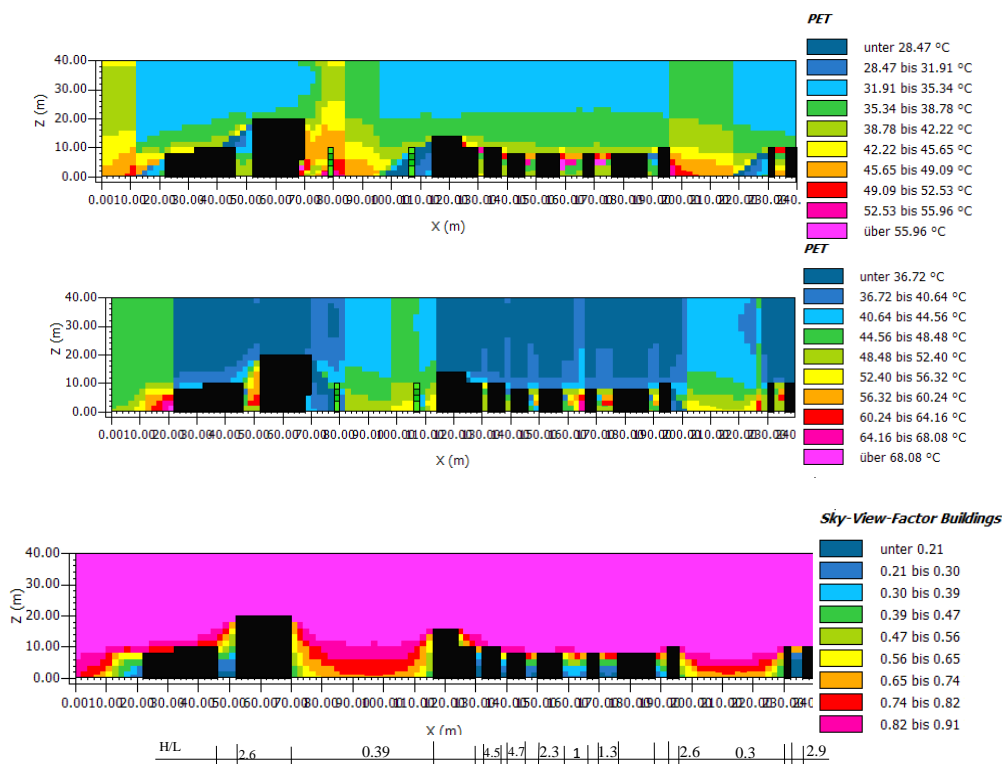


Figure 7.6 : Coupe bb E/O a 9h et 15h

La coupe aa(axe N/S) traverse généralement les rues qui ont une orientation E/O. Le facteur de vue de ciel varie de 0,13 à 0,31 pour les rues étroites. Il atteint 0,68 au niveau des deux espaces ouvert (Figure 7.5). Ces derniers enregistrent les valeurs les plus importantes du PET. Une valeur de 47,69°C est obtenue le matin et 49,88°C le soir. Cependant cet indice de confort varie de 29,16°C à 35,34°C le matin et de 35,7°C à 45,16°C le soir au niveau des rues.

La comparaison des températures de surface des façades Est et Ouest dans certaines rues, montrent deux pics : un maximum lorsque la façade est ensoleillée et un pic secondaire lorsque la façade opposée voit le soleil. Ce dernier est dû au phénomène d'inter-réflexion des flux infrarouges entre les deux façades (montré en cercle jaune sur la figure 7.5).

L'effet de l'orientation est marqué à travers les résultats du PET obtenus vers 15h du soir. Une différence de 10°C est obtenue entre les rues orientées N/S et celles orientées E/O (figure 7.6).

7.6.2. Le Cours de la révolution :

Cet espace se présente sous une forme allongée selon un axe Est/Ouest, délimité par deux parois : B2 orientée Ouest et une paroi B4 orientée Est. Le rapport H/W est de 0.24. La paroi B2 reçoit la quantité du rayonnement maximale vers 15h (546wh/m²). Cette valeur est réduite à 121wh/m² pour les parties ombrées (ombre de la végétation). A 13h cette même paroi ne reçoit que 228wh/m² en rayonnement direct à travers toute la surface. En ce qui concerne le rayonnement diffus, les parties non ombragées de la paroi B2 reçoivent une quantité

maximale de 404wh/m^2 à midi. Cette valeur est réduite à 305wh/m^2 pour les parties ombragées.

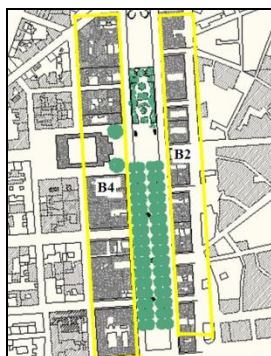


Figure 7.7 : Orientation des parois B2 et B4 dans le cours de la révolution.

La quantité du rayonnement direct maximale reçu par la paroi B4 est de 536wh/m^2 à 8h pour les parties exposées et 290wh/m^2 pour les parties ombragées. Le rayonnement diffus enregistré à 12h est de 278wh/m^2 et 135 respectivement.

A midi, la quantité du rayonnement direct reçu par le sol est de 890wh/m^2 . Elle varie en fonction de la végétation et les effets des deux parois.

A 9h presque la moitié du cours est protégée contre le rayonnement direct grâce aux arbres et la paroi B2 qui projette son ombre le long de la partie Est. Cependant la partie découverte reçoit 654wh/m^2 .

L'après-midi le même phénomène se reproduit pour la partie Ouest et Sud. La répartition du rayonnement montre une zone centrale qui reçoit 430wh/m^2 , la partie Sud 191wh/m^2 et la partie Nord 335wh/m^2 .

Les résultats obtenus de COMFA+* pour le cours de la révolution montre trois zones distinctes. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées au niveau de la partie Sud, elles sont peu variables on enregistre de -20 à $+40\text{w/m}^2$ le matin (à 09h) et de $+10$ à $+40\text{w/m}^2$ pendant l'après-midi. La partie centrale est celle qui développe les conditions les plus inconfortables, les valeurs enregistrées le matin atteignent 150w/m^2 à 09h et 180w/m^2 le soir. La troisième partie est celle qui se trouve au Nord du Cours, elle développe des valeurs rangeant de 50w/m^2 à 75w/m^2 le matin (vers 09h) et de 75 à 100w/m^2 vers l'après-midi (13h).

Les mêmes résultats sont obtenus pour le PET. La partie Sud développe des valeurs qui varient de 27°C le matin et $31,5^\circ\text{C}$ le soir. Le PET Obtenu pour la partie centrale est de $42,9^\circ\text{C}$ le matin et $44,4^\circ\text{C}$ l'après-midi. Ces valeurs sont de $32,24^\circ\text{C}$ le matin et $40,1^\circ\text{C}$ l'après-midi pour la partie Nord.

Les résultats obtenus de COMFA+* traduisent une ambiance assez confortable expliquée par :

L'effet de la végétation sur l'obstruction de rayonnement solaire ($\text{SVF}=0,41$) et la projection de l'ombre. Il est à signaler que la partie Sud du Cours est ombrée pendant 08 heures de la journée.

Le Cours jouit d'une bonne orientation (Nord /Sud), on remarque d'après les figures générées du PET que les voies qui sont parallèle au Cours sont les plus fraîches, comparées à celles qui lui sont perpendiculaires.

Les rues qui sont perpendiculaires à la mer permettent la pénétration des brises de mer à cet espace pendant les heures les plus chaudes de la journée.

7.6.3. La Place George Ishak :

Cette Place obéit à un tracé quadrillé, sa forme est proche d'un rectangle allongé selon un axe NO/SE.

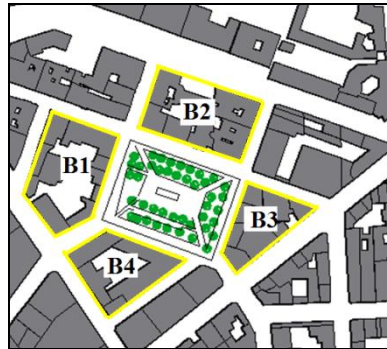


Figure 7.8 : Orientation des parois B1, B2, B3 et B4 dans la place George Ishak.

La quantité du rayonnement direct maximale reçu par les différentes parois B1, B2, B3, B4 est de 510wh/m², 248wh/m², 664wh/m² et 233wh/m² enregistré pendant les heures : 08h pour B1 et B4, 13h pour B2, 17h pour B3. Ces valeurs sont réduites à 57wh/m², 55wh/m², 74wh/m² et 132wh/m² pour les parties ombragées respectivement.

Les parties exposées des quatre parois reçoivent la quantité du rayonnement diffus maximale à 12h. Elle est de 96wh/m², 277wh/m², 106wh/m² et 331wh/m² respectivement. Les parties occultées n'en reçoivent que : 108wh/m², 364wh/m², 110wh/m² et 368wh/m² respectivement.

Au début de la journée une grande partie de la place est ombragée grâce aux arbres et la paroi B3, on enregistre 52wh/m² pour la partie ombragée à 08h et 454wh/m² pour la partie exposée.

Au milieu de la journée, une grande partie de la place se trouve exposée au rayonnement direct, on enregistre 840wh/m² à 12h.

Ces surfaces commencent à se diminuer en faveur des zones ombragées au début de l'après-midi. On enregistre 69wh/m² pour les zones proches des arbres et de la paroi B1 et 620wh/m² pour le reste. Le rayonnement diffus est de 99wh/m² pour les parties exposées et 66wh/m² pour les parties proches des arbres et des bâtiments. Les résultats obtenus dans la place George Ishak montrent l'effet de la végétation sur le confort extérieur, on enregistre des valeurs qui varient de -50 w/m² à 0 w/m², ces résultats justifient le grand nombre des usagers dans cet espace urbain.

Les valeurs du PET enregistrées à la place George Ishak sont supérieures à celles enregistrées dans le cours de la révolution. Ces résultats sont expliqués par la différence dans l'orientation. On remarque que même les voies qui sont orienté NO/SE (semblables à la place George Ishak) enregistrent des valeurs de PET bien supérieures à celles orientées N/S. La différence

peut atteindre 9,4°C. Similairement au site précédent deux coupes ont été effectuées le long des axes N/S et E/O (figure 7.9 & figure 7.10).

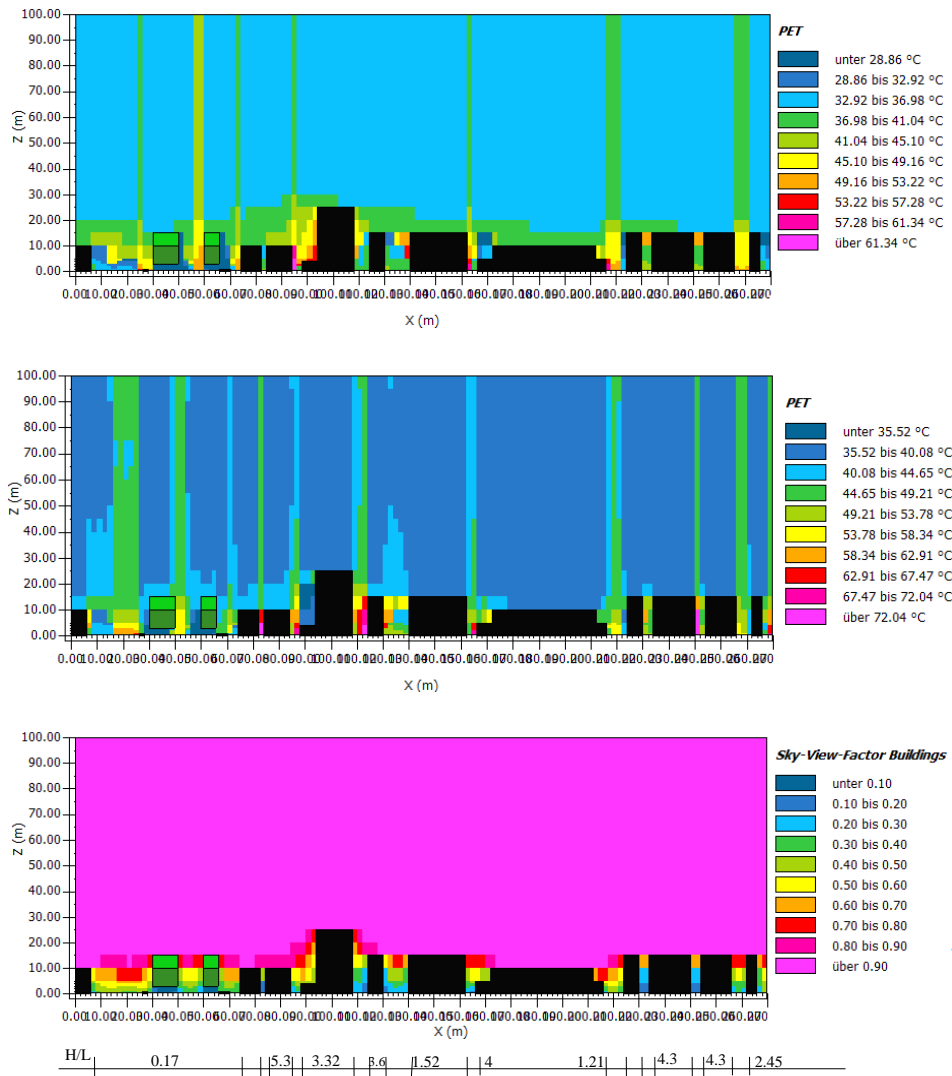


Figure 7.9 : Coupe aa N-S a 09h et 15h.

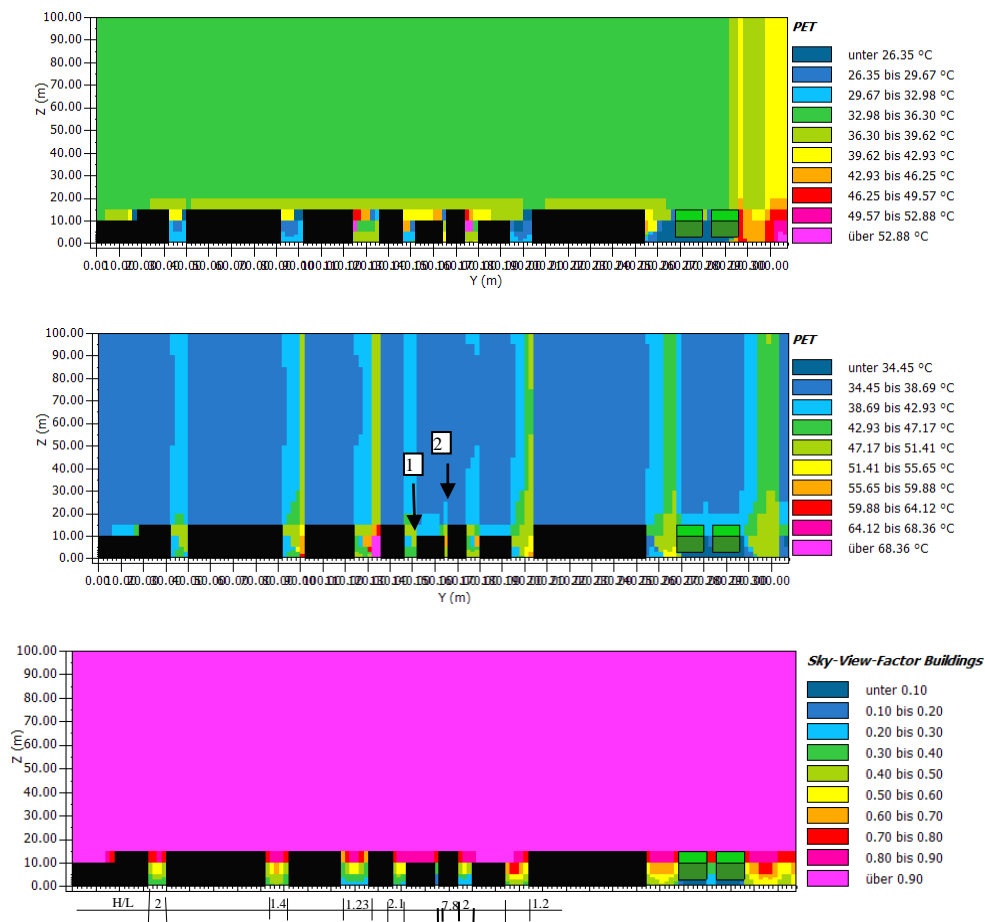


Figure 7.10 Coupe bb E-O a 09h et 15h

Les deux coupes tracées selon l'axe N/S et l'axe E/O montrent la variation des conditions du confort thermique selon l'orientation et le rapport d'aspect H/W. Les valeurs du PET enregistrées au niveau des rues orientées E/O varient de 47,90°C à 53,12°C le matin et de 48,68°C à 54,50°C le soir. Cependant dans les rues orientées N/S, les valeurs obtenues varient de 27,02°C à 32,24°C le matin et de 39,04°C à 43,86°C le soir. En ce qui concerne le rapport d'aspect H/W, on a remarqué dans certaines rues que les valeurs du PET décroît avec l'augmentation de ce rapport. Les rues dont le rapport H/W varie de : 2, 1.4 et 1.2, les valeurs obtenues du PET à 15h étaient : 38.69°C, 42.93°C et 47.17°C respectivement. Cet effet n'apparait pas dans les rues qui ne sont pas symétriques (qui n'ont pas la même hauteur de bâtiment). Dans ces cas c'est l'orientation du bâtiment le plus haut qui a la plus grande influence sur les conditions du confort. On observe qu'au niveau des points 1 et 2 (figure7.10), malgré que le rapport H/W soit de 2.16 pour le point 1 et de 7,84 pour le point 2 le PET obtenu est de 42.93°C dans le point 1 et 47.17°C dans le point 2.

7.6.4. La place FLN (Champs de Mars) :

Elle obéit à un tracé orthogonale, sa forme est proche d'un carrée dont le rapport H/W= 0,13, délimitée par les parois B1, B2, B3 et B4 orientées respectivement SE/ SO/ NO et NE.

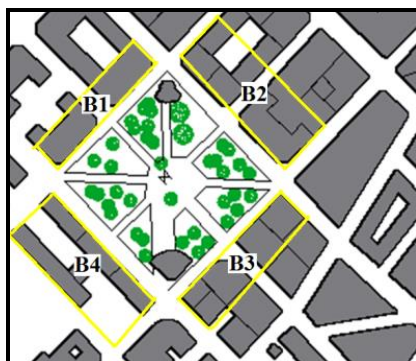


Figure 7.11 : Orientation des parois B1, B2, B3 et B4 dans la place la place du FLN.

La quantité du rayonnement direct maximale reçu pendant la journée est de : 479wh/m², 433wh/m², 424wh/m² et 477wh/m² enregistrés respectivement pendant les heures : 07h, 09h, 15h et 17h respectivement. Ces valeurs se réduisent à 373wh/m², 144wh/m², 424wh/m² et 477wh/m² respectivement pour les parties occultées des parois.

Le rayonnement diffus maximal est de 133wh/m², 392wh/m², 393wh/m² et 401wh/m² respectivement enregistré à 12H.

L'observation de la répartition du rayonnement solaire direct au niveau du sol montre que au début de la journée la partie NE et SE de la place sont protégée du rayonnement grâce aux deux parois B2 et B3 ainsi que les arbres. Les autres parties exposées reçoivent jusqu'à 452wh/m² de rayonnement direct à 08H. L'après-midi la partie la moins exposée au rayonnement correspondent à celle près des deux parois B1 et B4.

