

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE CONSTANTINE 3
FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME



POUR UNE GEOMETRIE URBAINE COMBINANT CONFORT THERMIQUE
EXTERIEUR ET ECONOMIE D'ENERGIE

Cas des cours urbaines en climat semi-aride

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat ès sciences
Option ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Par
Chahrazed KEDISSA

Année Universitaire

2019-2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE CONSTANTINE 3
FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

N° d'ordre :

Série :



POUR UNE GEOMETRIE URBAINE COMBINANT CONFORT THERMIQUE
EXTERIEUR ET ECONOMIE D'ENERGIE

Cas des cours urbaines en climat semi-aride

THESE

Présentée pour l'Obtention du
Diplôme de Doctorat ès sciences
Option ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Par

Chahrazed KEDISSA

Devant le Jury Composé de :

Pr. Saffiddine Rouag Djamila	Université Constantine 3	Président
Pr. Mazouz Said	Université Oum El Bouaghi	Examineur
Pr. Boussoualim Aicha	EPAU Alger	Examineur
Dr. Bellara Louafi Samira	Université Constantine 3	Examineur
Pr. Abdou Saliha	Université Constantine 3	Directeur 1
Pr. Belarbi Rafik	Université La Rochelle	Directeur 2

Année Universitaire
2019-2020

REMERCIEMENTS

Mes remerciements, tout d'abord, sont au tout puissant pour la santé, la volonté et la patience qu'il m'a donné pour achever ce travail.

*Je remercie aussi vivement tous ceux grâce à qui ce travail de recherche a été mené à bien et qui m'ont soutenue tout au long de ces années d'étude au sein des deux laboratoires Architecture Bioclimatique et Environnement **ABE** de la faculté d'Architecture et d'urbanisme de l'université de Salah Boubnider de Constantine et le laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement **LaSIE** de l'université de La Rochelle en France.*

*Mes remerciements les plus élogieux vont à ma Directrice de thèse **Pr. Abdou Saliha** pour son encadrement et sa disponibilité. Elle m'a accordé la liberté nécessaire pour l'accomplissement de mes travaux tout en y gardant un œil critique et avisé. Elle a été un véritable partenaire dans les échanges d'idées très fructueux et stimulants, par ses nombreux conseils tout au long de l'avancement de la thèse et surtout par ses qualités humaines inégalables.*

*Je remercie également **PR. Belarbi Rafik** de l'université de la rochelle d'avoir accepté mon co-encadrement et ouvert les portes de son laboratoire pour mener ce travail à ses objectifs.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et évaluer ce travail.

*Je tiens aussi à remercier mes collègues et amis des deux rives **Samira ELouafi**, **Fouzia Bouchriba** et **Islam Boukhelkhal** du laboratoire **ABE**: pour tout leur temps consacré à ma formation sur les logiciels townscape et Envimet, **Zaid Romani**, **Remy Greffet** et surtout **Rémon Lapisa**, à la gentillesse angélique, du laboratoire **LaSIE** qui ont consacré de leur précieux temps pour m'initier au programme **TRNSYS 17** alors qu'ils étaient tous en phase critique de leurs recherches.*

*Ma reconnaissance est immense à l'égard du **PR. Mazarakis Andreas** de l'université de Freiburg qui n'hésite jamais à fournir gratuitement aux doctorants les nouveautés de son logiciel **RayMan**.*

*J'exprime ma reconnaissance aux différentes personnes qui m'ont été d'une grande aide : mes collègue et amis : **Amina Boukadoum**, et **Hafid Bouhamla**, mes beaux frères **M. Larbi** et **Aboud** à qui je souhaite prompt rétablissement et ma **Soussou**.*

*Merci à tous mes amis et collègues des deux laboratoires : **Karima**, **Mounira**, **Nadia**, **Sara**, **Samia**, **Maamar**, **Nabil**, **Tasaadit**, **Kamel**, **Yacine**, **Rachid**, **Ahmed** et **Boris** avec qui j'ai partagé de nombreux bons moments.*

*Enfin, j'adresse toute mon affection à **ma famille** et mes joyaux : **Nardjess**, **Khadija** et **Yasmine** qui m'ont soutenue, supportée et m'ont tant encouragée durant ces années d'études.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A Mes chers **parents** qui ont fait preuve de beaucoup de patience et de sacrifice, qu'ils trouvent ici un modeste témoignage de mon amour infini.*

*A la prunelle de mes yeux ma sœur **Fatima zohra** et son conjoint **Mohamed Larbi** qui ne cessent de me prêter épaule dans tous les moments difficiles.*

TABLE DES MATIERES

	Page
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES EQUATIONS.....	xii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xiii
RESUMES.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE	
Introduction.....	1
1- Problématique	4
2- Les hypothèses.....	9
3- Objectif de la recherche.....	10
4- Méthodologie et outils.....	10
CHAPITRE I	
MICROCLIMAT URBAIN ET CONFORT THERMIQUE	
Introduction.....	13
I-1- Les échelles du climat	14
I-2- Ilot de chaleur urbain.....	16
I-2-1- Ilot de chaleur de la canopée urbaine.....	16
I-2-2 - Les ilots de chaleur de surface.....	18
I-2-3 - Causes des ilots de chaleur urbains.....	19
I-2-3 -a- Rayonnement net accru.....	21
I-2-3 -b- Stockage thermique accru.....	23
I-2-3 -c- Evaporation réduite.....	24
I-2-3 -d- Apport anthropique.....	26
I-2-3 -e- Convection réduite.....	26
I-2-4 - Effet de l'îlot de chaleur sur la consommation énergétique.....	27
I-2-5 - Effet de l'îlot de chaleur sur la santé des populations.....	28
I-3- Le confort dans les espaces extérieurs.....	29
I-3-1- Le confort thermique.....	29
I-3-1-a- Effets thermiques.....	29
I-3-1-a-1- Effet dû à la conduction.....	29
I-3-1-a-2- Effet dû à la convection.....	30
I-3-1-a-3- Effet dû à l'évaporation.....	31
I-3-1-a-4- Effet dû au rayonnement.....	31
I-3-1-a-5- La température moyenne radiante (MRT ou Tmrt).....	33
I-3-1-b- Effet métabolique.....	34
I-3-1-c- Effet vestimentaire.....	34
I-3-1-d- Thermique du corps humain.....	35
I-3-1-e -Les indices du confort thermique dans les espaces extérieures.....	37
I-3-1-e-1- Le vote moyen prévisible.....	37
I-3-1-e-2- La température physiologique équivalente.....	38
I-3-1-e-3 - L'indice universel du climat thermique.....	41
I-3-1-e-4 - La température physiologique équivalente modifiée.....	43
I-3-1-f- Subjectivité du confort thermique.....	44
I-3-2- Le confort aéraulique (Effets mécaniques).....	46

I-3-3- Impact des facteurs microclimatiques sur la fréquentation des places	48
Conclusion.....	51

CHAPITRE II

STRATEGIES D'AMELIORATION DE L'AMBIANCE THERMIQUE URBAINE

Introduction.....	53
II- Stratégies d'amélioration de confort dans les espaces urbain.....	53
II -1- Les matériaux.....	54
II-2- L'eau.....	57
II -3- La végétation.....	61
II -3- 1- Arbres et Evapotranspiration.....	63
II -3- 2- Arbres et rayonnement solaire.....	65
II -3- 3- Détails optimisant l'amélioration du microclimat par les arbres.....	68
II -3- 4- Pelouse et rayonnement solaire.....	71
II -3- 5 -Végétalisation du pourtour des bâtiments.....	72
II -3- 6- Végétalisation des surfaces des bâtiments.....	75
II- 3-7- L'arbre et le vent.....	76
II -4- Les brises vents.....	76
II- 5- Effet combiné de l'eau, le végétal et la ventilation urbaine.....	77
II-6- Le Bâtiment.....	78
II- 7- La forme urbaine.....	82
Conclusion.....	83