A midi une grande partie de la place est exposée au rayonnement direct, sa valeur atteint 840wh/m².

La répartition du rayonnement diffus est beaucoup plus dépendante de la présence de la végétation. Les zones qui sont plus ou moins dense divulguent une valeur de 56wh/m² à 12H. Les parties découvertes enregistrent une quantité de 112wh/m² à 12H.

Ayant une géométrie plus ou moins ouverte caractérisée par un SVF important, la place du champ de mars présente des zones de confort chaudes en s'éloignant des arbres. Les résultats obtenus de COMFA+* divulguent des zones qui varient de légèrement chaud à chaud (120w/m² à 200w/m²) réparties comme suit : 15% dont les valeurs sont entre 120wh /m² à 180wh/m², 10% dont les valeurs varient de 190wh/m² à 200wh/m² et 75% dont les valeurs varient de 200wh /m² à 220wh/m².

A midi les valeurs obtenues de COMFA+* varient de légèrement chaud à très chaud. Les zones proches de la paroi B3 enregistrent des valeurs entre 120w/m² et 140w/m². 70% des

zones enregistrent des valeurs de 220w/m² à 240wh/m² (très chaud). Environ 20% des zones enregistrent des valeurs entre 180w/m² à 200w/m² (chaud).

Les résultats du PET sont semblables à celles du COMFA+* avec des valeurs plus élevées. Le matin une grande partie de la place est inconfortable. PET enregistré dans plus que 70% de la place est supérieur à 40,61°C, qui correspond à une sensation chaude.

En comparant la coupe **aa** projetée selon l'axe NO/SE et la coupe **bb** projetée selon l'axe NE/SO (figure 7.11), on remarque que les conditions du confort sont similaires pour les deux orientations le matin. En ce qui concerne le SVF, dans la rue où cet indice est de 0.42, le PET est 31.34°C. Toutefois, dans la rue où ce rapport est de 0.61 le PET dépasse 49°C.

Durant l'après-midi, grâce aux bâtiments orientés NE (effet d'ombre), les conditions de confort sont plus améliorées dans les rues orientées NO/SE que dans les rues orientées NE/SO. On enregistre 36.16°C et 45.64°C respectivement.

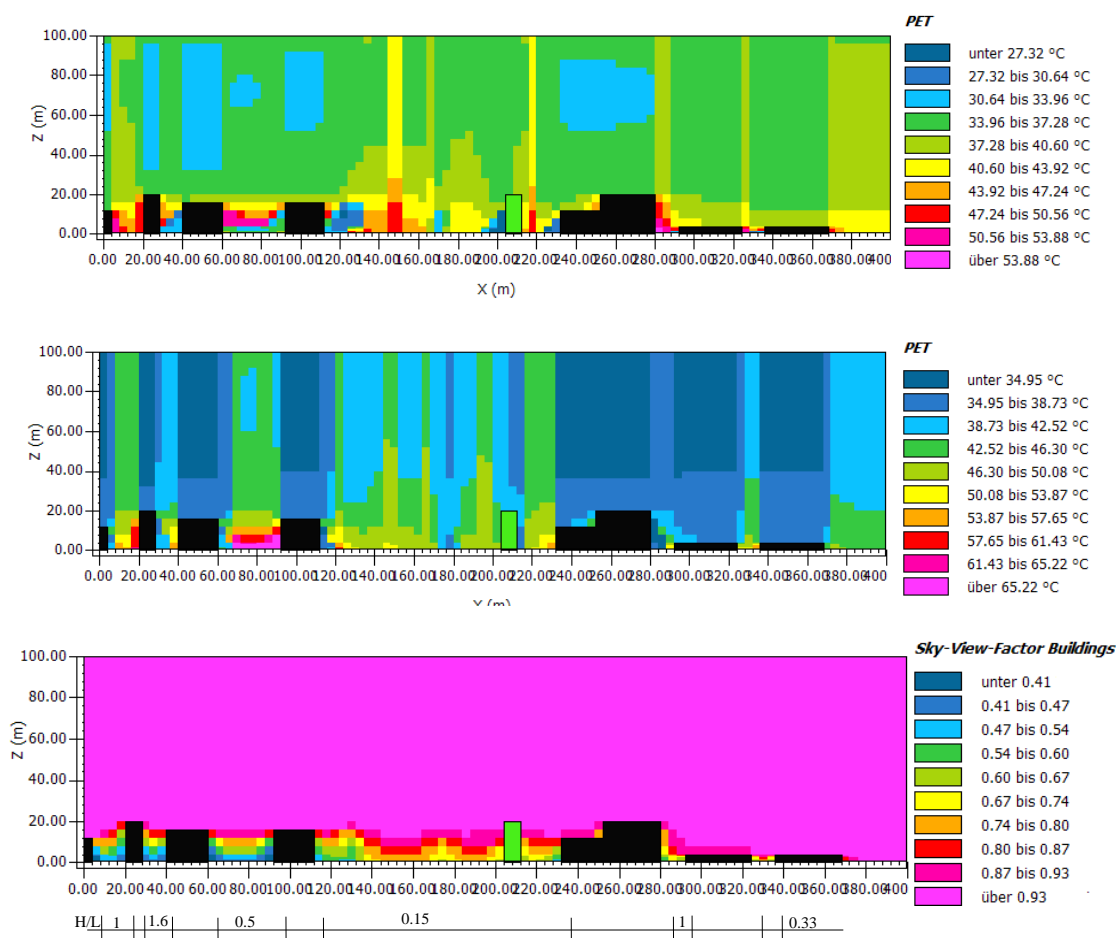


Figure 7.11 Coupe **aa** SE-NO à 9h et 15h

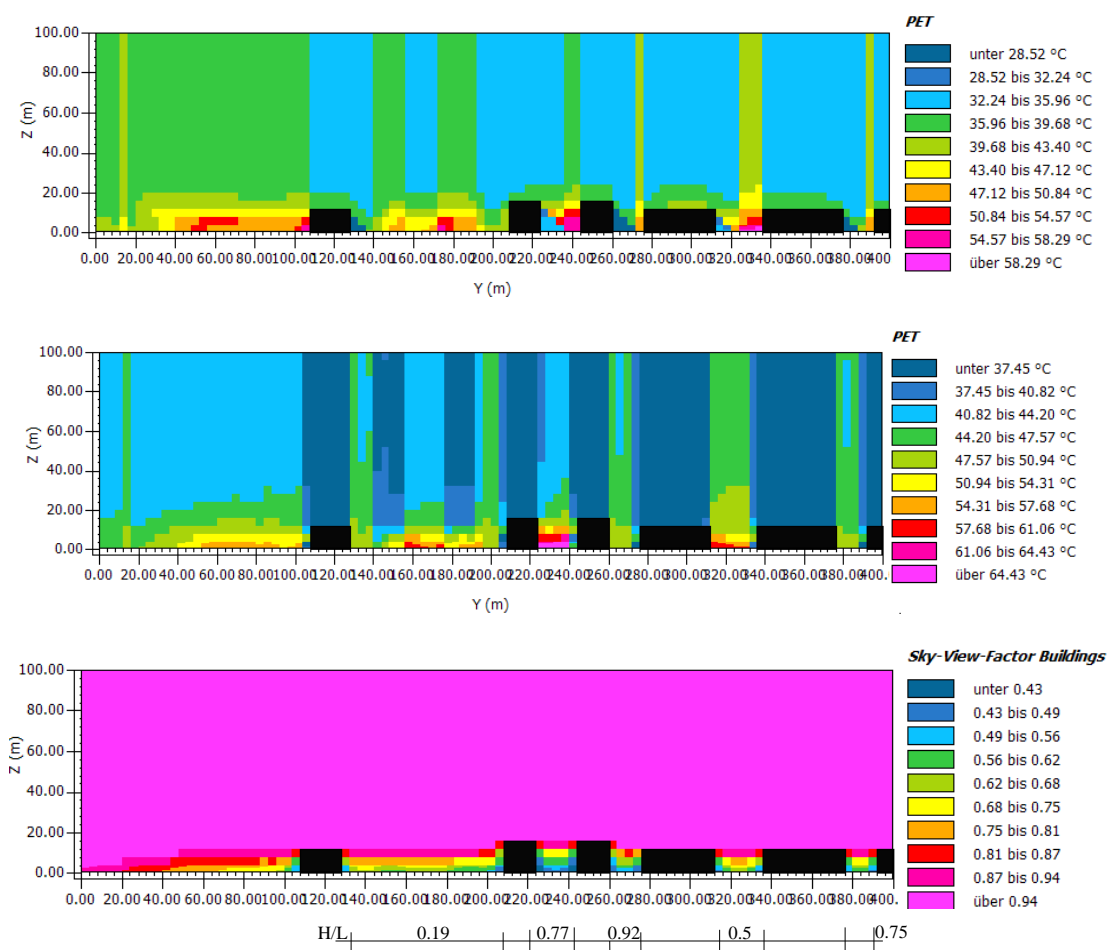


Figure 7.12 : Coupe **bb** SO-NE à 9h et 15h

7.6.5. Le jardin des frênes :

Le jardin des frênes est un îlot semi ouvert, entouré de trois parois : B2, B3 et B4, orientées SE, SO et NE.



Figure 7.13 : Orientation des parois B2, B3 et B4 dans le jardin des frênes.

La quantité du rayonnement direct maximale reçu pendant la journée est de 340wh/m², 606wh/m² et 217wh/m² enregistré pendant 09h, 12h et 17h respectivement.

La quantité du rayonnement diffus reçu par ces parois est de 313wh/m^2 , 298wh/m^2 et 269wh/m^2 enregistrée à midi respectivement.

Le jardin des frênes reflète l'effet combiné de la présence de la végétation, l'ouverture au ciel ainsi que les couloirs de ventilation créés par des passages sous les bâtiments. Cet espace urbain jouit d'une ambiance thermique confortable traduite par les valeurs obtenues où on enregistre des valeurs de -100 w/m^2 à 0 w/m^2 .

Au début de la journée seulement une petite partie du sol qui est exposée au rayonnement direct. On enregistre seulement 67wh/m^2 dans les zones ombragées sous l'effet de la paroi B3 et la végétation. La même observation est retenue pour l'après-midi grâce à la végétation et les autres parois B2 et B4. Cet effet est disparu à midi où l'en observe que seulement la partie Sud qui est légèrement protégée grâce à la paroi B4.

La lecture de la distribution du rayonnement diffus montre une zone centrale recevant le plus de rayonnement, on enregistre 72wh/m^2 à midi et une autre zone périphérique recevant 45wh/m^2 . La répartition des zones de confort le matin selon COMFA+* varie de légèrement frais ($TB > +50\text{w/m}^2$) à légèrement chaud ($TB > 100\text{wh/m}^2$). Selon cet indice, ce jardin est confortable pendant toute la journée. Les valeurs les plus importantes obtenues de COMFA+* est 150wh/m^2 (légèrement chaud).

Les résultats du PET sont semblables à COMFA+* seulement pour le matin. D'après cet indice des zones d'inconfort apparaissent pendant l'après-midi, on enregistre 40°C à 15h.

7.6.6. Jardin 8Mai 45 :

La forme du jardin est trapézoïdale, bordé de trois parois : B1, B2 et B4, orientés Sud-est, Nord-est et Nord-ouest respectivement.

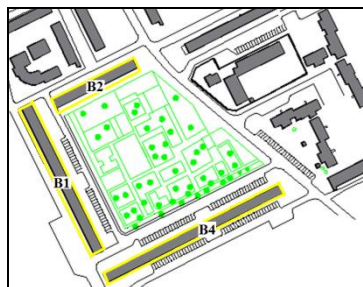


Figure 7.14 : Orientation des parois B2, B3 et B4 dans le jardin du 8Mai 45.

La quantité du rayonnement direct maximal reçu par les différentes parois est de : 367kw/m^2 , 578kw/m^2 et 308kw/m^2 enregistré respectivement pendant : 10h, 07h et 17h. La quantité de rayonnement diffus maximale reçue à 12h est de : 390wh/m^2 , 400wh/m^2 et 354kw/m^2 respectivement.

La quantité du rayonnement reçu par le sol est variable, elle dépend des arbres et des bâtiments. Au début de la journée, dans la partie Sud-Est une quantité du rayonnement est obstruée par la paroi B4, on enregistre 73kw/m^2 . Les parties découvertes reçoivent 654wh/m^2 .

Les parties proches des deux parois B1 et B2 enregistrent 73wh/m^2 pendant l'après-midi, alors que les autres parties découvertes reçoivent 653kw/m^2 à 15h.

Pareillement, la distribution du rayonnement diffus varie en fonction de la configuration de cet espace. Les parties proches des bâtiments et des arbres n'en enregistrent que 286kw/m^2 , les parties découvertes reçoivent 430kw/m^2 .

Selon les valeurs obtenues de COMFA+* et PET au début de la journée, ce jardin est réparti en plusieurs zones de différents niveaux de confort. La zone neutre présente 30% du jardin (TB= 100w/m^2 , PET= $27,6^\circ\text{C}$ à 09H). Elle correspond à la partie proche du bâtiment B4 (orienté Nord-ouest) et des arbres.

Les zones légèrement chaudes occupent 30% selon COMFA+*, on enregistre 150w/m^2 , cette zone ne représente que 5% selon les résultats du PET (27°C).

Les zones chaudes et très chaudes occupent 40% selon COMFA+*, on enregistre des valeurs qui rangent de 200w/m^2 à 250w/m^2 . Les valeurs obtenues de PET dépasse $45,49^\circ\text{C}$, elles correspondent à une sensation extrêmement chaude. Pendant l'après-midi, ces valeurs augmentent, ainsi 80% du jardin devient inconfortable et extrêmement chaud, PET $>48^\circ\text{C}$.

Les résultats obtenus de COMFA+* ont révélé une zone très chaude qui occupe 30% de cet espace dont les valeurs du TB varient de 200w/m^2 à 300w/m^2 . La zone confortable occupe 30% avec une valeur de 100w/m^2 et une zone chaude dont les valeurs varient de 150w/m^2 à 200w/m^2 .

7.6.7. La place de Sidi Achour :

Elle se présente sous une forme rectangulaire allongée selon un axe Nord/Sud, d'un rapport H/W =0,59, entourée par les parois B1, B2, et B3 orientés Est, Sud et Ouest respectivement.

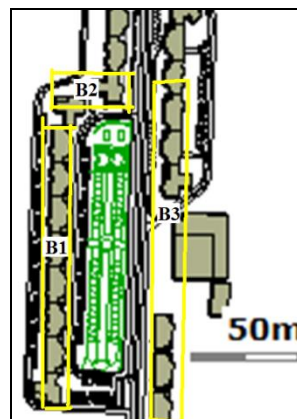


Figure 7.15 : Orientation des parois B1 et B3 dans la cité Sidi Achour.

La quantité du rayonnement direct maximale reçue par les parois est de : 604wh/m^2 , 214wh/m^2 et 606wh/m^2 enregistré respectivement pendant : 08h, 12h et 16h.

La quantité du rayonnement diffus maximale est de : 409wh/m^2 , 364wh/m^2 et 350wh/m^2 respectivement à 12h.

Au début de la journée, le tiers de la place est protégé du rayonnement direct grâce aux tours qui se trouvent à l'Est de la place. On enregistre 50wh/m² comparé à 454kw/m² pour les autres parties exposées à 08h.

L'après-midi cet effet augmente pour atteindre la moitié de la place. 523wh/m² est reçu par les parties exposées et 58wh/m² par les parties protégées à 16h.

La quantité maximale du rayonnement direct et diffus est reçue à midi, on enregistre 840wh/m² et 129wh/m² respectivement au centre de la place. La quantité du rayonnement diffus et non uniformément répartie, la zone périphérique ne reçoit que 72wh/m².

En ce qui concerne l'évaluation des conditions du confort, la place de Sidi Achour développe des zones de confort contrastées. Les parties proches des bâtiments présentent des valeurs qui ne dépassent pas +60 w/m². Elles correspondent à une sensation de confort (tableau 7.5). Pour les parties plutôt exposés, le bilan d'énergie peut atteindre +200 w/m². Cette valeur exprime une sensation de chaleur.

Quoique les deux indices dévoilent des zones inconfortables le matin, un écart important est remarqué entre les résultats de COMFA+* et PET. A 10H COMFA+* affiche des zones qui varient de légèrement chaud à chaud, les valeurs rangeaient entre 60w/m² à 200w/m². Les valeurs du PET dépassent 46°C pour plus que 80% des zones et qui reflètent une sensation extrêmement chaude.

L'après-midi on remarque l'apparition d'une zone confortable longeant la paroi B1, orienté Est. Les valeurs enregistrées rangent entre 50w/m² et 100w/m² pour COMFA+* et 32,51°C à 37,01°C pour le PET. Elle occupe 25% de la place. L'effet de la végétation n'était pas très important vu la taille des arbres.

7.7. **Modélisation des indicateurs morphologiques à l'échelle des espaces publics :**

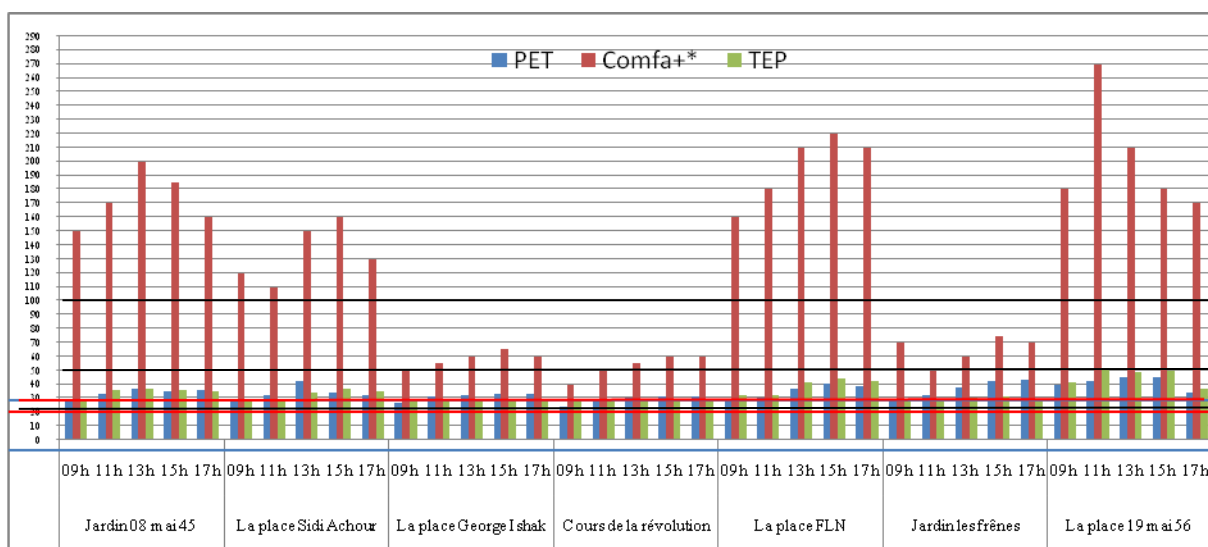


Figure 7.16 : Variation du confort à travers les différents espaces publics.

Généralement en comparant les résultats obtenus des deux modèles numériques COMFA+* et PET, avec l'indice empirique, on observe que les trois indices révèlent des conditions de confort plus ou moins favorables dans le cours de révolution et la place George Ishak. Comparés à TEP, une légère sur estimation est observée par rapport à l'indice PET, contrairement à COMFA+* où les valeurs obtenues étaient inférieures à TEP.

En outre, comme a été remarqué précédemment, une divergence est observée entre les trois indices par rapport au jardin des frênes où les valeurs du PET sont au-dessus de la zone de confort.

Cette sur-estimation a été signalée à travers d'autres chercheurs. A titre d'exemple, Sasaki et al (2009) ont comparé entre SET* et PET suite à des investigations et des questionnaires appliqués sur 10 sujets conjugués à des mesures à travers 05 points de la ville.

Bien que les deux indices étaient basés sur le bilan d'énergie, SET* était calculé en fonction du modèle à deux nœuds de Gagge, PET était basé sur un modèle MEMI. Les résultats obtenus du PET comparés à ceux obtenus aux questionnaires montraient une certaine surestimation de la sensation thermique. Les résultats du PET qui exprimaient une sensation chaude et froide correspondaient à une sensation de confort, ou un peu inconfortables de la sensation thermique actuelle ATS. Cette dissimilitude a été attribuée à l'influence de la température moyenne radiante sur PET où la valeur maximale du PET correspond à la valeur maximale de la température moyenne radiante. En plus l'influence de l'humidité et du vent n'était pas très significative.

Similairement, en comparant les résultats de la température moyenne radiante obtenue de nos investigations et ceux calculés par Envi-met on a trouvé une différence qui atteint 19°C. Il est à noter que dans le modèle Envi-met qu'on a employé la valeur de l'albédo et la valeur la résistance thermique « U » sont supposées égales pour l'ensemble des murs et des toits.

7.7.1. Impact du SVF sur le confort extérieur :

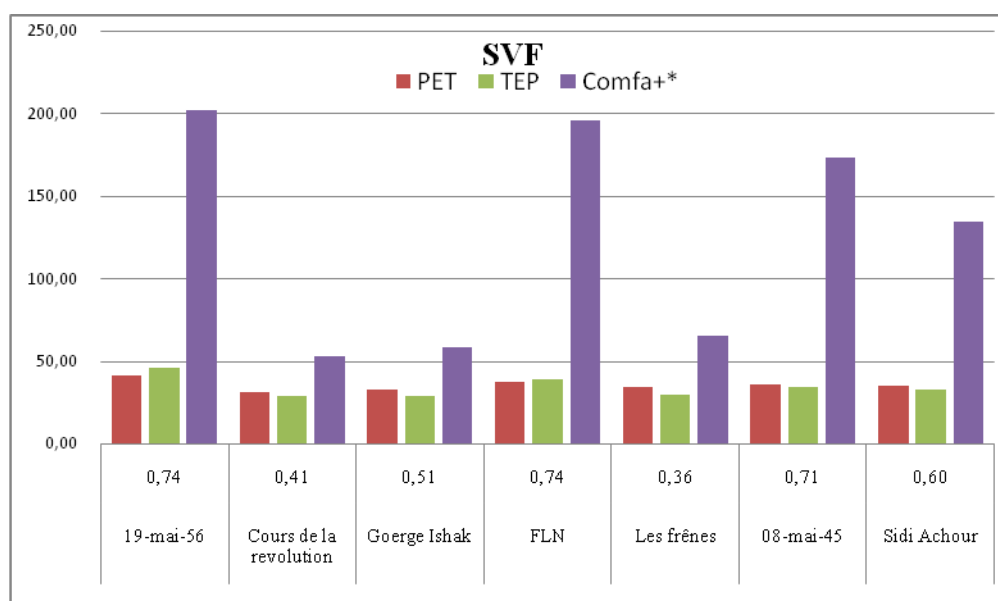


Figure 7.17 Impact du facteur de vue de ciel sur le confort extérieur.

Certaines études ont démontré une forte corrélation entre la température de l'air et le facteur de vue de ciel. Alors que d'autres ont démontré le contraire.

En comparant les valeurs obtenues du SVF et les différents indices de confort, on remarque que les valeurs les plus élevées correspondent aux valeurs les plus importantes des indices de confort. Pour un SVF de 0,74, on enregistre les valeurs : 202w/m² pour COMFA+*, 45,67°C pour TEP et 41,25 pour le PET.

Dans notre étude, la place du FLN et le jardin du 8mai45 présentent les espaces les plus ouverts et ont donc les conditions les moins confortables avec les valeurs les plus élevées pour TEP, PET et COMFA+*.

Le Cours de révolution et la Place George Ishak ont enregistré des valeurs de SVF les plus faibles de 0,41 et 0,51 respectivement et ont donc présenté les conditions thermiques les plus confortables.

Cependant pour le jardin des frênes qui a un SVF de 0,36, on enregistre 65w/m² pour COMFA+*, 29,37w/m² pour TEP et 36,61°C pour PET.

7.7.2. Impact de la durée d'ensoleillement/ durée d'ombre sur le confort extérieur :

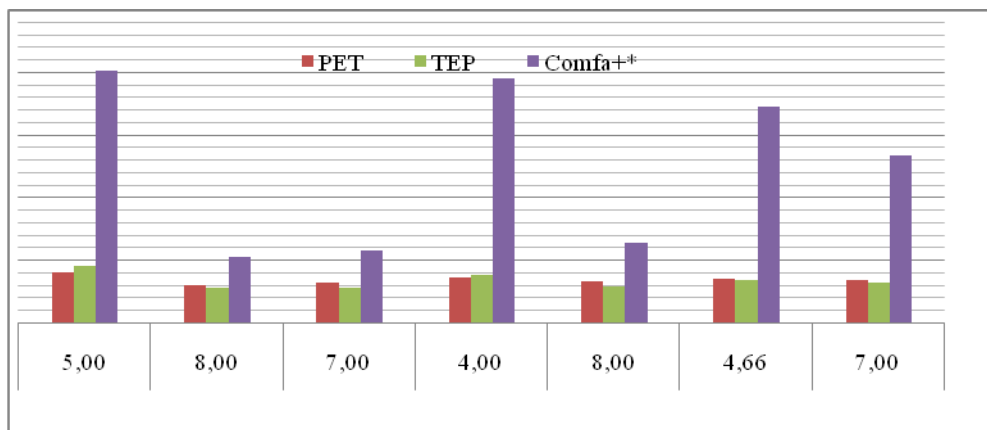


Figure 7.18 Impact de la durée d'ensoleillement sur le confort extérieur.

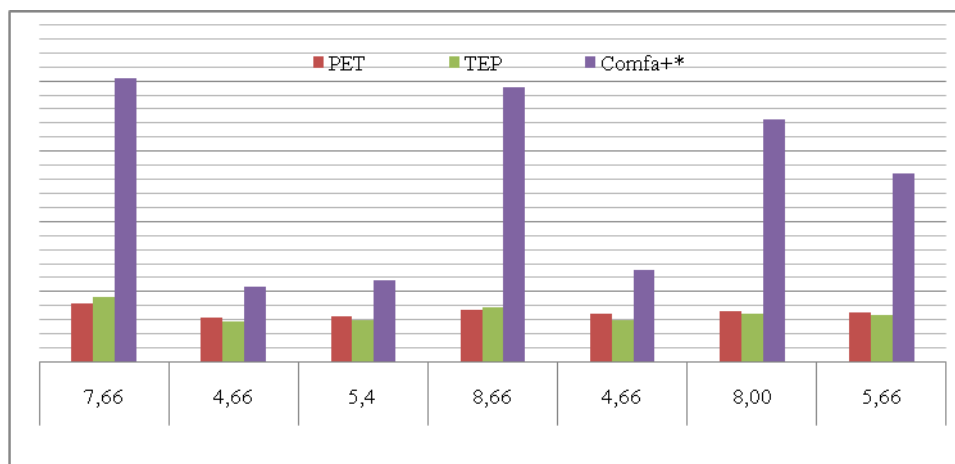


Figure 7.19 Impact de l'ombre sur confort extérieur.

La place du FLN et le jardin du 08mai45 présentent les espaces les plus ensoleillés dans notre étude, plus de 08heure d'ensoleillement sont obtenues. Les valeurs des indices de confort correspondantes sont 196w/m^2 , 173w/m^2 pour COMFA+*, $38,53^\circ\text{C}$, $34,39^\circ\text{C}$ pour TEP et $35,29^\circ\text{C}$, $33,95^\circ\text{C}$ pour PET respectivement.

En opposé, le cours de la révolution et le jardin des frênes présentent les deux espaces les plus ombrés (pour une durée de 08h de la journée). Malgré que la valeur obtenue du PET est au niveau des frênes est importante ($36,61^\circ\text{C}$), les autres indices de confort COMFA+* et TEP obtenus présentent les valeurs les plus faibles, et traduisent des conditions assez confortables. 65w/m^2 pour COMFA+* et $29,37^\circ\text{C}$ pour TEP sont calculées.

7.7.3. Impact de l'albédo relatif sur le confort extérieur :

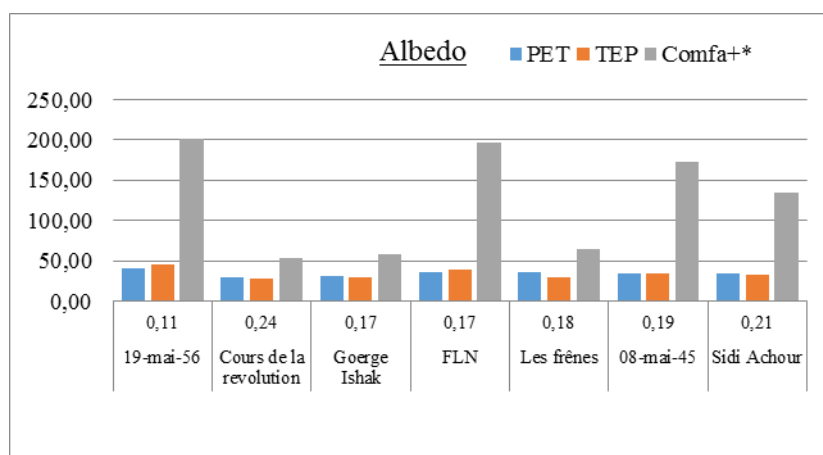


Figure 7.20 Impact de l'Albédo relatif sur le confort extérieur.

La comparaison entre les valeurs obtenues de l'albédo et les différents indices de confort montre que les valeurs les plus importantes de ces derniers sont obtenues pour l'albédo le plus faible (0.11 au niveau de la place du 19mai56).

On enregistre 202w/m^2 , $41,25^\circ\text{C}$ et $45,67^\circ\text{C}$ pour les indices COMFA+*, PET et TEP respectivement.

Cependant, malgré que la place de George Ishak dispose d'un albédo inférieur à celui de Sidi Achour, elle jouit de conditions thermiques plus agréables.

On enregistre 58w/m^2 , $31,34^\circ\text{C}$, $29,01^\circ\text{C}$ pour les indices COMFA+*, PET et TEP respectivement comparés à 134w/m^2 , $33,87^\circ\text{C}$ et $32,97^\circ\text{C}$ respectivement à Sidi Achour.

7.7.4. Impact du degré d'enclosure sur le confort extérieur :

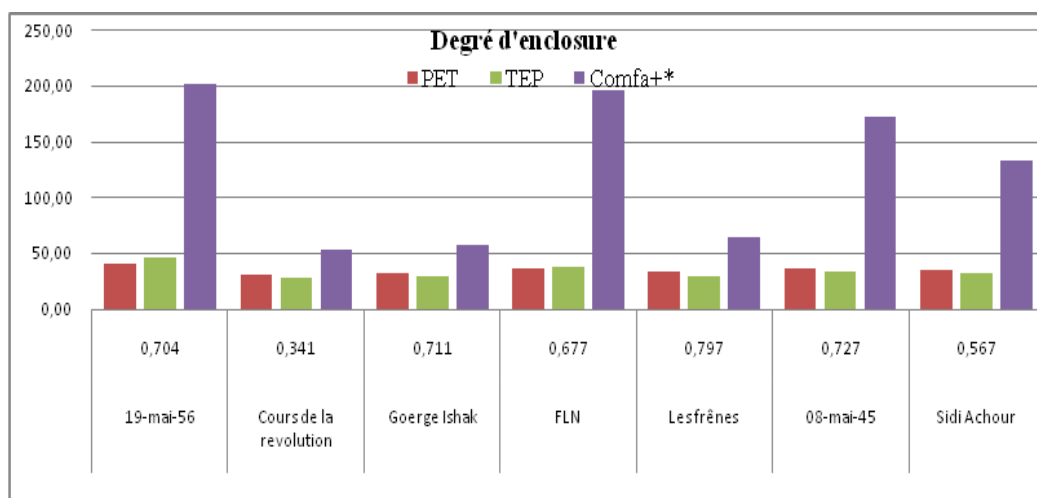


Figure 7.21 : Impact du degré d'enclosure sur le confort extérieur.

Dans cette recherche le degré d'enclosure n'était pas important, les valeurs calculées ne montraient aucun impact sur la variation des valeurs des indices du confort.

7.7.5. Impact de l'indice de végétation sur le confort extérieur :

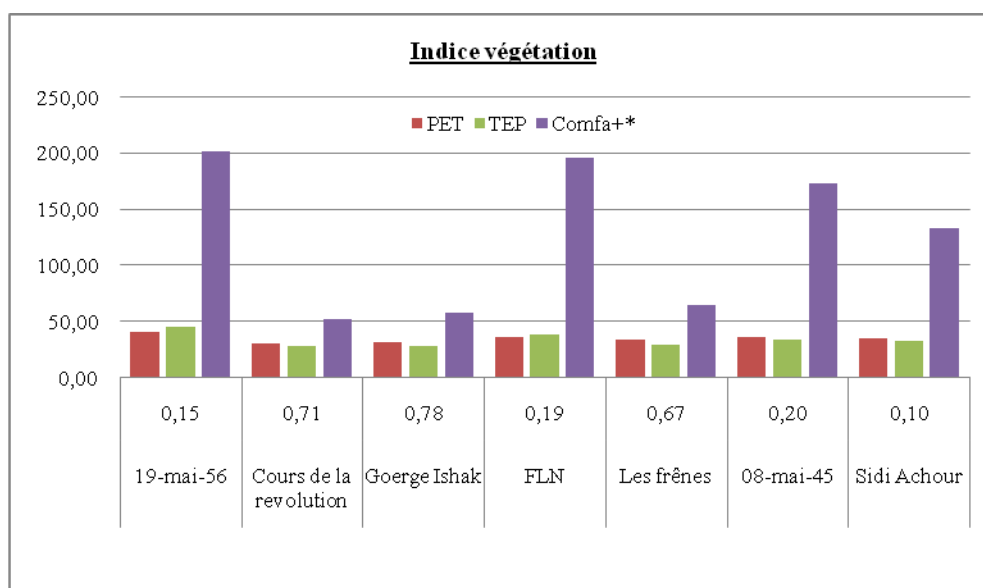


Figure 7.22 Impact de l'indice de végétation sur le confort extérieur.

L'impact de la végétation est bien notable dans cette recherche. En comparant l'indice de la végétation aux indices de confort calculés, les valeurs les plus importantes (0,71, 0,78) correspondent aux valeurs des indices les plus faibles. Les espaces à forte densité de végétation ont enregistré de faibles valeurs de PET et de COMFA+*.

En effet, la végétation peut modérer les conditions thermiques non seulement par l'ombrage et la réduction des températures de surface, mais aussi par le refroidissement par évaporation.

Les arbres interceptent non seulement le rayonnement solaire, mais également le rayonnement réfléchi à courtes longueurs d'ondes à partir de leur environnement, le rayonnement de longues longueurs d'ondes émis du sol, les différentes surfaces du bâtiment et le ciel et dans certains cas il y a échange de chaleur sensible entre l'air chaud et les feuilles fraîches.

Il est donc important d'étudier l'effet de refroidissement de la végétation dans le contexte des stratégies de planification adaptées à la région climatique et au contexte urbain.

Les valeurs enregistrées pour PET et COMFA+* au cours de révolution à 10h étaient respectivement : 31,22°C et -25w/m². La valeur de COMFA+* reflète un effet de refroidissement causé par une combinaison de haute densité d'arbres ayant des structures morphologiques spéciales (Ficus) et par la configuration et l'orientation des bâtiments. La canopée d'arbres avec une forme de parasol procure l'ombre et permettent une protection contre le rayonnement solaire direct. Une bonne ventilation est permise grâce à la silhouette de l'arbre caractérisé par un fût dégarni. La configuration géométrique des bâtiments créant des couloirs perpendiculaires à la mer assure, une meilleure circulation de l'air dans le cours de la révolution, particulièrement pour les vitesses faibles du vent, sans être obstruée par la disposition des arbres.

Le même type d'arbres se trouve à la place George Ishak. La différence entre les valeurs de PET et de COMFA * + entre les zones ombrées et non ombragées était de 20 ° C et de 100w/m² respectivement.

Les résultats trouvés dans la place de champs de mars et le jardin 8mai 45 ont montré un faible effet de refroidissement des arbres. Les valeurs obtenues dans la place du champs de mars étaient de 45,2 ° C pour le PET et de 260w / m² pour le COMFA * +, alors que dans le jardin 8mai45, on a obtenu 36,03 ° C pour le PET et 230w / m² pour le COMFA * +. Même si les deux sites comptaient un nombre important d'arbres (Platane, ficus, palmier, laurier-rose, etc.), l'effet de refroidissement était faible.

La place de Sidi Achour est caractérisée par un ensemble d'arbres jeunes. L'effet de refroidissement le plus important provient de l'ombre des bâtiments. Les valeurs enregistrées du PET et COMFA+* sont 33,60°C et +200w/m² respectivement. Pour la surface plantée, le PET était de 52°C et COMFA+* de 200w / m². D'après ce qui précède, nous pouvons conclure que les arbres de plus grande taille avec une importante masse foliaire créent des effets de refroidissement plus importants que les petits arbres. En général, nous remarquons que les valeurs de PET étaient supérieures aux valeurs de COMFA+*. Le jardin des frênes se caractérise par un aménagement paysager très intéressant couronné par plusieurs espèces d'arbres créant plusieurs jeux d'ombre et des ambiances lumineuses très agréables, on note une divergence dans les conclusions tirées des résultats obtenus par le PET et COMFA+*. Alors que la valeur enregistrée en PET était de 38,28C, ce qui indique une situation inconfortable, celle de COMFA+* était de + 50w / m², ce qui indique une situation confortable. Il est intéressant de noter que la majorité des personnes interrogées lors des investigations ont voté pour des conditions satisfaisantes.

7.8. Corrélation entre les différents indicateurs morphologiques et les indices du confort :

Tableau 7.9 : Matrice de corrélation (Pearson) de la corrélation entre les différents indicateurs

Variables	PET	TEP	COMFA+*
Durée d'ombre	-0,738	-0,787	-0,927
Indice Végétation	-0,769	-0,768	-0,922
Albédo relatif	-0,838	-0,778	-0,564
Degré d'enclosure	0,386	0,148	0,151
PET	1	0,958	0,882
Durée d'ensoleillement	0,750	0,797	0,940
TEP	0,958	1	0,903
SVF	0,765	0,832	0,947
COMFA+*	0,882	0,903	1

Tableau 7.10 p-values des corrélations des différents indicateurs.