Chapitre III

LA GEOMETRIE URBAINE

Introduction	86
III-1- Définition du concept place.....	87
III-2- Composition urbaine et place.....	89
III-2- 1- La fermeture des places.....	89
III-2- 2- Forme d'une place.....	90
III-2- 3- Dimensions et proportions des places.....	91
III-3- Microclimat et Place.....	94
III-3-1- La géométrie urbaine.....	94
III-3-1- 1- Descripteurs géométriques d'un espace urbain.....	95
III-3-1-1-a- le canyon urbain.....	95
III-3-1-1-a-1-Le rapport d'aspect.....	96
III-3-1-1- a-2- Orientation du canyon.....	97
III-3-1-1-b- Sky view factor (SVF).....	103
III-3-1- 2- Descripteurs additionnels.....	110
III-3-1-2-a-La densité de la surface frontale.....	110
III-3-1-2-b- La densité du plan.....	110
III -3-1-2-c- La fraction végétale.....	111
III-3-1- 3- Autres aspects de la géométrie urbaine.....	111
III-3-1-3-a- L'effet dièdre.....	111
III-3-1-3-b- Les galeries (espace semi-ouvert).....	113
III-3-1-3- c - L'espace couvert (ou Sabat).....	114
III-3- 2- L'ensoleillement d'une place.....	115
III-3-3- Forme et proportions d'une place.....	115
III-3-4 - Conditions du vent dans la place.....	124
III-4- Bâtiments et Place.....	130

III-5- Les aménagements d'une place.....	130
Conclusion.....	130

CHAPITRE IV

CONTEXTE ET METHODOLOGIE

Introduction.....	132
IV- 1 - Présentation du site d'intervention.....	134
IV-2- Etude climatique de Constantine (ville nouvelle Ali Mendjeli).....	136
IV- 3- Analyse Bioclimatique de Constantine (ville nouvelle Ali Mendjeli)	140
IV- 3- 1- Le diagramme bioclimatique d'Olgyay.....	140
IV- 3-2- Application de la méthode de Mahoney.....	144
IV- 3- 3 - Le diagramme psychrométrique.....	145
IV- 4- Méthodologie et outils.....	147
I- 4- 1- La simulation	148
IV- 4- 1-1- Townscope 3.2.....	149
IV-4-1-2-Envi-met 3.1.....	151
IV-4-1-3-RayMan pro 3.1.....	153
IV-4-1-4- Trnsys 17.....	153
IV- 4- 2- Les mesures.....	155
IV- 4- 2-1 - Les stations d'études.....	156
IV- 4-2-2- Justification du choix du site de mesures.....	159
Conclusion.....	164

Chapitre V

MODELISATION : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Introduction.....	166
V-1- Résultats généraux des simulations de l'ensoleillement des places.....	166
V-1-1- Orientation Nord-Sud.....	167
V-1-2- Orientation Nord est– Sud ouest.....	175
V-1-3- Orientations Nord ouest –Sud est.....	175
V-1- 4- Orientations Est – ouest.....	175
V-2- Résultats selon les conditions requises pour l'ensoleillement des places...	175
V-2-1- Orientation Nord-Sud.....	176
V-2-2- Orientations NO -SE / NE –SO.....	183
V-3 - Synthèse des simulations de l'ensoleillement.....	185
V-4- Modélisation des paramètres climatiques dans les géométries retenue.....	185
V-5 - Résultats des simulations pour le solstice d'hiver.....	187
V-5- 1- Journée du 21/12.....	187
V-5-1- a - Températures de l'air.....	187
V-5-1-b- Les vitesses du vent	190
V-5-1- c- Températures des surfaces au sol.....	191
V-5-1-d- Evaluation du confort thermique piéton pour le 21/12.....	193
V-5-1-d-1- Condition de confort thermique dans la zone centrale de l'espace....	194
V-5-1- d -2 - Condition de confort thermique dans la zone Nord de la place_...	197
V-5-1- d-3 - Condition de confort thermique dans la zone Sud.....	198
V-5-1-e- Diversité des ambiances thermiques dans les stations de mesures.....	200
V-5- 2- Journée du 23/12.....	201
V-6- Résultats des simulations pour le solstice d'été.....	202
V-7-Orientation Nord-ouest-Sud-est.....	210
V-8 – Evaluation de la consommation énergétique.....	210

Conclusion.....	210
	212
Chapitre VI	
INVESTIGATION IN SITU : OPTIMISATION ET VALIDATION	
Introduction.....	216
VI-1- Optimisation de l'inégale répartition de l'ensoleillement sur la place	216
VI-2- Optimisation de la ventilation de la place	221
VI-3- Investigation.....	223
VI-3-1- Mise en évidence du phénomène de l'ICU.....	224
VI-3-2- Comparaison des paramètres microclimatiques dans les stations de mesures	230
VI-3-3- Evaluation du confort thermique dans les stations de mesures.....	232
VI-3-4- Mauvaises adaptation.....	232
Conclusion.....	236
 CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	 239
 BIBLIOGRAPHIE.....	 249
LISTE DES ANNEXES	
Annexe A.....	274
Annexe B.....	278
Annexe C.....	279
Annexe D.....	302
Annexe E.....	305

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
Fig. I.1	Pourcentage de population résident dans l'espace urbain par continent 2050 1950-basé sur des données de nations unies 2010.	13
Fig. I.2	Représentation schématique des échelles climatiques et des couches limites.....	15
Fig. I.3	Profil du vent dominant moyen en site homogène et en site urbain.....	15
Fig. I.4	Représentation en plan des isothermes d'un îlot de chaleur urbain nocturne.....	16
Fig. I.5	Mesures des températures de l'air à différentes heures d'une journée d'été (claire et calme) à Vancouver.....	17
Fig. I.6	Les variations journalières des températures d'air et de surfaces selon les types de milieu.....	19
Fig. I.7	Carte des températures des surfaces Atlanta.....	19
Fig. I.8	Bilan d'énergie au-dessus d'une ville.....	20
Fig. I.9	Rayonnement net et piégeage radiatif en milieu urbain.....	21
Fig. I.10	valeurs d'albédo pour les différents types de surfaces urbaines.....	22
Fig. I.11	Températures de l'air au-dessus des surfaces naturelles et des surfaces artificielles.....	22
Fig. I.12	La différence entre la température de l'air et la température de l'asphalte.....	22
Fig. I.13	Perturbation du taux d'infiltration en milieu urbain due à l'imperméabilisation des sols.....	24
Fig. I.14	Variation diurne de l'humidité absolue entre une zone urbaine et une zone rurale en été.....	25
Fig. I.15	Profils de vitesses du vent pour trois différents types de surfaces. La rugosité α est plus forte dans une ville dense avec des immeubles hauts.....	26
Fig. I.16	Représentation schématique du phénomène de brise urbaine.....	27
Fig. I.17	Températures minimales et maximales de l'été 2003 enregistrées à la station Paris Montsouris (zoom du 1 ^{er} au 22 août) et nombre de décès à Paris.....	28
Fig. I.18	L'évolution journalière des composants du rayonnement solaire au niveau piéton.....	32
Fig. I.19	Composants de la Tmrt dans un environnement urbain.....	33
Fig. I.20	Variables du bilan énergétique de l'être humain.....	36
Fig. I.21	Relation entre Tmrt et PET durant des journées d'été (2001) à Fribourg.....	41
Fig. I.22	Le diagramme de dispersion de l'UTCI et la PET à Fribourg pour la période 1.09.1999 au 30.04.2010.....	43
Fig. I.23	Corrélation entre la mPET et la PET pour une enquête sur 2071 sujets.....	44
Fig. I.24	Adaptation des vêtements selon la vitesse de vent et la température de l'air.....	45
Fig. I.25	Conditions de confort pour un piéton à l'ombre et au soleil en fonction du vent et de la température de l'air d'après Penwarden et	