Variables	PET	TEP	COMFA+*
Durée d'ombre	0,037	0,020	0,001
Indice Végétation	0,026	0,026	0,001
Albédo relatif	0,009	0,023	0,146
Degré d'enclosure	0,344	0,726	0,721
PET	0	0,000	0,004
Durée d'ensoleillement	0,032	0,018	0,001
TEP	0,000	0	0,002
SVF	0,027	0,010	0,000
COMFA+*	0,004	0,002	0

- Les coefficients de corrélation de Pearson calculés entre PET et les deux indicateurs morphologiques, SVF et durée d'ensoleillement dont les valeurs sont 0,765 et 0,750 respectivement (p-value de 2,7% et 3,2%), ont révélé une liaison linéaire forte et positive. La liaison entre PET et les indicateurs : Albédo relatif, Indice de végétation et durée d'ombre est du type linéaire forte et négative, le r obtenus est de -0.838, -0.769 et -0.738 respectivement (le p-value est de 0.9%, 2.6% et 3.7%). Le coefficient de corrélation obtenu pour PET et le degré d'enclosure révèle une liaison très faible ($r=0.386$).
- Les coefficients de corrélation de Pearson calculés entre TEP et les deux indicateurs morphologiques, SVF et durée d'ensoleillement dont les valeurs sont 0.832 et 0.797 respectivement (p-value de 1% et 1.8%), ont révélé une liaison linéaire forte et positive. La liaison entre TEP et les indicateurs : Albédo relatif, Indice de végétation et durée d'ombre est du type linéaire forte et négative, le r obtenus est de -0.778, -0.768 et -0.787 respectivement (le p-value est de 0.023, 0.026 et 0.02). Le coefficient de corrélation obtenu pour TEP et le degré d'enclosure révèle une liaison très faible ($r=0.148$).

- Les coefficients de corrélation de Pearson calculés entre COMFA+* et les deux indicateurs morphologiques, SVF et durée d'ensoleillement dont les valeurs sont 0,947 et 0,940 respectivement (p-value de 0% et 0.1%), ont révélé une liaison linéaire très forte et positive. La liaison entre COMFA+* et les indicateurs : Indice de végétation et durée d'ombre est du type linéaire très forte et négative, le r obtenus est de -0.922 et -0.927 respectivement (le p-value est de 0.1%). Le coefficient de corrélation obtenu pour COMFA+* et le degré d'enclosure révèle une liaison très faible ($r=0.151$). La relation entre COMFA+* et l'albédo relatif n'était pas significative (p-value = 1,46%).

7.9. Variation du confort dans les espaces extérieurs en fonction des indicateurs morphologique /Modélisation des données :

Après la vérification des liaisons linéaires à partir de la matrice de corrélation (Pearson), nous procédons à la déduction des différents modèles de régression linéaires qui en découlent. Cette opération passe par les tests suivants : p-value relatif au test de Fisher et t de Student ainsi que les intervalles de confiance et la distribution des résidus.

7.9.1. Modèle de régression de l'albédo relatif

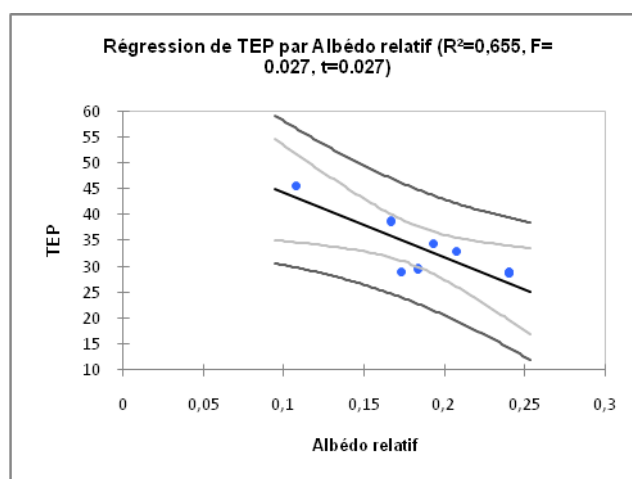


Figure 7.23 : Régression de TEP par l'albédo relatif.

D'après les tests statistiques précédents, l'albédo relatif peut expliquer seulement la variation de TEP. L'observation du graphe de régression de TEP par l'albédo montre que les deux valeurs : celle du test de Fisher est du test Student sont significatives (<5%), ainsi l'équation prendra la forme suivante :

$$\text{TEP} = 56,4925630924951 - 123,478278731912 * \text{Albédo relatif.} \quad (\text{eq.7.8})$$

En effet l'albédo n'a pu être expliqué par les deux modèles numériques, probablement à cause de la méthode employée dans l'évaluation de cet indicateur.

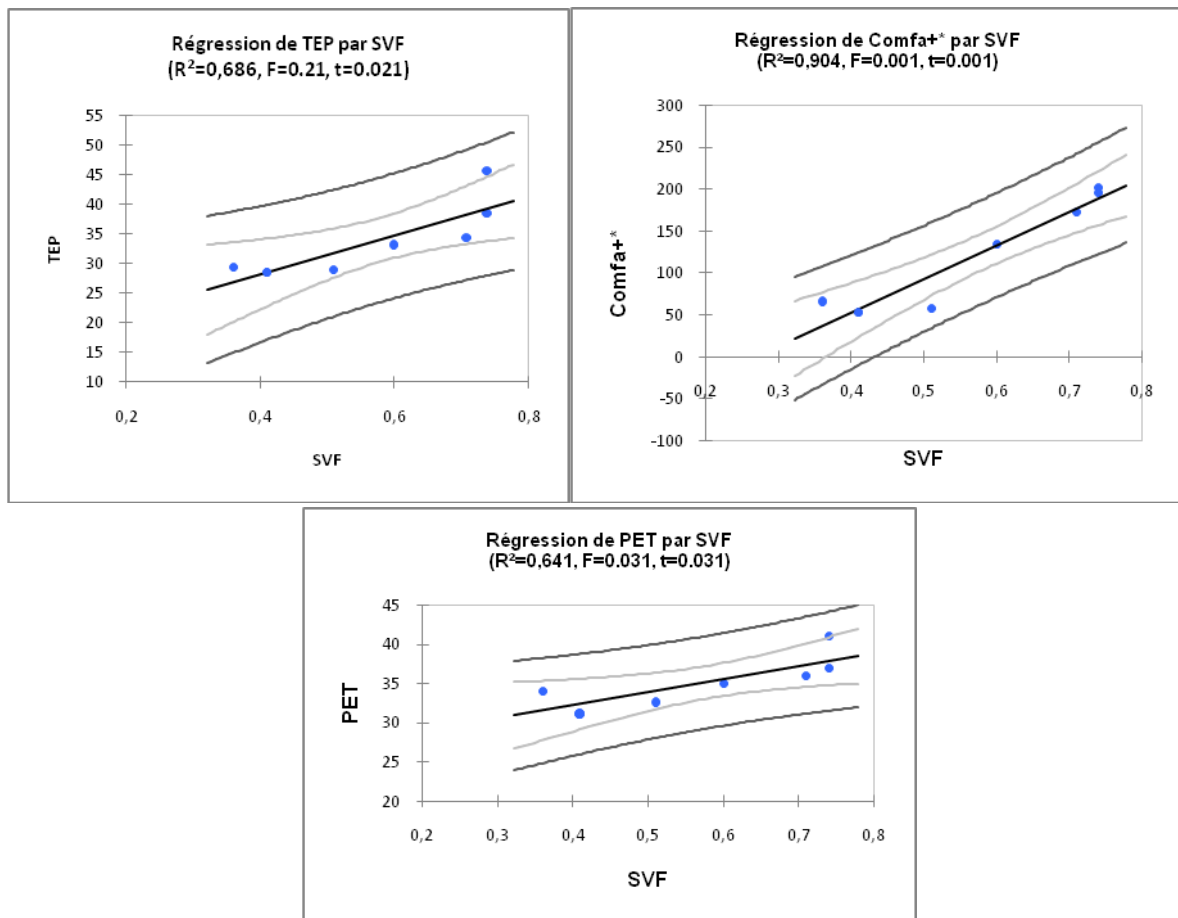
7.9.2. Modèle de régression du facteur de vue de ciel (SVF)

Figure 7.24 : Régression des trois indices de confort TEP, Comfa+* par SVF.

L'observation des graphes de régression montre que la relation linéaire est significative pour les trois indices de confort employés dans notre étude. COMFA+* a donné le meilleur résultat, plus de 90% de la variabilité de la variable dépendante COMFA+* est expliquée par la variable explicative. L'équation du modèle est la suivante :

$$COMFA+* = -106,66 + 400 \cdot SVF \quad (\text{eq.7.9})$$

COMFA+* est très sensible à la variation du SVF. Cet indicateur a une très grande influence sur les échanges radiatifs au sein des espaces extérieurs.

7.9.3. Modèle de régression de la durée d'enseiement

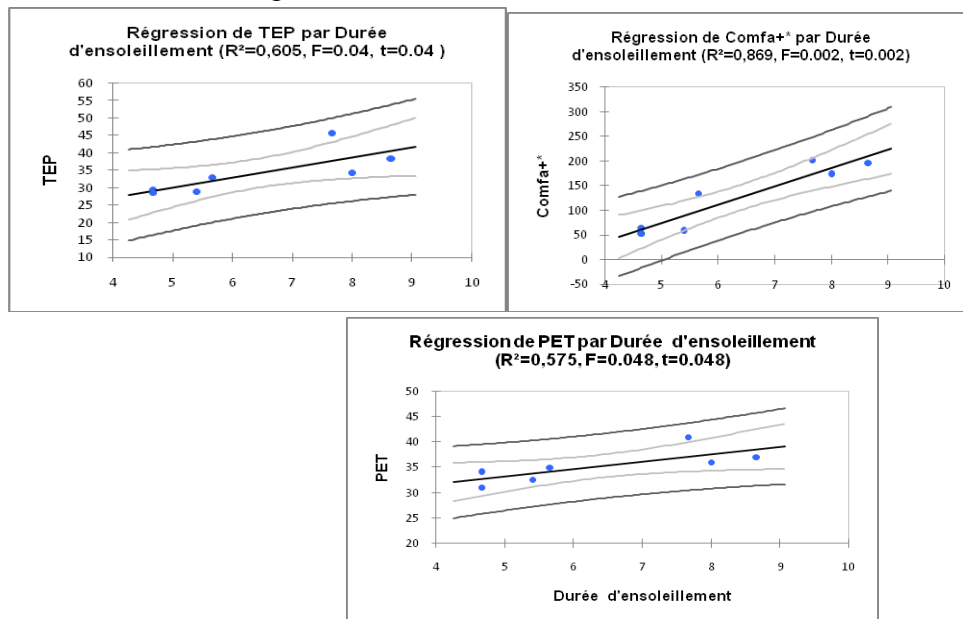


Figure 7.25 : Régression des trois indices de confort TEP, Comfa+* par la durée d'enseiement

L'observation des graphes de régression montre que la durée d'enseiement explique 87% de la variabilité de COMFA+* et seulement 57% de la variabilité du PET. Les deux tests statistiques F et t sont significatifs pour les trois indices de confort. L'équation linéaire obtenue est :

$$\text{COMFA+*} = -110,67 + 37 * \text{Durée d'enseiement} \quad (\text{eq.7.10})$$

7.9.4. Modèle de régression de la durée d'ombre

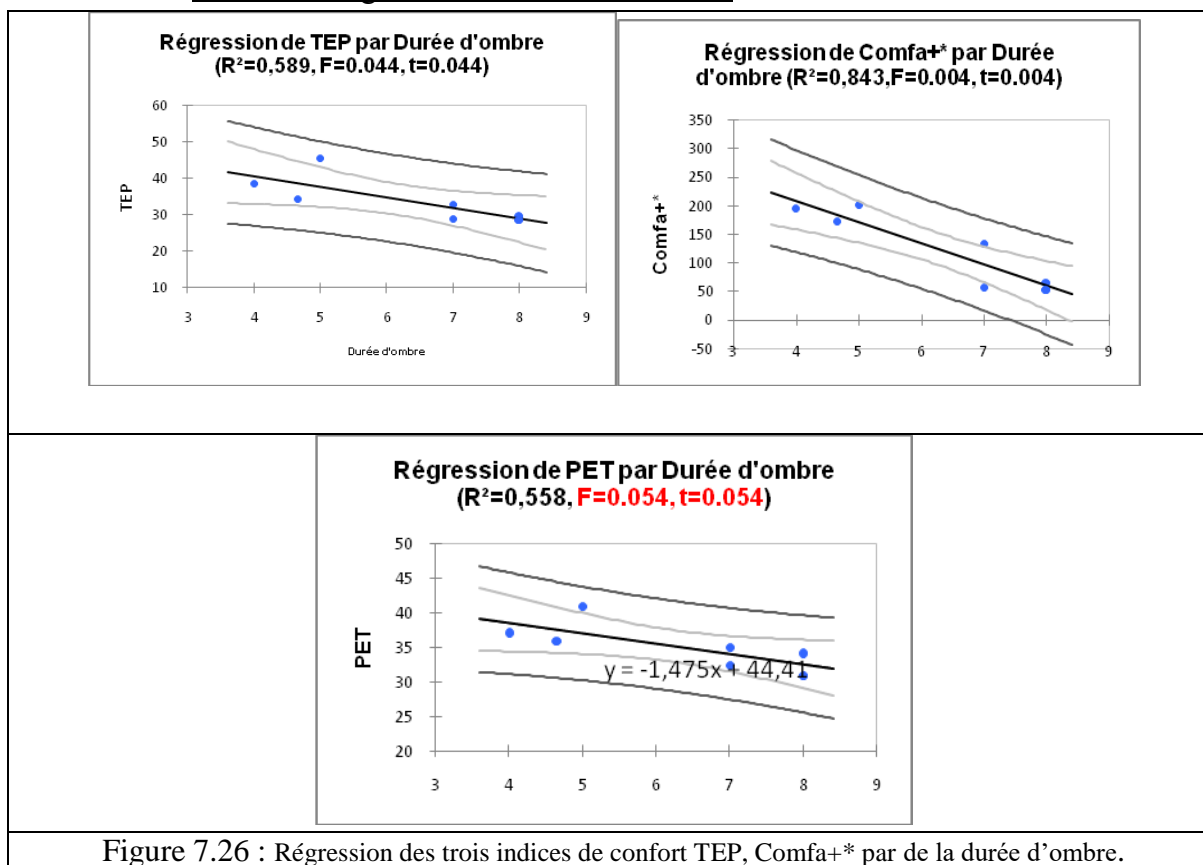


Figure 7.26 : Régression des trois indices de confort TEP, Comfa+* par de la durée d'ombre.

Similairement à la durée d'ensoleillement, l'observation des graphes de régression montre que la durée d'ombre explique 84% de la variabilité de COMFA+* et seulement 56% de la variabilité du PET. Seulement Les deux tests statistiques F et t ne sont pas significatifs pour PET ($F & t > 5\%$). Ainsi l'équation linéaire prendra la forme suivante :

$$\text{COMFA+*} = -110,67 + 37 * \text{Durée d'ensoleillement} \quad (\text{eq.7.11})$$

La durée d'ensoleillement/ durée d'ombre est un facteur déterminant dans la définition de la quantité du rayonnement reçu. Ces deux paramètres jouent un très grand rôle sur la variation de COMFA+*

7.9.5. Modèle de régression de l'indice de végétation

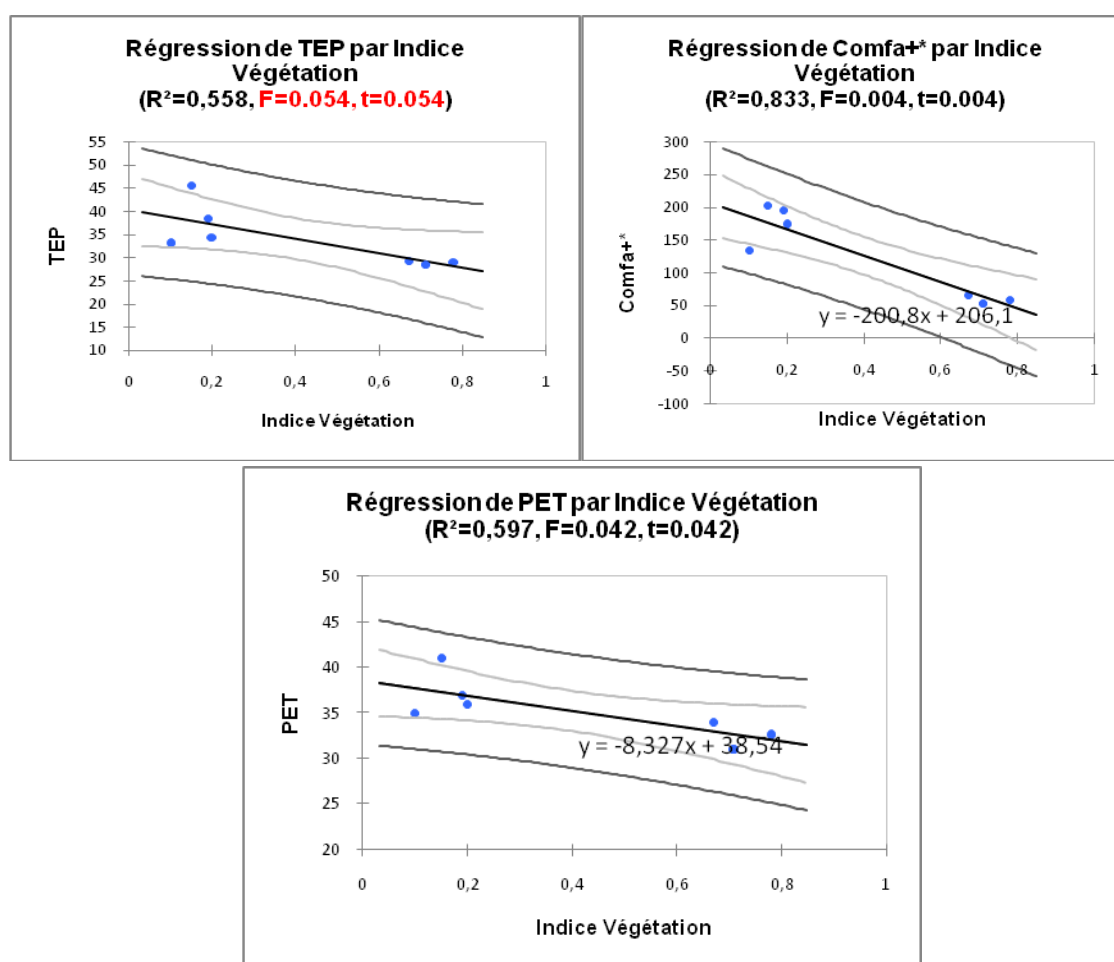


Figure 7.27 : Régression des trois indices de confort TEP, Comfa+* par l'indice de végétation.

L'observation des graphes de régression montre que l'indice de végétation explique 83% de la variabilité de COMFA+* et seulement 60% de la variabilité du PET. Les deux tests statistiques F et t sont significatifs pour les deux indices de confort. L'équation linéaire obtenue est :

$$\text{COMFA+*} = 206,177142857143 - 200,8 * \text{Indice Végétation} \quad (\text{eq.7.12})$$

Semblable aux indicateurs morphologiques à l'échelle du tissu urbain, Les différentes équations linéaires obtenues permettront d'évaluer l'impact des indicateurs morphologiques à l'échelle des espaces publics sur le confort thermique extérieur. Elles présentent un outil qui peut être utilisé par les concepteurs dans un état précoce de leur projet afin de tester les différents scénarios d'aménagement. Seulement la généralisation de ces modèles exige l'addition d'autres échantillons afin de regrouper ces indices dans un seul modèle.

7.10. Conclusion

L'intégration des méthodes de modélisation dans l'évaluation du confort thermique extérieur offre des avantages significatifs pour l'amélioration des stratégies de conception. Elle permet au concepteur de mieux définir l'utilisation de l'espace public urbain et de prédire plus précisément le niveau de confort thermique extérieur.

De même que pour les études antérieures, comme nous l'avons déjà mentionné, nos résultats montrent une forte corrélation entre les modifications du rayonnement et les variations du confort thermique.

Cette étude a développé une nouvelle mise à jour du modèle COMFA+* sur la plate-forme de Matlab, en introduisant l'effet combiné des bâtiments et les différents niveaux des activités (modérées à rigoureuses). Ceci permettra d'améliorer la prédictibilité du modèle ainsi de mieux tester les effets des éléments physiques des espaces extérieurs sur le confort thermique généré.

Une comparaison entre les méthodes utilisées dans cette étude, révèle que les méthodes statistiques sont plus adéquates pour l'estimation globale du niveau du confort thermique extérieur et pour la calibration des modèles thermiques physiologiques.

Cependant les méthodes de modélisation sont plus utiles pour simuler les différents scénarios d'aménagement des espaces extérieurs afin d'obtenir des propositions optimales.

Certaines limitations rencontrées dans les méthodes numériques concernent la difficulté d'introduire une description détaillée de la structure morphologique de l'espace urbain et de la définition de certains paramètres d'entrée des modèles tels que le relief.

En outre, par exemple pour le modèle Envi-met, on suppose que les valeurs de l'albédo et de la valeur U sont égales pour tous les murs et les toits. Cela rend l'estimation du confort thermique extérieur moins précise.

Les rayonnements solaires absorbés et réfléchis sont les flux les plus importants dans le bilan énergétique. Ils dépendent des facteurs de vue et des propriétés des matériaux. L'introduction de l'impact des constructions sur le flux de rayonnement et donc sur le bilan énergétique du corps humain dans le modèle COMFA+* a amélioré son exactitude. Cet indice peut évaluer toutes les conséquences d'un changement d'un environnement thermique causé par différentes variations dans l'aménagement.

L'application des modèles de confort thermique dans la conception architecturale et urbaine est prometteuse. COMFA+* est un outil très efficace qui peut être utilisé pour promouvoir l'intégration de l'approche climatique dans la planification.

COMFA+* est l'un des modèles de confort les plus simple basé sur l'équation du bilan d'énergie, la sensation du confort est évaluée à travers la valeur du TB. Les opérations

d'aménagement urbain impliquent l'introduction de nouveaux bâtiments dont il est important d'évaluer leur impact sur les échanges radiatifs. Les bâtiments en effet interceptent, absorbent et réfléchissent le rayonnement solaire, obstruent une partie de la vue vers le ciel et émettent le rayonnement de longue longueur d'onde.

La comparaison entre les trois indices montre une surestimation dans les résultats obtenus des simulations du PET. Ceci est probablement dû à une surestimation de la température moyenne radiante.

Contrairement une sous-estimation est observée par rapport à COMFA+*, Ce modèle est très sensible aux températures de surfaces et les différents flux de rayonnement, ce qui nous conduit à déduire que probablement les valeurs introduites dans le modèle étaient sous estimées.

Les résultats obtenus confirment la forte relation entre la morphologie urbaine et la variation temporelle et spatiale des zones de confort.

A magnifying glass with a silver frame and a black handle is positioned over the word "CONCLUSION". The word is written in a bold, black, italicized, sans-serif font. The magnifying glass is tilted slightly to the right, and its lens is focused on the beginning of the word. A soft shadow is cast by the magnifying glass onto the surface below it.

CONCLUSION

Conclusion et perspective de recherche

Ce travail s'est axé sur l'évaluation du confort thermique extérieur en mettant en évidence l'impact de la morphologie et la végétation sur les échanges radiatifs.

La recherche bibliographique a recensé les différents travaux théoriques et recherches qui ont traité les aspects morphologiques du tissu urbain et leurs impacts sur le microclimat et le confort thermique. Au départ, elle consiste en la présentation des différents phénomènes physiques rencontrés dans le milieu urbain, répertoriés selon différentes échelles. En effet, l'urbanisation a entraîné des modifications dans le bilan radiatifs, hydrique et l'écoulement d'air. Ensuite, la présentation des différents aspects du confort thermique et la diversité méthodologique qui en découle. Cet examen a permis aussi de conclure qu'il existe une grande variété d'instruments et de méthodes dans les études de confort thermique dans les espaces extérieurs, soit concernant les instruments micro-météorologiques, soit les modèles de questionnaires et les indices thermiques. Les instruments et les méthodes utilisées pour obtenir la température moyenne radiante, la variable météorologique la plus importante dans le bilan énergétique et l'évaluation du confort thermique, ont beaucoup varié dans les études choisies.

Selon Harlan et al. (2006), les modes d'urbanisation et d'occupation du sol sont les deux paramètres les plus importants qui influent sur la répartition spatiale de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Dans le milieu urbain, les surfaces présentent un patchwork d'éléments, tels que les bâtiments, les espaces verts, et les surfaces revêtues ayant des caractéristiques radiatives, aérodynamiques, thermiques et hygrométrique contrastées. Ces différents éléments de surface ont des bilans énergétiques diversifiés qui génèrent des contrastes dans leurs caractéristiques, et conduisent à des échanges radiatifs et d'advection à petite échelle. Ces unités morphologiques fondamentales peuvent être regroupées hiérarchiquement.

Selon Adolphe Luc, Il est difficile de décrire et de simuler les interactions entre la morphologie urbaine et les conditions climatiques à l'échelle microscopique à cause de la complexité de la géométrie du cadre bâti. En effet il semble intéressant de travailler à l'échelle macroscopique, loin de l'hétérogénéité locale, et d'envisager des volumes suffisamment importants et des effets assez clairs de l'interaction entre la forme urbaine et le microclimat. Ainsi notre travail ne s'est pas limité aux espaces urbains publics, mais il s'est étalé jusqu'à l'échelle du quartier.

En effet, l'objectif de cette recherche est l'aboutissement à des modèles qui permettent de prédire efficacement le degré du confort généré depuis les formes urbaines projetées. La Physiologie, la psychologie et l'environnement thermique sont les trois éléments principaux dans l'évaluation du confort thermique extérieur. Les outils employés dans cette étude se différencient entre :

- Indicateurs morphologiques déduits à partir de l'environnement thermique selon l'échelle du quartier (climat local) et l'échelle des espaces extérieurs

(microclimat). Ces indicateurs physiques décrivant l'aspect formel de l'environnement thermique. Chaque indicateur possèdera une signification et une représentativité particulière qui convoiera l'information d'une manière synthétique (Maignant, 2005).

- Indicateurs du confort qui varient entre : indicateur empirique, indice mathématique et physiologique.

Selon Vanos, l'investigation et les enquêtes permettent de mieux supporter la sensibilité du climat et les spécificités formelles des sites basées sur les particularités des microclimats, et généralement l'importance de comprendre la diversité des perceptions de l'environnement thermique. Cette diversité dans les aspects nous a conduit à employer plusieurs méthodes :

- Des mesures à travers les six quartiers et sept espaces publics en utilisant plusieurs thermomètres hygromètres anémomètres et une mini station. Les mesures à travers les quartiers ont été effectuées suivant une dynamique de parcours. Les mesures effectuées dans les espaces publics étaient accompagnées par des interviews.
- La simulation, qui nous a permis d'évaluer d'autres paramètres tel que l'ensoleillement et le rayonnement grâce à des logiciels de simulation : ENVI-met et TownScope.
- Des modèles empiriques et des algorithmes qui nous ont permis de calculer la température moyenne radiante dans les parcours et les facteurs de forme.

Les paramètres qui ont le plus d'influence sur le confort thermique et qui ont été mesurés dans ce travail sont : T_a , T_{mrt} , V_v et HR . Dans les espaces extérieurs ces paramètres ne sont pas homogènes et difficiles à contrôler à cause de : l'asymétrie du flux radiatif, la vitesse d'air, la variation des températures de surfaces. En plus à l'adaptation comportementale liée aux vêtements et à l'activité physique qui est difficilement contrôlable à l'extérieur. Cette complexité exige une rigueur méthodologique dans l'évaluation du confort thermique extérieur et qui réunis tous ces paramètres.

Les trois indices de confort évalués sont :

- L'indice empirique TEP (température équivalente prévisible), basé sur un modèle de régression linéaire multiple dans les variables sont : T_a , HR , V_v et T_{mrt} .
- Le modèle mathématique COMFA+*. Il présente un modèle simplifié intégrant l'ensemble des paramètres climatiques et urbains. Il offre un calcul détaillé à travers des équations qu'on a saisi grâce à Matlab. Des modifications qu'on a opérés sur les équations du modèle initiale (Brown, Gillespie, 1986) et sur la base des travaux antérieurs (Kenny et al, 2009 ; Angelotti,2007) afin d'améliorer les résultats obtenus de ce modèle. Ces modifications consistent en l'introduction des effets des bâtiments ainsi que l'impact de la résistance des vêtements et l'intensité de l'activité physique.

- Le modèle physiologique PET est calculé à partir du modèle MEMI (Munich Energy Balance Model for Individuals) basé sur l'équation du bilan énergétique du corps humain le modèle à deux nœuds de Gagge.

Il est à signaler que ces deux modèles sont souvent utilisés pour la caractérisation radiative des espaces extérieurs.

Les résultats obtenus ont démontré que la morphologie urbaine est d'une importance fondamentale dans la sensation thermique résultante. Le rôle des arbres était également très éloquent. Ils fournissent l'ombre et stockent et obstruent le rayonnement solaire intense, entraînant une baisse des températures de surfaces. Par conséquent, le corps humain absorbe moins de rayonnement à courtes longueurs d'ondes en raison de réduction de l'exposition au rayonnement directe. D'après notre modèle empirique TEP, l'effet de la température moyenne radiante sur le confort thermique extérieur était significativement important. La température de l'air et l'humidité relative semblent avoir un effet moyen alors que l'effet du vent est insignifiant.

L'intégration des méthodes de modélisation dans l'évaluation du confort thermique extérieur offre des avantages significatifs pour l'amélioration de différentes stratégies d'intervention urbaine et architecturale. Elle permet au concepteur de mieux définir l'utilisation de l'espace public urbain et de prédire plus précisément le niveau de confort thermique extérieur.

Le classement des formes urbaines selon des indicateurs environnementaux, ouvre de nouvelles axes et autres issues pour encore développer les études surs : le confort thermique extérieur, l'ensoleillement, la ventilation, et même la consommation d'énergie. Cette approche devrait permettre de concevoir des espaces extérieurs qui tiennent davantage en compte les implications climatiques et physiques. Cependant, dans cette recherche ont été confronté à des problèmes méthodologiques liés à l'évaluation de ces indicateurs, ce qui exige la mise à point d'une approche intégrée qui assure l'évaluation de ces paramètres.

En comparant le nombre des individus rencontrés à travers les sept sites étudiés, les facteurs climatiques semblent avoir l'impact le plus significatif sur leurs usages. Le modèle de distribution a été étroitement lié à la disponibilité de l'ombre. Cela a été illustré dans le « cours de révolution ». Malgré que le jardin des frênes jouisse de plusieurs qualités paysagères avec plusieurs espèces d'arbres, seul un petit nombre de personnes a été rencontré. Cette observation nous amène à souligner que le niveau d'utilisation de l'espace extérieur n'est pas toujours influencé uniquement par les conditions physiques. En effet, l'évaluation du confort exige une approche globale qui tient compte de sa pluridisciplinarité. Ainsi, les aspects physiologiques, physiques, psychologiques et sociologiques sont tous des domaines qui interviennent, dans une certaine mesure, lors de l'évaluation du confort thermique.

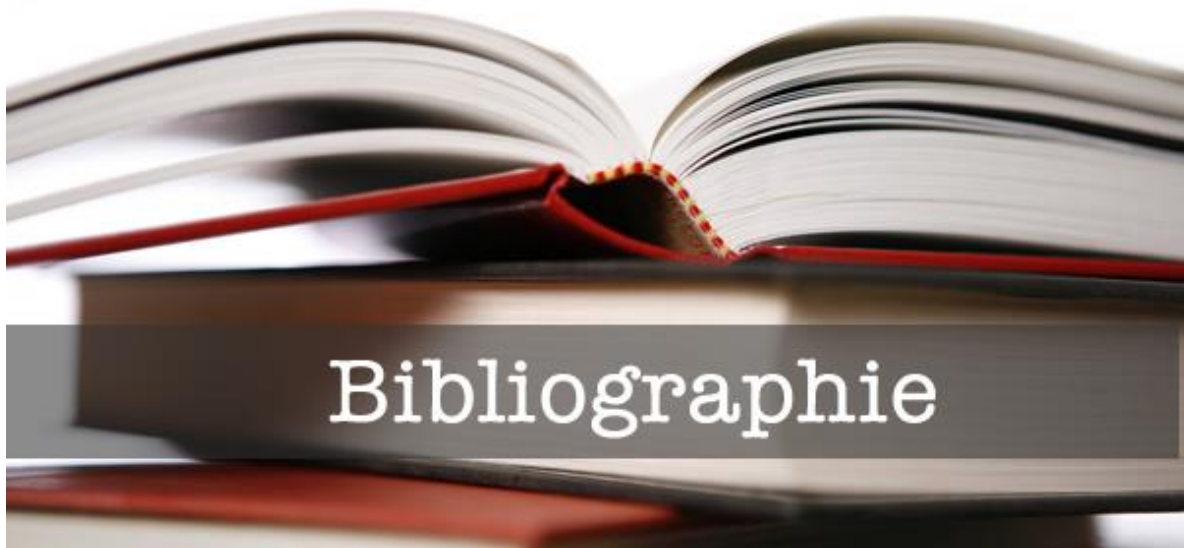
Axes futurs et perspective de recherche :

Les résultats obtenus dans ce travail nous amèneront à appliquer les modèles obtenus à un ensemble étendu de cas urbains, en tenant compte à la fois des diverses conditions climatiques pendant le jour, la nuit, avec le vent ciel claire, etc. Comme il est à signaler qu'une étude plus approfondie, avec un des instrumentaux d'investigation assez performant, devrait nous aider à identifier le rôle d'autres indicateurs physiques pertinents pour améliorer les connaissances acquises de la relation entre l'environnement bâti et le microclimat.

Les outils de simulation employés dans cette étude peuvent être utilisés pour évaluer les conséquences environnementales des solutions architecturales dans la ville d'Annaba. Une utilisation plus large de ces outils devrait favoriser efficacement l'amélioration des conditions thermiques dans les tissus urbains.

Outre les paramètres climatiques mesurés, d'autres variables peuvent influencer le microclimat et le confort extérieur. En effet, ces mesures sont influencées par toutes les formes d'activité humaine. Les charges thermiques, l'humidité et la pollution, les changements brusques de la vitesse du vent, la circulation mécanique et la chaleur générée par les équipements, telle que celle générée de la climatisation.

Bibliographie



Bibliographie

- Adolphe, L (2001). A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities, Environment and Planning B: Planning and Design 2001, volume 28.
- Adolphe, L. (2001). Modelling the link between built environment and urban climate :towards simplified indicators of the city environment.Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15.
- Adolphe, L. (2009). Morphometric Integrators of a Sustainable City, PLEA2009, Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009.
- Ainsworth, B.E., et Haskell, W.L., Whitt, M.C., Irwin, M.L., Swartz, A.M., Strath, S.J., O'Brien, W.L., (2000). Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities. Med Sci Sports Exerc 32(9):498–516
- Ait Ameur.K (2002). Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : validation d'un système d'indicateurs "morpho-climatiques" et d'un indicateur de confort, thèse de doctorat soutenue en 2002.
- AIT-AMEUR, K (2002) :Characterization of the microclimate in urban public spaces through the validation of a "morpho-climatic"indicator system.
- Akbari H., Rosenfeld A.H., Taha H. (1995). Cool construction materials offer energy saving and help reduce smog. ASTM standardization news 23, 11: 32 -37.
- Ali-Toudert F., Mayer H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and solar orientation on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. Building and environment 41: 94-108.
- Ali-Toudert,F., Djenane,M., Bensalem,R., Mayer., H (2005). Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria, CLIMATE RESEARCH Clim, Res Published May 24.
- Allain.R. (2004). *Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris, A. Colin, coll. U Géographie, 2004, 254 pages. Alain Barré. p.
- Al-Sallal, A., et Al-Rais,L.,(2012). Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai, Renewable Energy, vol.38, pp. 40-49.

- Andrade, H., Alcoforado, M. R., Oliveira, S (2011). Perception of temperature and wind by users of public outdoor spaces: relationships with weather parameters and personal characteristics. *Int J Biometeorol* 55: 665–680.
- Angelotti, A., Dessi, V., et Scuda, G., (2007). The evaluation of thermal comfort conditions in simplified urban spaces: The COMFA+model, 2nd PALENC conference on building low energy cooling and advanced ventilation, septembre .
- Angelotti, A., Dessi, V., et Scuda, G. (2007): The evaluation of thermal comfort conditions in simplified urban spaces: The COMFA+model, 2nd PALENC conference on building low energy cooling and advanced ventilation.
- Arboit, M., Mesa, A et De Rosa, C. (2006) : Solar Energy Potential of Low Density Urban Zones in Mendoza's Metropolitan Area, PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006 Solar Energy Potential of Low Density Urban Zones in Mendoza's Metropolitan Area
- Arens, E. A., et Zhang, H. (2006). The skin's role in human thermoregulation and comfort. In N. Pan, & P. Gibson (Eds.), *Thermal and moisture transport in fibrous materials location: center for the built environment* (pp. 560–602). UC Berkeley: Woodhead Publishing Ltd.
- Arnfield, J (1990), *Street Design and Urban Canyon Solar Access*, *Energy and Buildings*, 14 - 117 – 131
- Athamena, K et al (2009) : *Modèle numérique pour la caractérisation du confort thermique dans les éco-quartiers : méthodologie et validation sur une configuration de rue canyon.*
- Athamena, K (2012). *Modélisation et simulation des microclimats urbains: Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. cas des éco-quartiers. thèse de doctorat.*
- Augiseau, V (2009) : *Quelles relations entre formes urbaines et énergie? CSTB – université Paris-Est, ANR, Programme Villes Durables, ASPECT-2050.*
- Baker, N., Standeven, M. (1996). Thermal comfort for free-running buildings, *Energy and Buildings* 23, 175–182
- Baker, N., et Steemers, K., (2000). *Energy and Environment in Architecture*, E&FN Spon, London.
- Bornstein, R.D., et Johnson, D.S (1977). Urban-Rural wind velocity differences, *atmospheric Environment* 1977.