	al. 1975.....	49
Fig. I.26.	Pourcentage des usagers assis en fonction de la température de l'air et du soleil dans tous les espaces publics.....	49
Fig. I.27	Pourcentage des usagers assis au soleil en fonction de la température de l'air (aussi pour ceux à l'ombre).....	49
Fig. I.28	Proportion d'utilisateurs de la place sous le soleil en fonction de la proportion de la place au soleil.....	50
Fig. II.1	Définition des matériaux chauds et des matériaux froids.....	55
Fig. II.2	Différentes couvertures utilisées pour l'ombrage.....	56
Fig. II.3	Températures surfaciques des carreaux de béton sous différentes couvertures utilisées pour l'ombrage.....	56
Fig. II.4.	Températures de l'air des carreaux de béton sous différentes couvertures utilisées pour l'ombrage.....	57
Fig. II.5	Températures surfaciques de l'eau et de l'asphalte.....	58
Fig. II.6	Effet des bassins d'eau sur le refroidissement de l'air.....	59
Fig. II.7	Stratégie de perméabilisation des surfaces urbaines.....	60
Fig. II.8	L'eau ruisselant en surface dans les espaces ouverts augmente le Flux latent.....	61
Fig. II.9	Services et fonctions de l'arbre urbain à toutes les échelles.....	63
Fig. II.10	Effet combiné de l'ombre (tenture ou arbre) sur pelouse sur le confort humain.....	64
Fig. II.11	Progression de la foliation durant les différentes saisons.....	65
Fig. II.12	Absorption et transmission des feuilles d'arbres.....	66
Fig. II.13	Comparaison de l'ombre projetée par rapport au diamètre de la couronne.....	65
Fig. II.14	Formes des ombres projetées selon les différentes formes d'espèces d'arbre.....	67
Fig. II.15	Variations de la longueur de l'ombre d'un arbre selon la course solaire journalière et saisonnière.....	68
Fig. II.16	Contrôle de l'ensoleillement par les végétaux.....	68
Fig. II.17	Image thermique d'un pavage minéral et pelouse d'un parc urbain.....	72
Fig. II.18	Végétalisation du pourtour du Bâtiment.....	73
Fig. II.19	Réduction des températures des surfaces de bâtiment par l'ombrage des arbres.....	74
Fig. II.20	Façades et toiture végétales.....	75
Fig. II.21	Haie brise-vent semi perméable.....	77
Fig. II.22	Parmi les stratégies de rafraîchissement utilisées dans l'Exposition de Séville.....	78
Fig. II.23	Effets climatiques des systèmes de rafraîchissement par humidification utilisés à Séville.....	78
Fig. II.24	Termes du facteur d'ombrage K.....	81
Fig. II.25	Les facteurs qui influencent la consommation énergétique des bâtiments.....	82
Fig. II.26	Economies d'énergie de refroidissement en fonction du rapport hauteur arbre / hauteur façade.....	83
Fig. III.1	La place centrale à sienne (Italie) sans végétation.....	87
Fig. III.2	La place d'Armes à Blida (Algérie) avec végétation.....	87
Fig. III.3	Place du Marché Neuf à Vienne. Illusion de fermeture.....	89
Fig. III.4	Place de l'amphithéâtre, Lucques (Italie).....	90

Fig. III.5	Place saint Pierre, Rome.....	90
Fig. III.6	Proportion d'une enceinte urbaine.....	92
Fig. III.7	Les tracés des places les plus fréquents dans la ville contemporaine	93
Fig. III.8	Un canyon symétrique et ses descripteurs	95
Fig. III.9	Le rapport d'aspect d'une place.....	95
Fig. III.10	Relation de l'intensité de l'ICU nocturne et le rapport H/W.....	96
Fig. III.11	Effet du rapport H/W sur les températures de l'air.....	97
Fig. III.12	Différents ratios H/W configurés dans l'étude sur Athènes.....	92
Fig. III.13	Effet de l'orientation du canyon urbain sur le confort piéton pour des valeurs d'Albédo 0.2, 0.45 et 0.7.....	100
Fig. III.14	Effet de l'augmentation de la hauteur sur la sensation thermique.....	102
Fig. III.15	La charge thermique annuelle diminue en augmentant le nombre d'étages (hauteur).....	109
Fig. III.16	Photos Fish-eye des différentes valeurs du SVF.....	104
Fig. III.17	Le SVF en fonction du rapport d'aspect H/W.....	104
Fig. III.18	Une vue schématique du type cours rectangulaire et ses descripteurs géométriques avec une approximation du SVF en fonction du L/W et H/W.....	105
Fig. III.19	La consommation électrique globale évaluée en fonction du SVF.....	108
Fig. III.20	Diagrammes polaires des dix stations de mesures à Telheires.....	108
Fig. III.21	Estimation de la PET pour un été chaud à Telheires.....	109
Fig. III.22	Modèles génériques des simulations.....	111
Fig. III.23	Recommandations concernant la disposition, la hauteur et la densité des bâtiments.....	111
Fig. III.24	Effets de double dièdre.....	112
Fig. III.25	Echanges radiatifs entre les différentes surfaces composant l'environnement de l'espace ouvert.....	112
Fig. III.26	Arcades procure de l'ombre.....	113
Fig. III.27	Arcades procure de l'ombre.....	113
Fig. III.28	Températures de l'air journalières dans un canyon urbain (H/W=1, E-O) avec et sans colonnade.....	114
Fig. III.29	Passage couvert (Iran).....	114
Fig. III.30	Effet de la variation du rapport $R_2 = W/L$ (élongation de la forme) sur la demande énergétique à Rome.....	114
Fig. III.31	Evolution journalière de la PET dans le centre d'une place en fonction de l'orientation et le rapport H/W.....	117
Fig. III.32	Les géométries des cours avec les ouvertures en rouge. Le cas de référence est la cour complètement entourée par des bâtiments.....	118
Fig. III.33	La température moyenne radiante et l'indice PMV* à 1.5 m au-dessus du sol pour une personne debout dans le P2 et P3.....	120
Fig. III.34	Effet de l'augmentation de l'albédo des surfaces.....	121
Fig. III.35	Comparaison des températures moyennes radiantes pour différentes stratégies d'atténuation de la chaleur.....	122
Fig. III.36	Géométrie de la place avec l'emplacement et pourcentage des couvertures utilisées.....	122
Fig. III.37	Stratégies bioclimatiques utilisées dans les deux places à Thessaloniki, Grèce.....	123
Fig. III.38	Anomalies des mouvements d'air en tissu urbain affectant le confort piéton.....	125
Fig. III.39	Représentation graphique du modèle CFD avec les directions du	

	Vent.....	126
Fig.III.40	Square avec les ouvertures au milieu et square avec les ouvertures aux coins.....	126
Fig.III.41	vitesse de vent en fonction du rapport des hauteurs immeubles aux bords/ hauteurs immeubles du voisinage.....	127
Fig.III.42	Vitesses du vent dans le square.....	127
Fig.III.43	Vitesses du vent dans le square avec une ouverture placée au milieu et aux coins.....	127
Fig.III.44	Régimes d'écoulement du vent à une direction transversale selon le rapport H/W.....	128
Fig.III.45	Dimensions transversales pour une maille.....	129
Fig.III.46	Eblouissement affectant la place causé par le revêtement d'une façade.....	130
Fig.IV.1	Répartition de la consommation d'énergie par produit et par secteur en Algérie.....	133
Fig.IV.2	Consommation électrique spécifique annuelle en KWh des équipements Ménagés.....	133
Fig.IV.3	Situation de La ville nouvelle Ali Mendjeli.....	134
Fig.IV.4	Les altitudes à Ali Mendjeli.....	135
Fig.IV.5	Carte des pentes de la Ville nouvelle Ali Mendjeli.....	135
Fig.IV.6	Vue aérienne de la ville d'Ali Mendjeli.....	136
Fig.IV.7	Climat de Constantine selon la classification Köppen.....	137
Fig.IV.8	Moyenne mensuelle de la durée d'insolation totale en heure de Constantine. Période 2007-2016.....	138
Fig.IV.9	Nombre de jours très froids, très chauds et caniculaires à Constantine. Période 1996-2016.....	139
Fig.IV.10	Diagrammes des variations des directions et vitesses de vent de la ville de Constantine. Période 2007-2016.....	140
Fig.IV.11	Diagramme bioclimatique d'Olgay appliqué à Constantine.....	141
Fig.IV.12	Schéma des indicateurs bioclimatiques d'Olgay appliqué à Constantine.....	141
Fig.IV.13	Calendrier des besoins climatiques de Constantine.....	141
Fig.IV.14	Diagramme solaire de la ville de Constantine et besoins climatiques.....	143
Fig.IV.15	Diagramme psychrométrique de la ville de Constantine.....	143
Fig.IV.16	Périmètres des configurations simulées.....	146
Fig.IV.17	Proportions de quelques configurations simulées.....	150
Fig.IV.18	Corrélation entre les données climatiques fournies par la météo et simulées par Envimet.....	151
Fig.IV.19	Parois et masques solaires pour évaluer la consommation énergétique autour de la de la place.....	152
Fig.IV.20	Vue aérienne des quatre stations de mesures à Ali Mendjli.....	154
Fig.IV.21	Photos aériennes des stations.....	156
Fig.IV.22	Photo aérienne de la station TV.....	157
Fig.IV.23	Répartition des valeurs des svf dans les trois stations de mesures.....	157
Fig.IV.24	Répartition des points de mesures dans chaque station.....	159
	Couleurs claires des façades.....	160
Fig.IV.26	Courses solaires des trois stations de mesures.....	161
Fig. IV.27	Durée d'ensoleillement des stations de mesures pour les dates significatives de l'étude.....	161
Fig. IV.28	Nature de la couverture au sol des points de mesures.....	162

Fig. IV.29	La végétation existante dans les stations de mesure.....	162
Fig. IV.30	Climatiseurs présents dans la station B.....	163
Fig. IV.31	Appareils de mesures des variables climatiques.....	164
Fig. V.1	Proportions des différentes places simulées en quête du meilleur facteur de forme d'une place.....	181
Fig. V.2	Indicateurs géométriques des configurations simulées par Envimet 3.1, Intervalle $0.4 < SVF \leq 0.6$	186
Fig. V.3	Indicateurs géométriques des configurations simulées par Envimet 3.1 $SVF \leq 0.3$	186
Fig. V.4	Positions des récepteurs au niveau des stations simulées.....	187
Fig. V.5	Variations de la température de l'air aux niveaux des stations simulée pour le 21/12.....	188
Fig. V.6	Vitesses du vent dans les stations simulées pour le 21/12 à 8h.....	188
Fig. V.7	Rayonnement en grandes longueurs d'ondes dans les stations simulée pour le 21/12 à 8h.....	189
Fig. V.8	Corrélation H/W et SVf et les températures de l'air pour le 21/12.....	189
Fig. V.9	Flux sensible dans les stations simulées pour le 21/12 à 16h.....	190
Fig. V.10	Vitesses du vent dans les stations simulées pour le 21/12 à 12h.....	191
Fig. V.11	Températures des surfaces au sol des stations simulées pour le 21/12.....	191
Fig. V.12	Températures des surfaces au sol des stations simulées pour le 21/12.....	192
Fig. V.13	Rayonnement en GLO dans les stations simulées pour le 21/12 à 16h.....	193
Fig. V.14	Rayonnement en GLO dans les stations simulées pour le 21/12 à 16h.....	194
Fig. V.15	Variations de la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/12.....	195
Fig. V.16	Variations de la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/12.....	196
Fig. V.17	Variations de la PET dans la zone Nord des stations simulées pour un 21/12.....	198
Fig. V.18	Variations de la mPET dans la zone nord des stations simulées pour le 21/12.....	198
Fig. V.19	Variations de la PET dans la zone sud des stations simulées pour le 21/12.....	199
Fig. V.20	Variations de la mPET dans la zone sud des stations simulées pour le 21/12.....	199
Fig. V.21	Ecart de la PET entre zones à l'ombre et zones au soleil des stations simulées pour le 21/12.....	200
Fig. V.22	Ecart de la mPET entre les zones à l'ombre et zones au soleil dans les stations simulées pour le 21/12.....	200
Fig. V.23	Variations de la Tmrt dans la zone centrale des stations simulées pour le 23/12.....	201
Fig. V.24	Variations de la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 23/12.....	202
Fig. V.25	Variations de la mPET dans la zone centrale des stations simulées pour le 23/12.....	202
Fig. V.26	Variations de la Température de l'air dans la zone centrale des	

	stations simulées pour la Journée type d'été 21/06.....	203
Fig. V.27	Variations de la Température de l'air dans la zone centrale des stations simulées pour le 26/06.....	203
Fig. V.28	Déviations du vent par rapport à l'orientation de l'espace le 26/06 et une allée minérale.....	204
Fig. V.29	Variations de la température au sol en fonction des vitesses du vent dans la zone centrale des stations simulées pour un 26/06	204
Fig. V.30	Variations de la Tmrt et la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/06.....	205
Fig. V.31	Variations de la mPet dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/06.....	206
Fig. V.32	Variations de la Tmrt et la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 26 /06.....	207
Fig. V.33	Variations de la mPET dans la zone centrale des stations simulées pour le 26 /06.....	209
Fig. V.34	Les écarts de la PET entre les zones à l'ombre et au soleil pour les deux journées d'été simulées.....	209
Fig. V.35	Comparaison du confort thermique dans une place d'orientation N-S et une autre d'orientation NO-SE (15°) pour la saison hivernale	
Fig. V.36	Comparaison du confort thermique dans une place d'orientation N-S et une autre d'orientation NO-SE (15°) pour la saison hivernale	210
Fig. V.37	Graphiques pour les besoins en énergie des quatre stations simulées..	211
Fig. V.38	Graphiques pour les besoins en énergie exprimés en Kwh/m ² pour les orientations sur la place et les orientations à l'extérieur.....	213
Fig. V.39	Graphiques de comparaison des températures des parois selon leur orientation sur la place ou extérieur à la place.....	214
Fig. VI.1	Conditions thermiques dans les cours.....	217
Fig. VI.2	Amélioration des conditions d'ensoleillement par l'action sur la course solaire.....	217
Fig. VI.3	Géométries simulées en quête d'une ventilation meilleure de la place	222
Fig. VI.4	vitesses du vent dans des places d hauteurs homogènes et d hauteurs hétérogènes.....	222
Fig. VI.5	Examen de la ventilation des places selon différentes configurations..	223
Fig. VI.6	Ecart de températures entre la station rural (météo) et les stations urbaines pour le 19/07/2014.....	225
Fig. VI.7	Evolution de l'ombre dans la station A pour le 19/07.....	226
Fig. VI.8	Evolution de l'ombre dans la station B pour le 19/07.....	226
Fig. VI.9	Evolution de l'ombre dans la station C pour le 19/07.....	227
Fig. VI.10	Comparaison des températures des surfaces au sol aux écarts avec la station rurale pour le 19/07/2014.....	227
Fig. VI.11	Température de surface (Ts) en fonction des vitesses du vent dans les stations de mesures.....	228
Fig. VI.12	Température de l'air (Ta) en fonction des vitesses du vent dans les stations de mesures 19/07/2014.....	231
Fig. VI.13	Variations de la Tmrt et la PET dans les stations de mesures le 19/07	232
Fig. VI.14	Ecart de la PET entre zone à l'ombre et zone au soleil pour les trois stations de mesures.....	232
Fig. VI.15	Position des locaux de mesures.....	234
Fig. VI.16	évolution de la température de l'air dans les locaux donnant sur la	

	station A orientation NO/SE.....	235
Fig. VI.17	Conséquences de la fermeture de l'azimut par une rangée d'arbres sur le confort thermique humain.....	236

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
Tab.I.1	Degrés de refroidissement en fonction des vitesses de l'air Valable pour des conditions moyennes d'humidité et d'habillement.....	31
Tab.I.2	Niveaux du PMV et stress physiologiques associés.....	38
Tab.I.3	Exemples de PET pour différents scénarios.....	39
Tab.I.4	Niveaux de la PET et stress physiologiques associés.....	40
Tab.I.5	Niveaux calibrés de la PET et stress physiologiques associé.....	40
Tab.I.6	Niveaux de l'UTCI et stress physiologiques associés.....	42
Tab.I.7	Caractéristiques du critère 5 m/s. A= Acceptable, I= Inconfortable, TI= Très inconfortable / Dangereux.....	47
Tab. V.1	Courses solaires des différentes géométries	168
Tab. V.2	Durée d'ensoleillement pour un cercle, carré et hexagone de même surface et hauteur ($H/W = H/2R = H/2 * \text{apothème} = 0.6$).....	169
Tab. V.3	Durée d'ensoleillement le 21 décembre pour des géométries de même hauteur et même largeur ($H/W = 0.4$) selon les différentes orientations.....	170
Tab. V.4	Durée d'ensoleillement le 21 juin, pour des géométries de même hauteur et même largeur ($H/W = 0.4$) selon les différentes orientations	171
Tab. V.5	Durée d'ensoleillement pour le 21 Mars des géométries de même hauteur et même largeur ($H/W = 0.4$) selon les différentes orientations	172
Tab. V.6	Accessibilité solaire en hiver et en été pour le carré et le cercle.....	173
Tab. V.7	Effet du changement de la hauteur et la largeur sur la durée d'ensoleillement pour une orientation Nord –sud.....	174
Tab. V.8	Proportions, SVF, et durée d'ensoleillement journalière dans les places de forme carrée de rapport d'aspect $H/W : 0.3, 0.4, 0.5$	178
Tab. V.9	Proportions, SVF, et durée d'ensoleillement journalière dans les places de forme rectangulaire comprises dans l'intervalle $0.3 \leq SVF \leq 0.5$	
Tab. V.10	Proportions, SVF, et durée d'ensoleillement journalière dans les places de forme rectangulaire comprises dans l'intervalle $0.4 \leq SVF < 0.5$ avec $1.5 < L/W \leq 2$	179
Tab. V.11	L'énergie reçue sur le sol en Wh/m^2 par comparaison dégagé pour $H/W = 1$ et $H/W = 0.6$	180
Tab. V.12	Résultats des simulations du confort thermique selon différents facteurs de forme.....	182
Tab. V.13	Durée et pourcentage de surface ensoleillée au sol pour les orientations diagonales $\pm 45^\circ$	183
Tab. V.14	Durée et pourcentage de surface ensoleillée au sol pour les orientations diagonales $\pm 45^\circ$	184
Tab.VI.1	Optimisation de la répartition des tâches solaires sur la surface de la place.....	218
Tab.VI.2	Proportions des enclos simulés.....	224