- Boulbir.L(2002). Processus de fabrication des villes algériennes, impact des modes de production sur les formes urbaines, cas de la ville d'Annaba. Thèse de magistère. Université de Constantine.
- Boumaraf, H et Tacherift, A. (2012) :Thermal comfort in outdoor urban spaces, *Analele Universităţii din Oradea – Seria Geografie* YearXXII, no. 2/2012 (December), pp. 279-283
- Bourbia F., Awbi H.B. 2004: Building cluster and shading in urban canyon for hot-dry climate. Part 2: Shading simulations. *Renewable Energy* 29: 291-301.
- Bourbia,F. Boucheriba,F et Tebbani,H. (2005) : Street design and outdoor comfort for semi arid climate, *PLEA* 2005.
-
- Boutard, A., (2000).la physique des sens : les infrarouges et le confort thermique, la bande des infrarouges: l'énergie du confort, ChapII, 2000.
- Bouyer, J. (2009).Mitigating urban heat island effect by urban design: forms and materials, *Fifth Urban Research Symposium* .
- Bröde, P et Krüger, E.L., A. Rossi.F., Fiala, D. (2012).Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a case study in Southern Brazil, *Int J Biometeorol* 56:471–480.
- Brown, G. Z. et DeKay, M. (2001). Sun, wind and light – architectural design strategies p122, 2nd Ed. John Wiley and Sons Inc, New York, 400 p
- Brown.R. D., Gillespie.T. J., (1986).Estimating Outdoor Thermal Comfort Using a Cylindrical Radiation thermometer and an Energy Budget Model, *Int. J. Biometeor*, 1986.
- Brown.R. D., Gillespie.T. J., (1995). Microclimatic landscape design, creating thermal comfort and energy efficiency,John Wiley and Son, Inc, 1995.
- CANDAS,V., (2008). Confort Thermique, *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique*.
- Cannistraro.G.,Franzitta G., Giaconia C., Rizzo G.(1992). Algorithms for the calculation of the view factors between human body and rectangular surfaces in parallelepiped environments,*Energy and Buildings*, 1992, vol. 19, pp. 51-60.
- Carlo Ratti, Dana Raydan, KoenSteeners Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate, *Energy and Buildings* 35 (2003) 49–59
- CERTU.(2007).La forme urbaine et l'enjeu de sa qualité, Lavoisier éditions,

- Chandler, T. J (1976). Urban climatology and its relevance to urban design, world Meteorological Organization, technical note no. 149.
- Charabi .Y, Kergomard, DeSylvain,B.C (2002). Le climat urbain de l'agglomération lilloise : Configuration spatiale et variations temporelles de l'îlot de chaleur urbain, p15, revue de l'UFR de Géographie et d'Aménagement.
- Charciarek, T (S.d): Daily course of vapor pressure and relative humidity differences between urban and rural site in Lodz.
- Chatel.V et Lovat.A (2015).Couche Limite Atmosphérique, Rapport, INP Toulouse.
- Chen, L et Ng, E (2012):Computer simulation of pedestrians transient thermal comfort in a complex urban context : a bottem-up modeling approach, Proceedings of 7th Windsor Conference: The changing context of comfort in an unpredictable world Cumberland Lodge, Windsor, UK.
- Cheng.V, Ng.E, Givoni.B.Outdoor thermal comfort in sub-tropical climate: A longitudinal study based in Hong Kong, Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort
- Chouquet, C., (2009).Modèles linéaires, cours, Laboratoire de Statistique et Probabilités - Université Paul Sabatier-Toulouse,M1 IMAT.
- Cicek, I.,Turkoglu, N., (2005).Urban effects on precipitation in Ankara.Atmosfera, vol.18, n°3,2005, p. 173-187.
- Claverie.R.,Bouyer.J., Durickovic.I., Moutton,M., (2011). Caractérisation de l'îlot de chaleur urbain par mesure dynamique embarquée : premiers résultats sur la ville de Nancy.Actes de colloque scientifique international « Renforcer la résistance au changment climatique des villes : Du diagnostic spatialiséaux mesuresd'adaptation, juillet 2011, Université Paul Verlain-Metz, France
- Cleugh. H. A., Bui. E.N., Mitchell. V.G., Xu.J ,Grimmond. C.S.B et Simon. D.A.P (2012). Evapotranspiration in Urban Water Balance Models: A Methodological Framework, The Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc
- Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Habitat et développement durable, Les Cahiers du CLIP N°13 Avril 2001.
- Colombert,M., Salagnac,J . L., Morand, D., et Diab, Y (2012) : Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines.Revue Vertigo.

- Colombert. M (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de doctorat, spécialité : génie Urbain, Université Paris-Est, 537 p.
- Compagnon, R., (2000). Solar and daylight availability in urban areas, Final Technical Report (PRECisproject), Ecole d'ingénieursetd'architectes de Fribourg.
- Compagnon.R. , (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric, Energy and Buildings 36 321–328
- De Portzamparc, F.,(2014). Grand Prix de l'Architecture, Grand Prix de l'Urbanisme fabriquer un tissu urbain contemporain, Actes des « Matinées du CGEDD », à la Maison du barreau – 75001 Paris.
- Dessì, V., (2008). Use of simplified tools to evaluate thermal comfort in urban spaces in the teaching experience, PLEA, Dublin.
- Direction de l'urbanisme de la wilaya d'Annaba : Plan directeur d'aménagement urbain PDEAU, 2004
- Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels (2009). Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Institut national de santé publique du Québec.
- Djenane, M., et Bensalem, R., (2005). Urban form participation in controlling solar irradiation: emphasis on the role of street in hot dry regions. Proceedings of the 23th conference on PLEA, Beirut, Lebanon, november 13-16.
- Doherty, M., Nakanishi, H., Bai. Xet Meyers, J (1997). Relationships between form, morphology, density and energy in urban environments, Moudon 1997.
- Duarte, D., Goncalves, J., Monteiro, L.M. Urban design and thermal comfort: assessment of open spaces in barrafunda, a brownfield site insãopaulo, by means of site measurements and predictive simulations.
- Dupagne, A., Teller, J (1998) : Hypergraph formalism for urban form specification, COST C4 Final Conference .
- Efe, S.I. (2013) Urban Effects on Precipitation and Rainwater Quality in Warri Metropolis, Nigeria. LAP Lambert Academic Publishing Germany, Saarbrücken.
- El Hozayen, A., (2013). Le traitement des espaces urbains dans les villes au climat chaud et sec pour diminuer leurs problèmes climatiques. Étude de cas : la ville du Caire. Sciences agricoles.
- Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use, Atmospheric Environment Vol. 30, No. 3, pp. 379-392.

- Eliasson, I. (2000): The use of climate knowledge in urban planning, *Landscape and Urban Planning* .
- Eliasson.I (1990/91): Urban Geometry, Surface Temperature and Air Temperature, *Energy and Buildings*, 15 - 16 (1990/91) 141 – 145
- Elnahas. M.M., Williamson, T,J (1997). An improvement of the CTTC model for predicting urban air temperatures. *Energy and Buildings*, 25: 41–49.
- Emmanuel, R., et Fernando, H. J. S. (2007) :Urban heat islands in humid and arid climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA, Vol. 34: 241–251.
- Escourrou, G., (1990).La spécificité du climat de l'agglomération parisienne.*Revue de géographie de Lyon*, Volume 65 Numéro 2 pp. 85-89
- Escourrou. G, *Le climat et la ville*, Nathan, Paris (1991).
- European Institute for Energy Research (EIFER)and the London School of Economics and Political Science (LSE) (2011). *Cities and energy: urban morphology and heat energy demand*.
- Fahmy,M., Sharples,S.(2008).Passive design for urban thermal comfort: a comparison between different urban forms in Cairo, Egypt,PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008
- Fanger.P.O, (1970) : *Thermal comfort*. Copenhagen, Danish Technical Press .
- 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*. 2012 May;56(3):429-41. doi: 10.1007/s00484-011-0424-7. Epub 2011 Apr 19.
- Fichet.A.D, Quénot.H (2007). Incertitudes des mesures en climatologie appliquées aux échelles fines : exemple de l'aérodologie nocturne dans la région caennaise, in *Incertitude & Environnement La fin des certitudes scientifiques* Allard P., Fox D., Picon B. Editions Edisud, Aix en Provence.
- Frommes. B (1982). *Urban and Building Climatology in Practice and in professional Education*, *Energy and Buildings*,31 - 37.
- Gehl, J. (1987): *Life between building, using public space*, libraryof congress catalog card number, © 1987 Jan Gehl.

- GIDEON, S., GOLANY., (1995).Urban design morphology and thermal performance, Atmospheric Environment vol. 30, No. 3, pp. 45-65,Elsevier Science .
- Giridharana,R., Laua,S.S.Y.,Ganesana,S.,Givoni,B. (2007).Urban design factors influencing heat island intensity inhigh-rise high-density environments of Hong Kong, Building and Environment 42 (2007) 3669–3684
- Givoni, B et al .(2003). Outdoor reaserch issues, Energy and building, Edition Elsevier.
- Givoni, B. (1989). Urban design in different climates (World Meteorological Organisation, WMO-TD, n. 346, Geneva).
- Givoni, B. (1998). Climate Considerations in Building and Urban Design.John Wiley & Sons Inc, New York, 480 p.
- Gómez-Azpeitia, G, Bojórquez, G.,Gonzalez-Cruz, E., García-Cueto, R., Ruiz-Torres, P., Romero, R., (2011).Outdoor and Indoor Thermal Comfort Temperatures Comparison in Warm Dry Climates,Architecture and sustainable development, Proceedings of PLEA 2011, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Goyette-Pernot, J., Compagnon,R. Climat urbain et énergie, cours en ligne.
- Greuillet, C., et Galsomiès,L., (2013).l'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air .pollution atmosphérique - Numéro SPÉCIAL -
- Grimmond, S. (2004). Understanding urban climates, WorldMinds: Geographical Perspectives on 100 Problems, pp 481-486, Springer Netherlands
- Grimmond. C. S. B., Oke. T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form.
- Grimmond.C.S.B. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas, International journal of climatology. 21: 903–913 .
- Groleau,D., Marenne, C., (1995).Environmental specificities of the urban built forms Rebuild-Rebuilding the European City-Integration of Renewable Energies in Established Urban structures, European Conference organized by the rebuild Network in the framework of the Recite Programme of DGXVI Regional Policies of the European Commission 29-30.
- Hage,K.D.Urban-Rural humidity differences .
- Harman, I. N. (2003). The energy balance of urban areas, thèse de doctorat, Université de READING, Département de meteorology.

- Havenith, G., Holmer, I., and Parsons, K. C. (2002). Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings*, 34(6):581-591.
- Hodder, S.G. et Parsons, K. (2007). The effects of solar radiation on thermal comfort, *Int J Biometeorol.*
- Hoppe, H. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*, no. 34, pages 661–665.
- Huang, J., Cedeno-Laurent, J. G., Spengler, J.D. (2014). City Comfort: A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas, *Building and Environment* 80, 84-95
- Huang, Y., Musy, M., Hégron, G., Chen, H., Baofeng Li (2008) : Towards urban design guidelines from urban morphology description and climate adaptability, PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008
- Huang, Y., Musy, M., Hégron, G. (2011). Méthodologies de conception climatique de quartiers urbains pour l'efficacité énergétique des bâtiments, Colloque « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain » 23 et 24 février 2011, ENPC, Marne la Vallée.
- Hyftý, A. (2001). Introduction à la climatologie. Editeur : De Boeck University.
- Intelligent urban forms (IUF) (1992). A new climate-concerned, urban planning strategy. *Theoretical and Applied Climatology* 1992 volume 46: page 179–191.
- IZARD, J.L. (1998). Rôle de la végétation dans le microclimat urbain : utilisation de la thermographie"; EPIC 98, 2e conférence Européenne Performance énergétique et Qualité des Ambiances dans le bâtiment, Lyon 19-21 Novembre 1998.
- Jendritzky, G., Nübler, W., (1981). A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms.
- Johansson, E., Sofia Thorsson, S., Emmanuel, R., Krüger, E., (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization, *Urban Climate* 10, 346–366
- Johansson, E. et Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka, *Int J Biometeorol.*
- Johnson, T. G. and Watson, I. D.: 1984, 'The Determination of View-Factors in Urban Canyons', *J. Clim. Meteorol.* 23, 329-335.

- K. Imessad, K., et Aït Messaoudène, N (2008). Modèle mathématique de prédiction de la sensation thermique et de la réponse physiologique chez l'être humain, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°4, 545 – 556 545
- Kallsperis. L. N & Summers. L. H (1985): Comfort design patterns for optimal combination surface temperature, *Proc. Conf., ASES.*
- Karjalainen, S. (2007). Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments, *Building and Environment*, Volume 42, Issue 4, April 2007, Pages 1594–1603
- Katzschner, L. Open space design strategies based on thermal comfort analysis
- Katzschner, L (2006): Behaviour of People in Open Spaces in Dependence of Thermal Comfort Conditions, *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006
- Katzschner, L. (2010). Outdoor Thermal Comfort under Consideration of Global Climate Change and Urban Development Strategies, *Proceedings of the Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge*, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings, <http://nceub.org.uk>
- Katzschner.L, Bosch,U., Röttgen, M . (2003). A methodology for microclimatic-microscale mapping of open spaces, paper presented at the fifth international conference of urban climate.
- Katzschner.L, Thorsson.S. (2009). Microclimatic Investigations as Tool for Urban Design, *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan
- Kenny. N.A. et al (2009). Part B: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity, *Int J Biometeorol.*
- Kenny. N.A. et al.(2009). Part A: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity, *Int J Biometeorol .*
- Kenny. N.A., Warland.J.S, Brown.R.D., Gillespi, T.G. (2009). Part A: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity, *Int J Biometeorol 2009.*
- Khedari, J., Yamtraipat,N., Pratintong, N. et Hirunlabh,J. (2000) Thailand ventilation comfort chart. *Energy and Buildings*, 32, 245-249.

- Kitous,S., Daoudi, N, Boussoulim.a., . Bensalem. R. Adolphe. L. (2006). Pour un urbanisme climatique des villes : cas de la vallée du M'Zab. Actes du séminaire national « Habiter le désert, Ghardaïa 2006.
- Knez.I ., Thorsson.S (2006).Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square, Int J Biometeorol (2006) 50: 258–268
- Krüger, E. L., Givoni, B., ; Rossi, F.A. (2010). Outdoor comfort study in Curitiba, Brazil: effects of gender, body weight and age on the thermal preference, Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9-11 April 2010. London: Network for Comfort and Energy Use in Buildings, <http://nceub.org.uk>
- Lai.D, Zhou.C, Huang.J, Jiang.Y, Long.Z, Chen.Q, (1988).Study in an urban residential community in central China,” Energy and Buildings, 68, Part B, 713-720.
- Latini. G, Grifoni.R.C, Tascini. S. (2010).Thermal Comfort and Microclimates in Open Spaces,Ashrae .
- Lay, D., Zhou, C., Huang, J., Jiang, Y., Long, Z., and Chen, Q. (2014). “Outdoor space quality: a field study in an urban residential community in central China,” Energy and Buildings, 68, Part B, 713-720
- Leech J.A., Wilby K., McMullen E., and Laporte K. Canadian human time–activity pattern survey report of methods and population surveyed. Chron Dis Can 1996: 17: 118–123.
- Leroyer. S (2006). Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle submeso : application a la campagne CLU-ESCOMPTE sur l'agglomération de Marseille, Thèse de DOCTORAT,2006, École Centrale de Nantes
- Les gisements du développement urbain : Analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO2 des tissus urbains
RAPPORT FINAL
- Levy, A . (1999).Les trois âges de l'urbanisme: Contribution au débat sur la troisième ville, Esprit, No. 249 (1), pp. 46-61
- Lévy.A., (2005).Formes urbaines et significations revisiter la morphologie urbaine », Espaces et sociétés 2005/4 (no 122), p. 25-48.
- Lin TP (2009) Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. Build Environ 44(10):2017–2026.

- Lin,T.P., Matzarakis,A., Liu, Y: Outdoor thermal comfort acceptable range and campus microclimate in hot-humid region
- Lindberg, F., Holmer, B.,Thorsson, S., (2008).SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings,Int J Biometeorol, 52:697–713
- Littlefair,P.,(1998).Passive solar urban design ensuring the penetration of solar energy into the city, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Louafibellara.S&Abdou.S (2012) : Effet de l’ombrage sur le confort thermique et visuel dans les espaces extérieurs : cas de l’esplanade de l’Université Mentouri de Constantine, Est de l’Algérie, Nature & Technologie, 2011.
- Lucan, J. (2012). Où va la ville aujourd'hui ? Forme Urbaines et mixités, Edition De la villette.
- M. Piringer , S. Joffre , A. Baklanov , J. Burzynski , K. De Ridder, M. Deserti , A. Karppinen , P.Mestayer , D. Middleton , M.Tombro , R. Vogt et A. Christen (2007) : The urban surface energy budget and the mixing height: some results of recent european experiments stimulated by the cost – action 715, 9th int. Conf. On Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes .
- Maignant, G., (2005).Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d’un développement urbain durable, actes de colloque
- Maïzia,M. (2007). L’énergétique urbaine et la morphologie des villes, L’analyse du bâti parisien, Les Annales de la recherche urbainen°103, 0180-930-X, 2007, pp.79-85 © MEDAD, PUCA
- Malaktou.E ,Philokyrou.M ,Michael.A et Savvides.A . (2016). Environmental behaviour of semi-open spaces in Mediterranean vernacular architecture. The case of rural traditional dwellings of Cyprus E, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’16) Madrid (Spain), 4 th to 6 th May, 2016.
- Marique.A.F;Meester. T et S Reiter.S .(2011). Energy requirements and solar availability in suburban areas: the influence of density in an existing district.
- Matzarakis, A. (2002).Climate, human comfort and tourism.2003
- Matzarakis, A., Amelung, B., (2008). Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans, Chapter 9, Matzarakis_wengen_ACC_30.

- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments application of the RayMan model, *Int J Biometeorol.*
- Mebirouk, H., Zeghiche, A. et Boukhemis, K. (2005) : Appropriations de l'espace public dans les ensembles de logements collectifs, forme d'adaptabilité ou contournement de normes ? Cas des ZHUN d'Annaba (Nord-Est algérien), *Norois Environnement, aménagement, société*
- Menut, L. (1997). Etude expérimentale et théorique de la couche limite atmosphérique en agglomération parisienne, thèse de doctorat, Spécialité : Physique de l'Atmosphère, soutenue le 15 décembre 1997 .
- Merzouk, N.K., Merzouk, M., Benyoucef, B. (2007) .Profil vertical de la vitesse du vent dans la basse couche limite atmosphérique. Jean-Jacques BEZIAN. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. ENSTIMAC, 5p., ISBN 978-2-9511591-6-7
- Michael, B., (2008) : BOTworld- A model for thermal comfort analysis Architecture and outdoor thermal comfort, *Proceedings of the Workshop: Thermal Comfort in Urban Planning and Architecture under Consideration of Global Climate Change* Feb. 20th and 21st 2008, KASSEL Germany.
- Mills, G., (2006). Progress toward sustainable settlements: A role for urban climatology, *Theor. Appl. Climatol.* 84, 69–76 (2006)
- Mitchell, G., Cleugh, H. A., Grimmond, C. S. B et Xu, J. (2008). Linking urban water balance and energy balance models to analyse urban design options V, hydrological processes.
- Mohajeri, N., Gudmundsson, A., Upadhyay, G., Assouline, D., Scartezini, J.L. : Neighbourhood morphology and solar irradiance in relation to urban climate
- Monam, A., Rückert, K., : The Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Urban Layouts, *Young Cities developing Urban energy Efficiency*
- Musy, M., Molines, N., Pham, T., Siret, D., et Groleau, D. (2006). ADEQUA : aménagement durable d'un quartier, *Elaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel.* Rapport final du CERMA, décembre 2006.
- Musy, M., Calmet, I., Bozonnet, E. (2012) : Modélisation des interactions ville-climat-énergie. *Modélisation urbaine: De la représentation au projet* Commissariat général au développement durable.
- Najjar, G., (2007). Mesures et modélisation en climatologie dans les milieux complexes, journées de climatologie de Grenoble (22-24 mars 2007).