LISTE DES EQUATIONS

Equation.I.1 : L'équilibre thermique pour un secteur urbain.....	20
Equation.I.2 : Bilan thermique de l'être humain.....	35
Equation.II.1: Facteur K d'ombrage.....	81
Equation.III.1 Le SVF d'un canyon urbain symétrique.....	104
Equation.III.2 : Le SVF d'un canyon asymétrique.....	105
Equation.III.3 : Le SVF des formes régulières.....	105
Equation.III.4 : Calcul de l'intensité maximum d'un ICU.....	106
Equation.III.5: La densité du plan.....	110
Equation.VI.1: Température équivalente idéale.....	235

LISTE DES ABREVIATIONS

RUROS	Rediscovering the urban realm and open spaces
CLA	Couche limite atmosphérique
CLU	Couche limite urbaine (Urban Boundary Layer ou UBL)
CLS	Couche de surface
ICU	Ilot de chaleur urbain
ΔT_{u-r}	Intensité de l'ICU
GES	Les gaz à effet de serre
CFD	Computational fluid dynamics
CTTC	Cluster Thermal Time constant
GIS (SIG)	Geographic information systems
ONM	Office national de météorologie
CLO	Rayonnement de courtes longueurs d'ondes
GLO	Rayonnement de grandes longueurs d'ondes
Clo	Résistance des vêtements
Tsk	Température de la peau (°C)
M	Métabolisme (W)
PMV	Vote moyen prévisible
Tmrt	Température moyenne radiante (°C)
PET	Température physiologique équivalente (°C)
mPET	Température physiologique équivalente modifiée (°C)
H/W	Rapport Hauteur/ largeur
SVF	Facteur d'ouverture au ciel
a	Albédo d'une surface
ε_s	Emissivité de la surface
α	Rugosité du terrain
Rn	Rayonnement net (W.m ²)
R_G	Rayonnement global reçu par une surface (W.m ²)
G	Flux conductif (W.m ²)
C	Flux convectif (W.m ²)
H	Flux de chaleur sensible (W.m ⁻²)
LE	Flux de chaleur latente (M.J/ Kg)
RH	Humidité relative (%)
V	Vitesse du vent (m/s)
T_s	Température de la surface considérée (°C)
Ta	Température de l'air (°C)

Résumé

Le confort thermique dans les espaces publics est un facteur clé de leur attractivité et maintient la santé publique de leurs utilisateurs. En outre, chaque tentative de rationalisation de l'utilisation de l'énergie pour le refroidissement ou le chauffage est liée à la modération des climats locaux au sein de ces espaces extérieurs entourés de bâtiments.

Cette question est devenue particulièrement urgente avec le nombre croissant de villes et de leurs habitants et les changements conséquents dans leurs climats locaux qui deviennent évidents dans les îlots de chaleur urbains, entraînant souvent un gaspillage irrationnel en énergie pour le refroidissement.

La forme tridimensionnelle de ces espaces extérieurs, exprimée en H/ W et le degré d'ouverture au ciel SVF, est un facteur clé dans la création de ces climats locaux en raison de l'interaction des facteurs climatiques avec les bâtiments et la forme de l'espace qu'ils entourent.

Répondre aux exigences de confort pour toutes les saisons, rend la conception de ces espaces difficile.

L'objectif de cette recherche est de proposer des indicateurs et des recommandations que les architectes et urbanistes peuvent utiliser pour créer des espaces en adéquation avec les conditions climatiques locales du site, voire les améliorer.

La recherche a été principalement réalisée en utilisant la simulation numérique par plusieurs programmes Townscop 3.2, TRNsys17, RayMan pro 3.1, Envimet3.1. Ceci nous a permis d'accéder à ces indicateurs qui ont été projetés sur le site de la ville nouvelle d'Ali Mendjeli (Constantine), afin d'évaluer et améliorer le bien-être thermique dans ses espaces publics selon les résultats de la simulation et en utilisant des indicateurs de confort thermique PET, PMV, mPET.

Mots clés

Climat local, places publiques, H / W, confort thermique, SVF, PET, mPET, énergie.

Abstract

Thermal comfort in public spaces is a key factor in their attractiveness and the maintenance of the public health of their users. In addition, every attempt to rationalize the use of energy for cooling or heating is related to the moderation of local climates within these outdoor spaces surrounded by buildings.

This problem has become particularly urgent because of the growing number of cities and their inhabitants and the resulting changes in local climate, as evidenced by the urban heat islands which have as consequences deaths and irrational cooling energy consumption.

The three-dimensional shape of these open spaces, expressed by H / W and the degree of openness to the sky, is a key factor in the creation of these local climates due to the interaction of climatic factors with buildings and the space they surround.

Supporting contradictory seasonal thermal comfort, the design of these spaces is not easy.

The main objective of this research is to define indicators and recommendations that designers can use to create spaces that respond to local climatic conditions of the site, or even improve them.

The search was mainly performed using numerical simulation by several programs Townscop 3.2, TRNsys 17, RayMan Pro 3.1, and Envimet3.1 which allowed us to access these indicators. These were projected on the Ali Mendjeli city with cold winter and hot summer in order to evaluate and improve the thermal well-being within its public open spaces and improve it in the light of simulation results and utilization of thermal comfort indicators PET, PMV, mPET.

Key words

Local climate, public squares, H/W, thermal comfort, SVF, mPET, PET, energy.

ملخص

تعد معدلات الرفاهية الحرارية داخل الفضاءات العمومية عاملاً أساسياً لجاذبيتها كما إنها تحافظ على الصحة العامة لمستعمليها. إضافة إلى هذا فإن كل محاولة لترشيد استعمال الطاقة من أجل التبريد أو التسخين مرتبطة بمدى اعتدال المناخات المحلية داخل هذه الفضاءات الخارجية المحاطة بالبنائيات.

هذه المسألة أصبحت تطرح نفسها بإلحاح خاصة مع التزايد المستمر لعدد المدن وسكانها و ما ينجر عن هذا من تغيرات لمناخاتها المحلية التي تظهر جلياً في الجزيرات الحرارية الحضرية التي كثيراً ما أفضت إلى وفيات و الإستهلاك اللاعقلاني للطاقة من أجل التبريد.

إن الشكل الثلاثي الأبعاد لهذه الفضاءات الخارجية و الذي يعبر عنه بالمقطع الجانبي للفضاء الحضري H/w و درجة الإنفتاح إلى السماء SVF يعد عاملاً أساسياً في خلق هذه المناخات المحلية نتيجة تفاعل العوامل مناخية مع البنائيات و شكل الفراغ الذي تحيطه. غير أن التناقضات بين متطلبات الراحة الحرارية بين الفصول يجعل تصميم هذه الفضاءات أمراً ليس بالهين.

الهدف من هذه الدراسة هو الخروج بمؤشرات هندسية و توصيات يستغلها المصممون المعماريون في إنشاء فضاءات تتماشى مع الظروف المناخية المحلية للموقع بل تحسنها.

إن البحث تم أساساً باستعمال المحاكاة الرقمية بواسطة عدة برامج Townscop 3.2, TRNsys17, RayMan pro 3.1, Envimet3.1, مما مكننا من الوصول إلى هذه المؤشرات أين تم إسقاطها إقتراضياً و ميدانياً على مدينة علي منجلي ذات المناخ البارد شتاء و الحار صيفاً من أجل تقييم و تحسين درجة الرفاهية الحرارية داخل ساحاتها العمومية و تحسينها على ضوء نتائج المحاكاة و استغلال مؤشرات الراحة الحرارية PET ، PMV ، $mPET$.

الكلمات المفتاحية

المناخ المحلي، الساحات العمومية، H/W ، الرفاهية الحرارية، SVF ، $mPET$ ، PET ، الطاقة.

Introduction

générale

" Si les fourmis sont capables de construire des villes adaptées à leur taille, à leur caractère et leur fonction, nous devrions être capables d'en faire autant."

Roogers et Gumuchjian, 2000

Introduction

Le maintien de l'équilibre entre population, ressources et environnement est à la base de la survie de toute société, la négation de ce principe aura des conséquences désastreuses et fatales. Ceci explique les multiples problèmes environnementaux qui affligent le monde contemporain : changements climatiques négatifs préjudiciables à la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, l'eau et autres ressources naturelles ; prolifération de la pollution et épuisement des ressources énergétiques non renouvelables.

En effet, la dernière décennie du XXème siècle a été la plus chaude du dernier millénaire. Le changement climatique notamment le réchauffement de la planète constaté au cours des cinquante dernières années n'est plus une hypothèse scientifique. La quasi-totalité des chercheurs à travers le monde s'accorde aujourd'hui pour en reconnaître le caractère inéluctable

Le dernier rapport du GIEC* dresse un tableau noir de la situation : "*Les conclusions du 5^{ème} rapport du GIEC publié en 2014 prévoient une élévation de la température qui pourrait atteindre 4,8°C entre 2080 et 2100. Selon ces experts, il est hautement improbable que la hausse des températures soit contenue dans la limite de 2°C, objectif qui avait été envisagé lors du sommet de Copenhague en 2009 (Terrin., 2015).*

Dans un récent rapport de l'agence NAAO, pour l'ensemble de 2016, la température à la surface des terres a été 1,43 °C supérieure à la moyenne du XXe siècle, soit la plus

* Chargé du suivi scientifique des négociations internationales sur le changement climatique, le Groupement intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a été fondé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement. En 1992, les négociations des Nations Unies à Rio de Janeiro sur les changements climatiques se sont basées sur son premier rapport. En 2001, le GIEC tire publiquement la sonnette d'alarme sur le réchauffement de la planète. En 2007, il publie en trois volets le bilan de six ans de travaux menés par un réseau de 2500 scientifiques : « les bases scientifiques physiques ; impacts, adaptation et vulnérabilité ; les mesures d'atténuation ».

élevée depuis 1880. Les études confirment que l'accroissement de la température d'un degré au-dessus de 30°C augmente de 4,7 % les risques de mortalité (Terrin, 2015).

Au niveau du sol, la température dépend de la quantité de gaz à effets de serres (GES) présente dans l'atmosphère. Ces gaz sont principalement le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄) et, entre autres, les chlorofluorocarbures (CFC). Naturellement peu abondants, leur concentration en fait les principaux responsables du réchauffement de la Planète et de la destruction de la couche d'ozone (Hong. T et al. , 2000).

L'atténuation des émissions des (GES) ne peut passer que par des actions ciblées sur l'ensemble des secteurs émetteurs dont le secteur bâtiment (le tertiaire) consommateur de 45% d'énergie à lui seul, 25% des émissions de CO₂ et 19% des émissions de gaz à effet de serre chauffage urbain et électricité compris (Helas-othenin, 2007)

Le bâtiment est donc une source de gaspillage énergétique majeure et un formidable gisement potentiel d'économie d'énergie. Deux chiffres en donnent la pleine mesure : aujourd'hui, en France, par exemple, la consommation moyenne d'énergie atteint 200 kWh/m² /an, alors que l'on sait construire en très basse énergie à 20 kWh/m²/an, et même en énergie positive (Boutefeu, 2008).

La maîtrise de la consommation énergétique du bâtiment est donc un enjeu primordial elle passe, essentiellement, par une bonne conception architecturale (une orientation adéquate, utilisation de la lumière du jour), traitements adaptés à l'enveloppe (isolation dimensions des ouvrants, type de vitrage) et du contrôle du renouvellement d'air.

Or, Il ne suffit pas de traiter l'ambiance intérieure mais de la considérer en rapport avec son extérieur car les villes sont des surfaces physiques poreuses, complexes associant un haut degré de variabilité de volumes construits (pleins) et des espaces vides : espaces urbains tels que les rues, places, placettes, voies de circulation piétonne, parcellaires, espaces libres, plans d'eau et couverts végétales.

La grande diversité des caractéristiques de ces derniers représente les conditions aux limites des bâtiments et peut modifier leur bilan énergétique et affecte ainsi leur performances thermiques. Les bâtiments eux-mêmes sont aussi capables de modifier le microclimat, de par leur orientation et porosité aux rayons solaires et aux vents.

L'association de ces pleins et vides, génère de formes urbaines qui constituent l'un des facteurs clefs de la formation de l'îlot de chaleur urbain. (Oke, 1987).

Ce phénomène se caractérise principalement par l'apparition de problèmes microclimatiques tels que le stress thermique, par une élévation localisée des

températures, notamment nocturnes, au centre ville, par rapport aux environs moins urbanisés. Cette différence peut atteindre 10°C. En moyenne, elle est de 1,5 à 2,5°C (Hidalgo et al. , 2008).

Cet impact est d'importance différente selon que l'on se situe en climat froid, où l'augmentation des températures réduit les besoins en chauffage, ou en climat chaud, pour lequel les besoins en climatisation augmentent en été.

Un ajustement soigneux et raisonné des formes urbaines pourrait améliorer le confort thermique aussi bien dans les espaces extérieurs - qui s'affirment de plus en plus comme des lieux de vies au même titre que les espaces intérieurs - que dans les bâtiments, ainsi que leur demande énergétique.

Le pouvoir régulateur des éléments de la forme urbaine sur les paramètres microclimatiques et environnementaux en général, n'est plus une simple hypothèse ; il est depuis quelques dizaines d'années confirmé par les travaux liés à la climatologie urbaine. Dans cette optique *« Les bâtiments et les espaces ouverts doivent être conçus de façon complémentaire, et non l'un être le résiduel de l'autre, en travaillant en symbiose dans le rapport positif /négatif. Un bâtiment peut être considéré comme une façon de créer un microclimat aux alentours et inversement le paysage peut créer de meilleures conditions pour les espaces habités. Les qualités thermiques sont l'un des grands facteurs d'attraction d'un espace public : le meilleur confort d'une rue ou d'une place peut déterminer sa fréquentation. »* (Lévy, 2005).

Le concept d'urbanisme climatique s'inscrit pleinement dans une optique de développement durable à travers une conscience et une prise en charge réelle des interactions entre milieu urbain et environnement naturel. Le défi de ce dernier est de trouver un compromis entre le développement inévitable des villes et un environnement urbain de haute qualité. Cette qualité liée aux taux de pollution donc à la qualité de l'air et la qualité du climat liée à l'intégration correcte des éléments du climat dans les différents niveaux de projection urbaine et architecturale (Bitan. A, 1992). Il œuvre dans le sens d'une rationalisation de l'usage des ressources énergétiques tarissables, le développement des énergies renouvelables et une conception urbaine plus qu'adaptée à son environnement et aux besoins des citoyens. *"...Agir sur la planification urbaine en vue de l'amélioration du climat local en amont aux applications techniques sur le bâtiment constitue aujourd'hui la démarche la plus prometteuse. Au contraire, les conséquences néfastes de choix urbanistiques aggravant les conditions climatiques locales sont immenses lorsque l'on considère la pérennité des constructions et l'inertie*

dans le temps des systèmes urbains par rapport aux choix énergétiques faits au départ". (Hegger et al., 2011).

Les crises de l'urbanisme moderne et de l'énergie devraient conduire à des avancées remarquables en termes de maîtrise du confort thermique extérieur. Il s'agit de s'interroger cette fois plus sérieusement sur la manière de réguler les apports extérieurs dans les constructions, de manière à conjuguer meilleure qualité de confort avec économies d'énergie substantielle.

1- Problématique

L'association entre la forme urbaine et son contexte est un thème qui ne cesse de nourrir la littérature de la planification urbaine. Ce thème a puisé ses sources dans les schémas des constructions et des espaces extérieurs produits par différentes cultures et civilisations. Ces derniers peuvent être le miroir de leurs intérêts et priorités particuliers. En effet, les activités, les pratiques sociales ainsi que les croyances constituent une formule complexe pour l'organisation des villes et villages. Cependant le climat est reconnu comme l'un des plus importants vecteurs de l'organisation et des pratiques sociales (Pressman, 2004).