- Najjar. G ,kastendeuch. P.P (2005) ,Ringebach. N , Colin. J.R. ,. Stoll. M.P ,Nerry.F , Bernard.J , de Hatten.A , Luhahe.R , Viville, D. (2005).Bilans radiatif et d'énergie dans un canyon urbain, Annales de l'Association Internationale de Climatologie, vol 2.
- Nikolopoulou,M., Baker, N., Steemers,K. (1999).Thermal comfort in urbanspaces: differentforms of adaptation, in: Proceedings of the REBUILD 1999 on Shaping Our Cities for the 21st Century, Barcelona, 1999).
- Nikolopoulou. M., et Steemers, K. (2003).Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces, Energy and Buildings 35 (2003) 95–101
- Nikolopoulou.M etLykoudis.S.(2007) : Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area, Building and Environment,Volume 42, Issue 10, October 2007, Pages 3691–3707
- Nouri, A.S., (2015).A Framework of Thermal Sensitive Urban Design Benchmarks: Potentiating the Longevity of Auckland's Public Realm, Buildings, 5, 252-281
- Oke, T. R.: 1981, 'Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations', J. Climatol. 1,237-254.
- Oke,T.R. (1988).Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings ;11:103–13.
- OKE.T. R. (1973) : City size and the urban heat island, Atmospheric Environment Pergamon Press 1973. Vol. 7, pp. 769-779.
- Oke. T. R. , (1984).Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning, Energy and Building. 7 (1984) 1 - 10.
- Oke.T.R., (1978). Boundary layer climate, Routledge. Taylor and Francis group.
- ONERC (Observatoire national sur les Effets du Réchauffement Climatique) : Février E., Viguié V., Hallegatte S., Garnaud B. Villes et adaptation au changement climatique, 2010, 158 p.
- O'Rourke.A etTerjung. W. H (1981). Urban parks, energy budgets, and surface temperatures, Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B, Volume 29, Issue 4, pp 327–344.
- PANERAI.P., (1986). Construire la ville. City and region.n°12, Nov. 1986.- pp.11-26

- Pearlmutter.D,Berlinera.P,Shaviv.E. (2007). Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons, *Building and Environment* 42 2396–2409
- Peneau.J.P (1995). Des densités aux rugosités. Les modalités instrumentales d'une transposition, *Les Annales de la Recherche Urbaine* n°67, 128-134.
- Peterson,T,J,. et Edwin, C.,Flowers(1976).Interactions between air pollution and solar radiation, *Solarenergy*.
- Pigeon.G et al (2008).De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville, *La Météorologie*-n 62 .
- Pignol et Tardan et al. (1997).Modeling the heat island generated by an urban unit.Paper of IBPSA conference BS 1997 - cd P110.
- Pinho, A., Pedro, J.B.,et Coelho, A.B., (2003).The influence of the built environment in microclimatic variations, *PLEA 2003 - The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Santiago – CHILE, 9 - 12.
- Piringer, M.,et Joffre, S.,(2005) .The urban surface energy budget and mixing height inEuropean cities: data, modelsand challenges for urban meteorology and air quality, *COST-715 ActionFinal Report of Working Group 2*
- Priyadarsini, R. et Wong, N.H. (2005). Parametric studies on urban geometry, air flow and temperature *International Journal on Architectural Science*, Volume 6, Number 3, p.114-132, 114 .
- Rabaa, S.M,. (2009).Urban-rural solar radiation loss in the atmosphere of greater Cairo region, Egypt, *Energy conversion and management* 50-194-202.
- RabiatulAdawiyah .N ,ShAhmada.S , Azni. Z.A.(2012).Psychological Adaptation of Outdoor Thermal Comfort in Shaded Green Spaces in Malaysia, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 68, 865 – 878
- Ratti,C,. Baker, N., Steemers,K., (2005).Energy consumption and urban texture, *Energy and buildings*.
- Ratti,C., et Richens, P : *Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques*,The Martin Centre for Architectural and UrbanStudies, University of Cambridge. UK
- Reiter.S. (2007). Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes, *Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain* .

- Rizwan, A. M., Leung, D.Y.C, Chunho, L., (2008).A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, *Journal of Environmental Sciences*, vol.20, p. 120-128.
- Robinson, D (2004). Solar radiation modelling in the urban context, *Solar Energy* 77 (2004) 295–309
- Rodrigues, A., Shimomura, P., Frota, A.B., Monteiro,L., (2009). Comparative evaluation of thermal comfort indices: case study in the city of Santos, BRAZIL, The seventh International Conference on Urban Climate,29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- Saddok, H., Zemmouri, N. : Effect of Urban Morphology on wind flow distribution in dense urban areas
- Salat, S. (2011) :La ville et les formes sur l'urbanisme durable, éditeur : Hermann & CSTB.
- Salat.S et Nowacki, C. (2010).De l'importance de la morphologie dans l'efficience énergétique des villes, *LIAISON ÉNERGIE-FRANCOPHONIE* NO 86. 1er trimestre 2010.
- Salat.S: Energy and bioclimatic efficiency of urban morphologies: towards a comparative analysis of Asian and European cities.
- Sam C.M. Hui(2001) : Low energy building design in high density urban cities, *Renewable Energy* 24 (2001) 627–640
- Santamouris, M. (2001). Energy and climate in the urban built environment *Londres: James and James*, 2001(b), 402 p.
- Sasaki.K, Mayer.H, Mochida.A, Uchida,M, Tonouchi,T ; Albert-Ludwigs: Field measurement on thermal comfort in outdoor locations :Comparison of SET* and PET based on questionnaire survey, The seventh International Conference on Urban Climate 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan
- Shakir, A., (2006).Thermal Comfort Modelling of an Open Space (Sport Stadium), thesis, Faculty of Engineering Department of Mechanical Engineering Energy Systems Research Unit University of Strathclyde Glasgow U.K
- Shashua-Bar,L., Tsiros, I.,X., Hoffman, M. (2012).Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Build. Environ.* 2012, 57, 110–119.

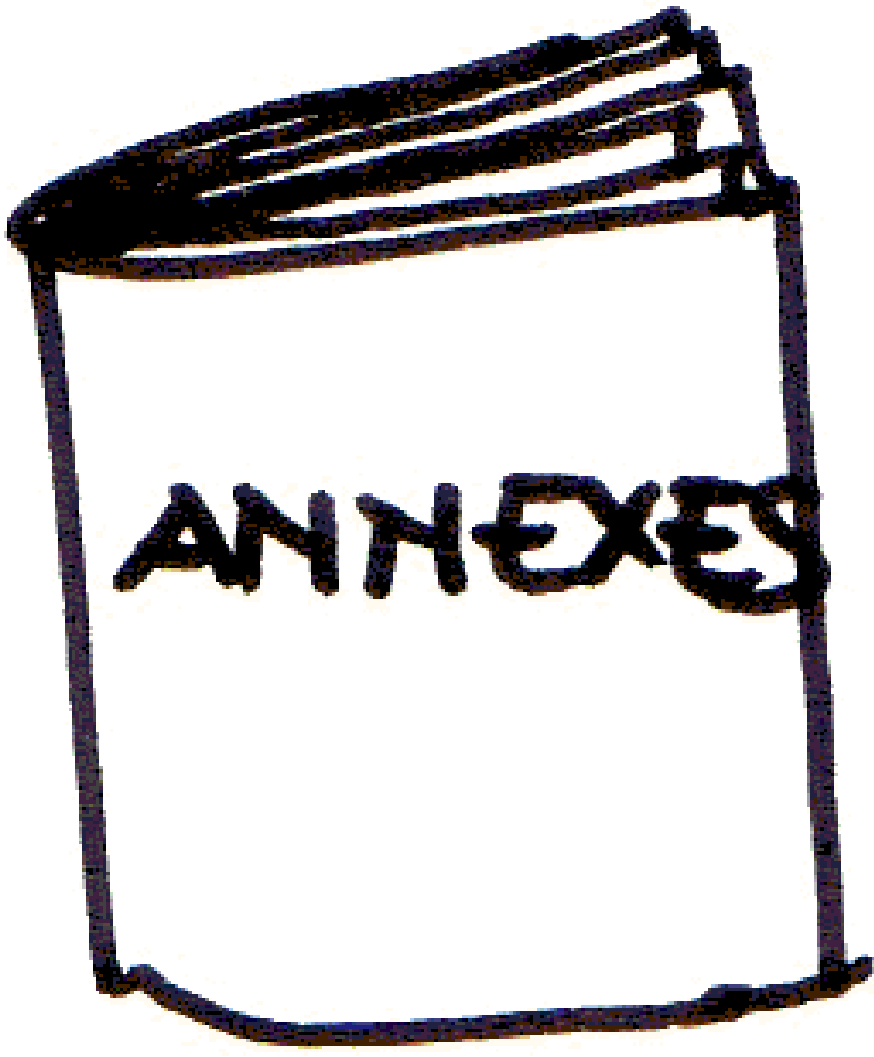
- Shepherd, M., Pierce M.J., Greenbelt, H., Negri, A, J. (2002). Rainfall Modification by Major Urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite, *Journal of Applied meteorology*, volume 41.
- Shimazaki, Y., Yoshida, A., Taketani, S. (2004). Experimental Analysis of Human Thermal Condition During Outdoor Exercise under Summer Conditions, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 9-2 (2014) Academic Article - 33 .
- Shishegar, N. (2013). Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons, *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 1, No. 1.
- Shooshtarian, S., Ridley, I. (2016). The effect of individual and social environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts, *Sustainable Cities and Society* 26, 119–133.
- Siedleki, M: Urban-Rural wind speed differences in Lodz.
- Sinou, M. (2007). Design and thermal diversity of semi-enclosed spaces. Cambridge shire: Melrose Books.
- Spagnolo, J et R.de Dear .(2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical sydney. *Building and environment*, Edition Pargamon .
- Stanley, B et al: Urban open spaces in historical perspective a transdisciplinary typologie and analysis, *Urban Geography*, 2012, 33, 8, pp. 1089–1117
- Stanton E. Tuller: Simulating the effect of urbanization on the human long wave radiation environment
- Stathopoulos, T. (2009). Wind and Comfort, EACWE 5 Florence, Italy 19th – 23rd July 2009.
- Steemers, K., Ramos, M., & Sinou, M. (2004). Urban diversity, in K. Steemers, & M. Steane (Eds.), *Environmental diversity in architecture* (pp. 85-100). London: Spon Press.
- Stewart, I. D., et Oke, T. R (2012). Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 1879-1900.
- Stull. R.B(1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluver Academic Publisher.
- Svensson, M, K., et Eliasson, I. (2002). Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning, *Landscape and Urban Planning* 61, 37–54

- Swaid, H., Hoffman, M.E (1990). Thermal effects of artificial heat sources and shaded ground areas in the urban canopy layer. *Energy and Buildings*, 15–16: 253–261.
- Swaid.H. (1993), The role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons, *boundary-Layer Meteorology* 64: 231-259, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- Szokolay, SV. (1979). *Environmental science hand book for architects and builders*. Edition The construction press 1979.
- Tathiane A.L. Martinsa, Luc Adolpheb, Leopoldo E.G. Bastosa . (2014). From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in Brazilian tropical city, *Energy and Buildings*.
- Tebbani, H.(2006). Impact de la végétation sur le microclimat, cas du cours de la révolution d'Annaba, Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine.
- Tebbani, H. Bouchahm, Y (2016) : « Caractérisation du confort thermique dans les espaces extérieurs : Cas de la ville d'Annaba », *Revue « Nature & Technologie »*. C- Sciences de l'Environnement, n° 15/ Juin 2016.
- Teller.J.(s.d). *Confort Thermique*, Cours en ligne –, Université de Liège
- Thitisawat.M et al (2010), Adaptive outdoor comfort model calibration for a Semitropical region, PLEA 2011, Louvain-la-neuve, Belgium (juillet 2011).
- Thitisawat.M, Polakit.K, Caldieron. J.-M, Mangone.G. (2011). Adaptive Outdoor Comfort Model Calibrations for a Semitropical Region, PLEA 2011.
- Tirraoui.L.(2000). Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains, thèse de doctorat, université de Nantes.
- Todhunter P. E. (1990) Microclimatic variations attributable to urban-canyon asymmetry and orientation. *Phys.Geography* 11, 131-141.
- Toner, V. J.L. (2015). Predicting outdoor thermal comfort in urban areas, thesis of Master of Building Science, Victoria University of Wellington.
- Traisnel, J.P. (2001). *Habitat et développement durable, Bilan rétrospectif et prospectif*, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement, Les Cahiers du CLIP, Numéro 13, Avril 2001.
- Tseliou.A, Tsiros.I, Lykoudis.S, Nikolopolou.M.(2010): An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions, *Building and environment*.

- Tsoka. S. (2011). Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons Application au cas des éco-quartiers, Thèse de Master STEU, Cerma2011.
- Tsuyoshi HONJO (2013): Thermal Comfort in Outdoor Environment, IBPSA proceedings.
- Tung-Shen Hsieh et Ian C. Ward . (2006). A GIS-based Method for Determining Natural Ventilation Potentials and Urban Morphology, PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September 2006.
- Turkbeyler, E., Yao, R., Day, T., (2011): Urban microclimates and renewable energy use in cities, World renewable energy congress, Sweden, sustainable cities and regions (SCR).
- Un crer, J. Urban-Rural air humidity differences in Szeged Hungary.
- URBAT (2004). Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : Le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions, Rapport final.
- Vanos, J.K. (2011). Modelling outdoor thermal comfort of humans performing physical activity: applications to health and emergency heat stress preparedness, thèse de doctorat .
- Villery, J. (2010). Analyse de la variabilité spatiale temporelle des champs thermiques locaux et de ses conséquences sur le débourrement de la vigne, Master 2 Géobiosphère, Université de Bourgogne UFR Sciences Vie, Terre et Environnement.
- Vinçont, J.Y. (1999) .Détermination des flux turbulents de masse dans le sillage d'un obstacle Application à l'écoulement à l'intérieur de la canopée urbaine, thèse de doctorat présentée devant l'école centrale de Lyon.
- Vu, T.C., T. Asaeda and M.A. Eusuf (1998) Reductions in air conditioning energy caused by a near y park. Energy and Buildings, 29: 83-92.
- Walton, D., Dravitzki, V., & Donn, M. (2007). The relative influence of wind, sunlight and temperature on user comfort in urban outdoor spaces. Building and Environment,
- Weidon Liv, Huanling you, Junxia Dou : Urban- Rural humidity and temperature difference in the Binjing area.
- Wenhui kuang, Yue Liv, Yin Yin Dou, Wen Feng Chi, Guangs Hang Chen, Cheng Ieng Gao, Tian Rang Yang, Yiyuan Liu, Renhua Zhang (2015) : What are hot and

what are not in urban landscape ; quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China, *Landscape Ecol.*

- Wienert.U , Kreienkamp.F , Spekat.A et Enke.W, (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings,*MeteorologischeZeitschrift*, Vol. 22, No. 2, 179–185 (April 2013) by GebrüderBorntraeger 2013.
- Wilmers.F. (1997).Interactions of man and climate in the urban world- the influence of urbanization on the local climate and the influence of urban climate on man, *Climates and Societies — A Climatological Perspective*, Volume 36.
- Wilmers.F., (1990): Effects of vegetation on urban climate and buildings,*Energy and Buildings*, Volume 15, Issues 3–4, 1990–1991, Pages 507-514
- Yahia ,M.S.W.(2012).Microclimate and Thermal Comfort of Urban Spaces in Hot Dry Damascus Influence of urban design and planning regulations.
- YuehanDou. (2014). The influence of urban planning on urban thermal comfort, Master Thesis in MSc Urban Environment Management July 2014.
- Zawidzki, Machi. (2016). *Discrete Optimization in Architecture, architectural and urban layout*, Springer.
- ZEKRI, E.,(2010).Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain, thèse de doctorat.



1. Dimension climatique des attributs morphologiques relatifs aux espaces libres et aux bâtiments :

1.1. Impact de la densité :

La densité est souvent traitée par rapport à la question d'énergie dans la ville. Une forte corrélation est observée entre la densité et des typologies urbaines caractéristiques (A1.1 ,Salat et Nowacki, 2010) .

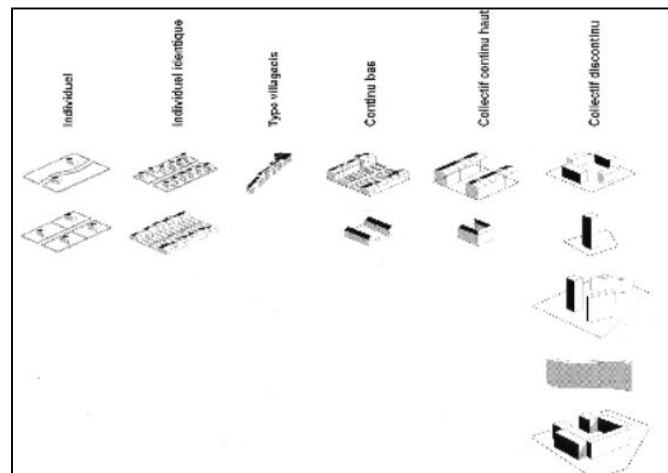


Figure A1.1 : Typologies urbaines caractéristiques

Avec une densité à l'îlot voisine de 1, les grands ensembles sont 4 fois plus denses que le pavillonnaire individuel (densité de 0,25) mais 4 fois moins denses que les centres anciens traditionnels (densité entre 4 et 5).

Parmi les premiers chercheurs qui ont essayé de démontrer le lien de causalité entre la densité et la consommation de l'énergie est Steadman (1979). Il suppose qu'une très forte densité réduit la demande énergétique du secteur des transports et contribue à l'augmentation de la demande énergétique en matière d'éclairage et de refroidissement et limite la possibilité de l'utilisation de l'énergie solaire. Selon Steemers (2003) les avantages et les inconvénients de la densification des villes sont à égalité et dépendent des infrastructures. Cependant, avec un angle d'obstruction supérieur à 30°, l'équilibre balance contre densification.

Afin d'établir la relation entre la densité urbaine et la consommation d'énergie, Steemers a appliqué un « modèle d'élévation numérique » (Digital Elevation Mode, DEM) sur une aire urbaine de 400mx400m afin d'évaluer les variations de densité à travers celles de trois paramètres morphologiques : profondeur du bâtiment, prospect entre bâtiments et compacité. Les conséquences de variation de l'angle d'obstruction sur la consommation de l'énergie étaient significatives, une augmentation de 10 ° a engendré une augmentation de 10% d'augmentation dans la consommation d'énergie. Pour une plage de densité qui varie de 1,25 à 5, les résultats montrent que le redoublement de la densité augmente généralement la consommation d'énergie de

l'ordre de 25%. Cette augmentation peut être rabattue à 21% grâce à l'optimisation des surfaces vitrées. (Stemers, 2003)

Pour Hui, 2001, La densité urbaine est un facteur important qui détermine les conditions de ventilation et de température à l'échelle urbaine. Les zones urbaines à forte densité expérimentent souvent de mauvaises conditions de ventilation conjuguée à la prolifération de l'îlot de chaleur. Dans les régions chaudes et humides ces conséquences sont traduites par une utilisation accrue de la climatisation. Cependant, cette situation peut être améliorée par la variation des hauteurs de bâtiments et la généralisation de la ventilation naturelle. Ainsi les conditions d'éclairage, de ventilation et des gains solaires peuvent être améliorés (Hui, 2001).