La démarche bioclimatique que l'on considère aujourd'hui comme une nouveauté, n'est en fait que le prolongement de certains savoirs faire que se transmettaient jadis des bâtisseurs et qui étaient basés sur une connaissance intuitive du milieu et du climat, grâce à une profonde connaissance des mécanismes climatiques typiques des différentes régions, et à l'utilisation des techniques de maîtrise environnemental. Ces techniques sont toujours fortement ancrées dans les innombrables exemples d'architecture antique et dans les constructions de tout le bassin méditerranéen ainsi qu'au moyen orient faisant la preuve d'une maîtrise des ambiances thermiques autant dans les espaces publics que privés : "*L'urbanisme vernaculaire méditerranéen offre l'image d'implantations humaines qui s'étalent sur les pentes de collines en combinant apports solaires aux étages supérieurs et fraîcheur à l'ombre des jardins. L'architecture arabe joue de systèmes de ventilation sophistiqués avec patios, moucharabiehs, fontaines, jarres poreuses et salsabils sur lesquels coule l'eau fraîche, de même qu'elle favorise un nomadisme des usages propices à une adaptation aux températures diurnes et nocturne.*" (Terrin, 2015).

A l'échelle urbaine, "*les grands îlots compacts d'Helsinki de 200 m de côté à grande cour unique font place au sud aux îlots carrés de 70 mètres de côté à*

nombreuses cours que l'urbanisation de la Rome antique a essaimées autour de la Méditerranée, jusqu'à la myriade de micro-cours – plus de 1 000 dans un carré de 400 m de côté à la médina de Fez – dans une texture qui répond par son inertie thermique aux changements diurnes et nocturnes d'un climat aride et chaud." (Salat, 2015).

Ombre et fraîcheur dans les espaces extérieurs sont garanties par des constructions lourdes et rapprochées pour qu'elles se fassent mutuellement de l'ombre minimisant ainsi les surfaces d'exposition au soleil, et déviant les vents chauds indésirables par des rues étroites et tortueuses ainsi que par l'orientation de ces espaces vers le Sud pour conserver l'ensoleillement d'hiver.

Il semble que la ville ait perdu ces reflexes bioclimatiques après l'avènement de la révolution industrielle, car en réponse aux structures urbaines surpeuplées, aux mauvaises conditions de santé et au manque d'espaces libres, les architectes et urbanistes ,pour des raisons d'hygiène , ont mis en avant le slogan "air, lumière et soleil", il s'agissait entre autres de définir les distances entre les bâtiments pour assurer l'ensoleillement de tous les logements et l'ouverture des premiers îlots* .

La création d'espaces urbains ouverts permettant la libre circulation de l'air, était la prescription fondamentale du moment.

Malheureusement, cet espace libre pensé sous forme d'espaces verts ou des espaces communs et même d'espaces résiduels fut le substitut des espaces urbains.

La rue et la place éléments structurants de la vie économique, espaces de sociabilité et de culture de la ville ont disparu. La rue est devenue uniquement une bretelle pour la circulation mécanique. La place d'un espace identifiée ayant ses limites et ses pratiques devient une grande esplanade sans limites claires est un vide négatif dans ses rapports avec son environnement.

Le soleil fut considéré comme un des principaux matériaux de l'urbanisme moderne. Un nombre d'heures minimal d'ensoleillement devait être respecté pour les espaces d'habitation. Les transformations préconisées ont fait table rase de la grande richesse de l'histoire des formes urbaines à des géométries stéréotypées de tours et de barres.

Ces géométries ont remplacé les textures poreuses à cours que sont les îlots qui, comme on a vu, connaissaient une infinité de variations en fonction des sociétés et des climats, par des objets architecturaux massifs et isolés. L'avènement de nouveaux

* Une étude rétrospective très poussée est effectuée par Benzerzour Mohamed, dans le cadre de sa Thèse de Doctorat, Transformations urbaines et variations du microclimat: application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur « morphoclimatique », Ecole doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes, Année 2004.

matériaux de construction, du chauffage central, l'essor d'énergies accessibles et bon marché ont permis à cette nouvelle forme de penser l'espace de s'émanciper des conditions climatiques locales. Les problématiques d'emplacement, d'ensoleillement, d'exposition aux vents peuvent trouver des réponses techniques plus que géographiques sont passées au second plan.

Les crises pétrolières répétées depuis les années soixante-dix ont réorienté architecture et urbanisme à raisonner en terme de potentiels énergétiques. Les courants dits d'architecture solaire ou bioclimatique ont apporté une nouvelle dimension aux implications énergétiques de l'ensoleillement dans la construction en privilégiant les gains passifs, notamment en favorisant au maximum la pénétration des rayons solaires à l'intérieur des locaux mais au dépend d'autres aspects relevant du confort des usagers tels que le confort visuel, où l'ardeur du soleil a entraîné de nombreux problèmes d'éblouissement, auxquels il a fallu remédier par des dispositifs d'occultation.

Lorsque le lieu d'implantation est soumis à des conditions climatiques très changeantes, les variations saisonnières exigent des solutions architecturales et constructives totalement contradictoires. C'est précisément le cas de notre région qui acquière des apports thermiques hivernaux mais doit en revanche se protéger du rayonnement solaire exagéré de la saison estivale chaude source de surchauffe.

Quelques soient les solutions préconisées, les bâtiments doivent être pensés indissociablement de leur environnement naturel ou bâti. Parallèlement à la conception intégrant les conditions locales, une utilisation rationnelle des surfaces est essentielle pour optimiser les bâtiments et l'espace urbain. Les structures urbaines denses sont en général les plus efficaces sur le plan énergétique.

Or cette densité diminue de la vitesse des vents et donc réduit l'effet de la ventilation nocturne. Ceci fait que la température de la rue ou dans l'impasse diminue très lentement à cause de l'effet du rayonnement des parois extérieures et du pavage (Vaillant, 1978).

Il y a également d'autres inconvénients avec cette forme urbaine, particulièrement le confort thermique faible en hiver, une saison qui est tout à fait froide dans beaucoup de villes chaudes (Johansson, 2006 ; Abdou, 2004 ; Boumaouche, 2006).

D'une autre part, une forme urbaine dispersée crée un environnement extrêmement inconfortable en été. Néanmoins, ces espaces étendus favorisent la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant la journée contrairement à la précédente où l'évacuation de la chaleur prend du temps et risque de s'étaler jusqu'au matin; d'où la désertion des

habitants de leurs quartiers pour passer les soirées d'été dans des terrains vagues. (Abdou, 2004). C'est ainsi que la géométrie urbaine constitue un des facteurs principaux de l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain. (Oke, 1987).

Pour diagnostiquer la canicule de 2003, Une étude menée par la ville de Gênes (Italie) a comptabilisé les décès des personnes vivant à leur domicile, selon les caractéristiques des quartiers : habitat pavillonnaire, tissu urbain dense, très dense.....

La corrélation est nette entre forte densité et forte mortalité : les personnes qui ont le mieux résisté sont celles qui résident en habitat pavillonnaire, aéré, de faible hauteur, et qui disposent d'un pourcentage de verdure important à proximité. De même, la rue "canyon" avec ses immeubles alignés, sensiblement de même hauteur, est bien plus chaude qu'il n'y paraît (Boutefeu, 2008).

Ces quelques rappels à propos de situations urbaines typiques posent de manière évidente et immédiate le problème de la complexité des relations entre la géométrie urbaine et les conditions naturelles d'insolation et de ventilation.

A noter que les relations en question pourront affecter aussi bien la disponibilité en lumière naturelle et l'aération à l'intérieur des locaux que la perception qu'aura l'utilisateur des espaces extérieurs.

Donc s'il est coutumier d'affirmer que les architectes et urbanistes ne savent plus composer avec les facteurs climatiques et en particulier la course solaire, en réalité, les problèmes posés aux concepteurs sont aujourd'hui complexes, la dualité entre soleil d'hiver et soleil d'été est au centre du problème (Tahbaz, 2006).

Si en hiver, le point principal du processus de conception est de se protéger des vents froids et de favoriser l'ensoleillement et garantir ainsi un apport énergétique gratuit pour les bâtiments et une ambiance thermique extérieure confortable, en été le contrôle de la température est essentiel afin d'atteindre le confort.

Plus particulièrement aux latitudes septentrionales, l'ombre est le facteur le plus important permettant le contrôle de la température ainsi qu'un facteur déterminant du confort visuel (Tahbaz, 2006).

Il s'agit, donc, de concilier l'efficacité énergétique des bâtiments, le confort d'été, les qualités des ambiances attendues, invoquant souvent transparence et clarté, protection et fraîcheur. Il est impératif aussi de répondre au projet de ville durable. Ce projet insiste sur la compacité du tissu pour des impératifs d'économie d'énergie et de foncier sans omettre l'hospitalité du milieu urbain, d'où l'accent est mis sur les espaces publics ouverts.