1.2. Impact de la contiguïté :

A côté de la densité, d'autres chercheurs ont opté pour l'utilisation d'autres indicateurs tel que : la compacité, la contiguïté, etc. Jean-Pierre Traisnel considérait que l'indice morphologique agissant le plus sur la consommation énergétique d'un bâtiment est le taux de contiguïté. Il représente le ratio entre les surfaces d'enveloppe non extérieures et la surface d'enveloppe totale (plancher non compris). L'importance de la contiguïté semble plus élevée en milieu urbain : elle permet de réduire notablement la part de parois extérieures d'un logement, grâce à la mitoyenneté (Traisnel, 2001).

Dans une recherche menée par Mindjid et al., un examen des caractéristiques énergétiques des tissus urbains était établi basé sur un bilan des besoins de chauffage et de climatisation. Le tissu urbain était considéré comme un système combinant morphologie de l'espace libre ou ouvert et propriétés constructives et architecturales du bâti qui le compose. 18 types ont été sélectionnés réparti en 5 périodes de construction : avant 1914 (période se distinguant par un taux de vitrage très faible), 1915-1948, 1949-1967, 1968-1975 et 1975-1981. Cette dernière période correspond à des constructions respectant la première réglementation thermique.

Les descripteurs de la géométrie des tissus urbains étaient :

1. Surface d'emprise au sol
2. Nombre moyen de niveaux
3. Surface totale des façades verticales
4. Périmètre de façade

TYPE URBAIN	HABITAT COLLECTIF DISCONTINU					HABITAT COLLECTIF CONTINU (îlot)								HABITAT INDIVIDUEL DENSE			HABITAT INDIVIDUEL EPARS		
	6.1	6.3	6.5	6.2	6.4	4.4	5.3	5.1	4.3	5.2	4.2	5.4	2.4	4.1	2.3	1.1	2.2	2.1	
DESCRIPTION	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Suresnes	Habitat collectif discontinu à Beauregard (Poissy)	Habitat collectif discontinu à Cergy ville nouvelle	Habitat collectif discontinu à Le Chesnay	Habitat collectif continu bas à Poissy	Habitat collectif continu bas à Mantes-la-Jolie	Habitat collectif continu haut à Levallois	Habitat collectif continu bas à Le Vésinet	Habitat collectif continu haut à Boulogne-Billancourt	Habitat collectif continu bas à Rueil-Malmaison	Habitat collectif continu bas à Paris, Porte de Champanet	Habitat individuel identique à Colombet	Habitat individuel continu bas Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel à Colombet	Habitat individuel identique à Cergy ville nouvelle	Habitat individuel identique à Saint Nom le Breteche	
IND./COL.	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	COL	IND	IND	IND	IND	IND	IND	
PLAN MASSE																			
Date de construction	de 1949 à 1967	de 1915 à 1948	de 1969 à 1974	de 1975 à 1981	de 1975 à 1981	av. 1914	de 1949 à 1967	av. 1914	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1915 à 1948	de 1969 à 1974	de 1975 à 1981	de 1975 à 1981	de 1915 à 1948	de 1969 à 1974	de 1969 à 1974	
Usat W/m ² /°C	2,366	2,188	2,01	2,25	2,25	2,088	2,386	2,088	2,188	2,188	2,188	2,188	1,789	1,475	1,075	2,04	1,789	1,789	
Besoins chauds W/m ² /°C.an	76,76	73,61	67,99	55,23	51,59	102,31	90,12	86,29	85,75	75,86	75,65	69,39	120,46	59,23	52,07	120,36	139,43	98,68	
CLASSEMENT	10	7	5	3	1	18	13	12	11	9	8	6	19	4	2	17	18	14	
Besoins froids W/m ² /°C.an	16,37	23,22	30,34	20,34	22,4	17,97	18,28	18,12	21,96	25,84	21,35	32,53	14,79	23,55	33,8	18,59	17,42	16,48	
CLASSEMENT	2	13	16	9	12	5	7	6	11	15	10	17	1	14	18	8	4	3	
Apports solaires W/m ² /°C.an	89,52	98,18	134,78	88,23	80,67	89,25	87,31	76,7	99,34	96,25	86,84	82,36	111,87	93,53	106,48	117,08	139,03	99,87	
CLASSEMENT	18	8	2	12	16	11	13	17	7	9	14	16	4	10	5	3	1	6	

Tableau A1.1 : Classement des typologies d'habitat

Afin de faciliter la lecture des résultats, les 18 typologies de tissu urbain étaient regroupées en 4 ensembles de telle manière à distinguer les logements individuels des logements collectifs et de mettre en lumière les différentiels de densité (Tableau A1.1).

Selon Arboit (2006), la morphologie urbaine actuelle est le résultat de l'accumulation de bâtiments construits pendant plusieurs périodes dont on a souvent ignoré le rôle de l'orientation et les conséquences de la conception urbaine et architecturale sur la consommation d'énergie.

La forme et l'orientation des îlots urbains ont une forte incidence sur l'insolation. Les îlots allongés selon un axe longitudinal Est-Ouest enregistreraient les meilleurs résultats avec $EVIAN.w = .046$ en hiver. Ceux qui sont allongés selon un axe Nord-Sud ne présentaient que $EVIAN.w = .020$.

$EVIAN.w$: the Effective Volumetric insolation of Potentially Collecting Areas

La largeur des canyons urbains a un grand impact sur l'insolation effective des façades Nord. Une réduction de 20,00m à 13,50 m a engendré une diminution de 0,012. Elle est encore moins pour les toits : elle varie de 0,001 jusqu'à 0,015 et arrive à 0,06 lorsque les arbres sont ajoutés.

L'homogénéité des bâtiments dans le cas des ensembles de logements sociaux (typologies compactes avec des toitures horizontaux) a donné une augmentation de .006 (6,17%).

Les toits plats horizontaux reçoivent 0,11 (6,18%) en plus d'ensoleillement comparés aux toits inclinés. Comparant les résultats obtenus, l'orientation des îlots a eu l'impact le plus important (56,25 %). L'homogène (54,34 %) en deuxième lieu, la densité urbaine de (37,12 %) (Arboit et al. 2006).

Dans une recherche menée par EIFER et LES (Les, 2011), une numérisation initiale et identification des principales typologies de construction a été faite suite à la sélection des villes d'étude, un balayage initial de types de bâtiments résidentiels et des

morphologies urbaines a été mené. En premier lieu une approche qualitative a été utilisée, en se basant en grande partie sur des entretiens avec des experts bien informés sur les styles architecturaux locaux, et les systèmes constructifs des quartiers urbains.

Chaque ville était parcourue via l'imagerie par satellite, les typologies les plus distinctes d'un point de vue morphologique étaient choisies. Après c'est les échantillons les plus homogènes qui ont été retenus.

Tous les échantillons sélectionnés s'étendaient sur une surface de 500 x 500 mètres, délimiter afin d'obtenir un tissu urbain homogène et constitué d'un seul type de bâtiment.

Des échantillons idéalisés ont été créés, le processus a commencé par identifier les caractéristiques les plus élémentaires du type de logement et de les reproduire de la manière la plus simple possible.

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que la performance énergétique d'un bâtiment dépend non seulement de sa propre conception, mais aussi sur la conception et la position des bâtiments dans ses environs immédiats.

Les résultats montraient que la performance énergétique ne dépend pas uniquement du bâtiment mais aussi de la conception et la position des bâtiments dans son environnement immédiat.

La densité des constructions, la hauteur moyenne des constructions et le rapport surface -volume se sont tous révélés être d'importants indicateurs dans l'évaluation de la demande d'énergie. La densité, la hauteur et l'emprise au sol ont montré une corrélation négative, tandis que le rapport surface -volume a montré une corrélation positive.

Pour la densité des constructions, on peut conclure qu'il existe une corrélation négative entre les deux, soutenant l'hypothèse que la plus grande densité conduit à une plus grande efficacité énergétique. Pour les faibles densités de moins de FAR (floor area ratio) 0,5, le besoin en énergie était d'environ 150 kWh/m²/an, alors que pour les plus fortes densités de plus de FAR 2, le besoin était autour de 100 kWh. Cependant cette relation n'est significative pour les densités inférieures FAR 1.

Dans toutes les villes, les valeurs importantes du rapport surface -volume des bâtiments isolés correspondaient aux performances énergétiques les plus faibles. A l'inverse, les bâtiments compacts avec hauteurs importantes (rapport surface/volume faible) correspondaient aux valeurs de performance les plus importantes.

La hauteur a montré une forte corrélation avec la demande d'énergie pour chauffage. Au-dessus d'une hauteur de 4 étages la variation de la demande d'énergie pour le chauffage devient considérablement moindre.

La densité, la hauteur moyenne des constructions et le rapport surface-volume sont tous révélés être de bons indicateurs pour la demande d'énergie pour le chauffage, avec des coefficients de corrélation de 0,77, 0,88 et 0,80 respectivement.

L'occupation du sol n'a pratiquement aucune corrélation, le coefficient était seulement de 0,40.

La densité, la hauteur et la couverture ont tous montré des corrélations négatives tandis que le rapport surface-volume a montré une corrélation positive. Le rapport surface au volume et l'occupation du sol présentait des relations linéaires ; hauteur et la densité présentaient des relations logarithmiques. L'îlot compact a présenté les meilleurs résultats pour les cas de : Paris, Londres et Berlin (avec une exception mineure), mais pas à Istanbul où le type d'appartement moderne local était le meilleur.

1.3.La compacité

Dupagne et Teller définissent la compacité comme un paramètre eulérien simple mais composite. C'est un outil d'analyse de l'espace urbain qui fournit des informations significatives et permet de faire des comparaisons avec d'autres références urbaines.

La définition que proposent les deux chercheurs, présente la compacité comme le rapport du volume de la boîte au volume de la sphère équivalente (c'est-à-dire celle disposant de la même surface enveloppe que la boîte).

La méthode de calcul de l'indicateur de compacité proposée dans le rapport ADEQUA semble plus propre à indiquer une certaine rentabilité de la construction (la surface de planchers par rapport à la surface de l'enveloppe) qu'une réelle valeur de la surface d'échange thermique. Les locaux tampons ne sont pas pris en compte dans cet indicateur qui traduit avant tout le rapport entre la quantité de matériaux utilisé et la surface utile dégagée.

L'indicateur de compacité, C, exprime la valeur de la surface d'échange de l'enveloppe des bâtiments rapportée au m² de plancher. Il est sans unité, il peut prendre des valeurs comprises entre 0.5 et quelques unités, pour des configurations courantes de bâtiments. La surface d'enveloppe est constituée des façades verticales exposées aux conditions extérieures, du sol et des toitures.

Plus C est faible, plus les constructions sont compactes et donc moins elles subissent les effets externes. $C = \text{Surface cumulée de l'enveloppe des bâtiments (m}^2\text{) / Surface cumulée des planchers (m}^2\text{)}$ (ADEQUA).

Un projet aurait donc une compacité satisfaisante lorsqu'il présenterait une surface utile intéressante par rapport à la surface des parois qui séparent le volume protégé de l'extérieur ou de locaux non chauffés ni isolés.

La compacité peut être entendue à l'échelle de l'agglomération ou à l'échelle du bloc urbain. Ces deux notions sont complètement différentes et n'ont pas du tout les mêmes impacts. La compacité de l'agglomération est à valoriser car elle s'oppose à l'étalement. Au contraire, la compacité au niveau du bâtiment ou du bloc urbain correspond à la surface d'enveloppe du bâtiment (murs + toit) divisée par le volume contenu par le bâtiment. Cette formule est utilisée principalement par les thermiciens :

plus S/V est petit, plus un bâtiment est compact, et moins grandes seront les pertes de chaleur et l'énergie nécessaire au chauffage de celui-ci. En effet, augmenter la compacité revient à augmenter la taille et le volume du bâtiment et entraîne des effets néfastes sur le volume passif. Ce dernier est la partie du bâtiment située à moins de 6 mètres d'une fenêtre et qui bénéficie donc d'un éclairage et d'une ventilation naturels.

Ainsi Densité n'est pas compacité, les tissus urbains traditionnels à Paris ont une compacité thermique plus faible que celle de grandes tours ou barres monolithiques modernistes. Ils sont toutefois plus denses que les quartiers périphériques de tours. La compacité thermique S/V est donc un indicateur à utiliser avec précaution : il ne décrit pas la densité, ni même la forme puisqu'il varie plutôt avec la taille.

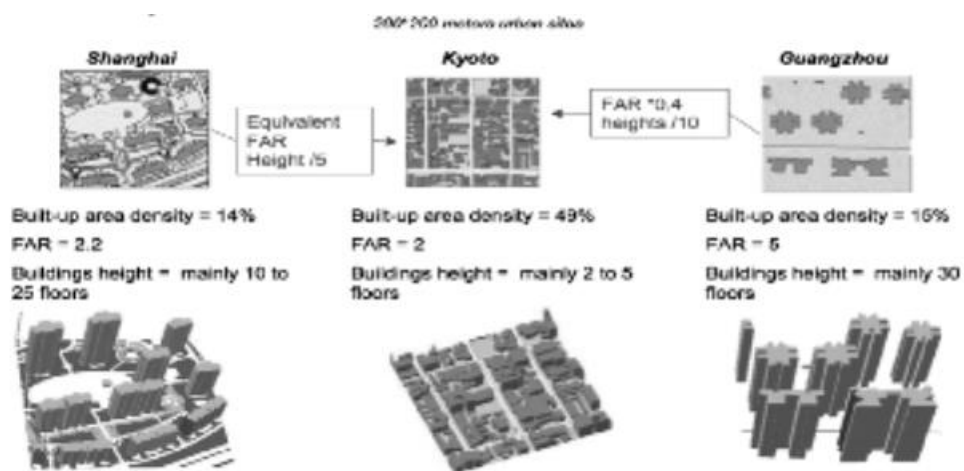


Figure A1.2. Compacité des différentes typologies (d'après Dupagne et Teller).

Estimation of Black Globe Temperature for Calculation of the WBGT Index
(d'après Dr. Vincent E. Dimiceli, Oral Roberts University, Tulsa, Oklahoma)

The OSHA manual includes the following formulas for the WBGT:

1. For indoor and outdoor conditions with no solar load, WBGT is calculated as:

$$WBGT = 0.7NWB + 0.3GT$$

2. For outdoors with a solar load, WBGT is calculated as

$$WBGT = 0.7NWB + 0.2GT + 0.1DB$$

where:

WBGT	=	Wet Bulb Globe Temperature Index
NWB	=	Nature Wet-Bulb Temperature
DB	=	Dry-Bulb Temperature
GT	=	Globe Temperature

An Algorithm

In this section, an algorithm is created for the calculation of globetemperature estimates. First, the values readily available from the NWS are considered. These will be input values to be entered at the beginning of the program.

1. The values to be entered are wind speed (u in meters per hour), ambient temperature (T_a in degrees Celsius), dew point temperature (T_d in degrees Celsius), solar irradiance (S in Watts per meter squared), direct beam radiation from the sun (f_{db}) and diffuse radiation from the sun (f_{dif}).
2. The zenith (z) angle may be entered or calculated.
3. The thermal emissivity must be calculated next. Using the following two equations.

- a. $e_a = \exp\left(\frac{17.67(T_d - T_a)}{T_d + 243.5}\right) \times (1.0007 + 0.00000346P) \times 6.112 \exp\left(\frac{17.502T_a}{240.97 + T_a}\right)$

- b. $\varepsilon_a = 0.575e_a^{(1/7)}$

4. Now B and C can be calculated using the following equations.

$$\text{a. } B = \frac{s\left(\frac{f_{db}}{4\cos(z)} + (1.2)f_{dif}\right)}{(5.67 \times 10^{-8})} + (\varepsilon_a)T_a^4$$

$$\text{b. } C = \frac{0.437u^{0.58}}{0.95(5.67 \times 10^{-8})}$$

5. Finally the estimate for globe temperature is calculated using equation (10).

$$T_g = \frac{B + CT_a + 7680000}{C + 256000}$$

Abstract

The evaluation of outdoor thermal comfort plays an important role in promoting the quality of urban life. The design for thermal comfort requires tools that provide better assessment of energy flows between different urban components.

This study evaluates the impact of urban morphology as characterized by parameters such as sky view factor, h/w ratio, density, porosity, orientation, on thermal energy flow. Seven distinct public spaces ranging from: Corso, place, square to public gardens, have been used for the purpose of this study.

Considering the large physiological and psychological variations from one user to another, we used two different approaches to assess thermal comfort. A static approach (subjective evaluation) based on statistical data collected from measurements taken at the field sites.

And a dynamic approach based on crossing urban morphological data with microclimate data and comfort index along pedestrian paths manifesting therefore the dynamic aspect of perceived climatic parameters.

Three thermal indexes are evaluated: The empirical index “TEP” (equivalent predicted temperature), established by introducing the collected data into the software package "SPSS", and based on a multiple linear regression model. The second one presents an update of the mathematical model COMFA + *, which was developed using the software Matlab. The third index is PET (predicted physiological temperature), calculated using the two software Envi-met and Biomet.

Obtained results will help architects to evaluate the impact of outdoor space morphology on thermal comfort and will also contribute to the improvement of urban design strategies.

Keywords: Urban morphology, morphological indexes, outdoor thermal comfort; TEP; COMFA+; PET.*

ملخص

تلعب المساحات العمومية دورا رئيسيا في تعزيز نوعية الحياة الحضرية. كما تؤثر الظروف البيئية السائدة بها بشكل معتبر على سلوك المستخدم. على الرغم من أن تصرفات الناس تجاه الظروف المناخية لا إرادية، فإن غالبا ما يتم ترجمتها من خلال الاستخدامات المختلفة المقرونة بظروف مناخية معينة. بهدف تحديد العلاقة بين الخصائص المورفولوجية والظروف الحرارية المقترنة، أجريت دراسة على ستة مواقع في مدينة عنابة تشمل سبعة مساحات عمومية تتنوع من ساحات إلى حدائق.

في الواقع، الرفاهية الحرارية بالأماكن الخارجية متعددة الجوانب: في تشمل الجانب الفسيولوجي المتعلق بالنظام الحراري الخاص بالجسم البشري، والنفسي المتعلق بمختلف أنماط التكيف. وهكذا تم تقييم الظروف الحرارية باستخدام نهجين: أحدهما ثابت و الآخر ديناميكي.

هدف المنهاج الأول هو حساب المؤشرات الرفاهية الحرارية الخارجية. أما الثاني فهو يعتمد على مسار الديناميكي عبر مختلف الأحياء.

تم تقييم المؤشرات الثلاثة الخاصة بمستوى الرفاهية في هذه الدراسة كالتالي: مؤشر TEP التجريبي، الذي أنشئ بعد معالجة البيانات التي تم جمعها خلال الأبحاث الميدانية باستعمال البرنامج الرقمي الإحصائي "SPSS"، وعلى أساس نموذج الانحدار الخطي المتعدد. أما المؤشر الثاني فهو تحديث للنموذج الرياضي CoMFA + *، الذي تم حسابه عن طريق Matlab. النموذج الفسيولوجي الثالث هو PET، الذي تم تقييمه عن طريق البرنامجين الرقميين ENVI و BIOMET.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الخصائص المورفولوجي للنسيج العمراني تساهم في تحسن الرفاهية الحرارية في المساحات الخارجية لأنها لا تساعد المهندسين المعماريين في تحسين فهم تأثير البيئة الحرارية على الرفاهية فحسب ولكنها تساهم أيضا في تحسين الاستراتيجيات الحضرية المختلفة.

كلمات البحث

المساحات العمومية، الرفاهية الحرارية الخارجية ,
, TEP, Comfa+*, PET.