Le confort thermique est essentiellement l'un des facteurs les plus importants qui favorisent la notion de confort dans les espaces extérieurs, et les principaux paramètres qu'il prend en considération sont généralement le rayonnement, la convection et l'humidité. Ces paramètres changent en fonction de la structure, la typologie et la morphologie urbaine ainsi que de ses composants (matériaux, végétations, eau,etc).

A l'échelle de l'occupation du sol, l'objectif de l'urbaniste concerne principalement les moyens de contrôle climatique visant à la fois à garantir les meilleures conditions de confort dans les espaces extérieurs, et permettre un usage rationnel de l'énergie dans les espaces intérieurs, tout en maintenant un niveau de confort élevé.

Ceci est possible par l'exploitation des principaux facteurs climatologiques que sont la radiation solaire et le vent à travers la maîtrise des propriétés géométriques, dimensionnelles et formelles du tissu urbain.

La géométrie de l'espace urbain commande un certain nombre de phénomènes inéluctables à savoir :

- ✚ La répartition des zones ombrées et ensoleillées qui dépend de l'orientation et des hauteurs des éléments bâtis. Elle dépend aussi du rapport dimensionnel de ces derniers avec l'espace ouvert et les champs radiatifs solaires et thermiques qui en découlent ;
- ✚ Les écoulements d'air sous les effets du vent générés par le degré de porosité ou d'obstruction de l'espace à ces vents ou des gradients thermiques.

Ces deux phénomènes ont une action directe sur le confort thermique des usagers de l'espace urbain. Ils déterminent les températures des surfaces des bâtiments et du sol, la vitesse d'air en contact avec le corps humain et les enveloppes des bâtiments, la température d'air résultant de ces échanges et les besoins énergétiques qui en découlent.

Interroger les formes urbaines imposent de prendre en considération simultanément de nombreux critères tels que les typologies des espaces publics les masque et les zones d'ombrages leurs orientations, leurs revêtements, leurs porosités aux vents (*Salat.S, 2015*).

De ce fait, quelles sont les meilleures formes et dimensions que peuvent prendre ces espaces ouverts pour être thermiquement confortables et praticables à longueur d'année?

A quel pourcentage contribuent ces formes à promouvoir l'efficacité énergétique des bâtiments ?

Quels sont les éléments surajoutés qui peuvent améliorer ou au contraire altérer la combinaison confort intérieur/extérieur.

Pour répondre à ces interrogations et pouvoir évaluer quantitativement et qualitativement le degré de confort thermique que peut procurer l'une ou l'autre des formes, des hypothèses sont formulées qui peuvent être à la base de la quête de la meilleure géométrie ou solution.

2- Hypothèses

✚ Hiver comme été, la combinaison confort extérieur et économie d'énergie est possible par le seul choix judicieux de la géométrie des espaces publics ouverts aux abords des bâtiments.

✚ N'importe quelle configuration de l'espace avec une bonne orientation au soleil et au vent peut garantir cette combinaison.

✚ Les propriétés optiques et thermiques des matériaux et/ou les éléments surajoutés tels que la végétation et l'eau en différents points peuvent garantir cette combinaison quelle que soit la géométrie.

3- Objectif de la recherche

La présente recherche est la suite d'une recherche antérieure de l'auteur sur le confort thermique par des relevés in situ dans les espaces extérieurs de la ville nouvelle Ali Mendjeli.*

L'investigation a identifié la géométrie de ces "vides" urbains pour responsable majeur du microclimat et l'ambiance thermique qui y règnent.

Cette suite s'intéressera à l'étude et l'évaluation de l'incidence des caractéristiques géométriques des places, notamment leurs rapports dimensionnels, sur le confort thermique extérieur et la consommation énergétique des bâtiments environnants.

L'objectif est de démontrer que la régulation thermique du microclimat urbain et l'ambiance thermique interne dans nos régions semi- arides est possible par un choix judicieux des géométries, proportions et orientations des espaces publics ouverts par rapport au soleil et au vent.

Elle peut être un pas significatif vers l'identification des paramètres importants qui doivent être considérés au stade de la conception de l'espace lors des opérations du développement des tissus urbains, et pouvoir évaluer l'impact environnemental des différentes variantes projetées.

* Ch. Kedissa, Impact de la géométrie des espaces extérieurs sur le microclimat urbain : Cas des places, Thèse de magistère, Université Mentouri, Constantine, 2010.

Cette contribution permettra de comprendre l'interaction des éléments urbains et des facteurs climatiques et cerner les résultats positifs de cette interaction afin d'établir les règles d'un urbanisme durable pour nos villes de demain.

Les critères à considérer sont nombreux et nous pouvons citer :

- Prospect et/ou ouverture optimale au soleil,
- optimisation des phénomènes aérauliques externes,
- minimisation des consommations énergétiques,
- quantification des effets directs/indirects et positifs/négatifs des dispositifs de rafraîchissement.

4- Méthodologie et outils

Pour confirmer la validité de ces hypothèses, La recherche s'organise en :

✚ **Une partie théorique** synthèse d'une recherche bibliographique dont l'objectif est de cerner et comprendre les différentes approches qui ont été formulées concernant le thème, éléments théoriques de base qui contribuent à focaliser la présente recherche vers les objectifs ciblés. Elle se divisera en trois chapitres :

✓ Le premier chapitre consiste en la description des différents phénomènes physiques au sein de la ville résultants de son interaction avec les facteurs climatiques et leurs conséquences dont le phénomène d'ilot de chaleur urbain.

La notion du confort thermique humain dans les espaces extérieurs, ses éléments et ses indices les plus pertinents y seront aussi abordés.

✓ Le deuxième chapitre est un passage en revue des différents leviers d'action des architectes et urbanistes pour améliorer le microclimat et l'ambiance thermique urbaine.

✓ Le troisième chapitre consiste en la description des éléments de la géométrie urbaine tenue pour grande responsable des surchauffes du milieu urbain et ses indicateurs. On y présentera l'état de l'art concernant la relation de la géométrie urbaine, le climat des villes, le confort thermique et consommation énergétique.

✚ **Une partie pratique** qui se divise en trois chapitres :

✓ un chapitre Contexte et méthodologie (quatrième chapitre). Il s'agira de :

- présenter l'étude climatique et bioclimatique de Constantine et de tirer des recommandations pour la conception urbaine et architecturale selon le climat de la région.

- description de la méthodologie d'approche des espaces publics urbains, des outils et modèles numériques utilisés pour reconstituer le microclimat urbain en leur sein, dont :

- **Towncope 3.2** : pour déterminer le nombre d'heures d'ensoleillement et les ombres portées et de masques solaires.
- **Envi-met 3.1** : pour reconstituer les effets thermiques et aérauliques du microclimat. Ce logiciel sera utilisé aussi pour évaluer l'incidence des aménagements urbains
- **RayMan pro 3.1** : pour calculer les indices de confort thermique usant des résultats du logiciel envi-met comme paramètre d'entrée.
- **Trnsys 17** : Les géométries jugées optimales par leur conformité aux exigences du confort thermique extérieur seront simulées par ce logiciel, afin d'évaluer l'influence de la géométrie des espaces extérieurs sur la consommation énergétique.

✓ Un chapitre simulation (cinquième chapitre) qui constitue une importante partie du travail. Elle consiste en la modélisation du microclimat de la place urbaine et son incidence sur le confort thermique extérieur. Cette partie repose sur l'utilisation combinée des logiciels précités.

Les résultats de la simulation constitueront une base pour établir des recommandations quant aux choix des stratégies adéquates concernant la géométrie urbaine, les caractéristiques thermiques de matériaux pour un meilleur confort thermique dans de futurs projets architecturaux et urbains.

✓ Un chapitre investigation (sixième chapitre). Pour comprendre les mécanismes à l'origine des ambiances thermiques dans les espaces urbains, il est nécessaire d'acquérir des résultats de mesures et palper de près le microclimat généré par chaque configuration urbaine choisie pour sa représentativité et définie par son indicateur facteur d'ouverture au ciel (**SVF**) et rapport d'aspect (**H/W**).

Ces résultats seront confrontés à ceux des simulations du chapitre précédent afin de

- leur donner de la validité
- comprendre, peut être, d'autres mécanismes à l'origine des ambiances thermiques dans les espaces urbains.

Les mesures effectuées en période estivale avec des appareils de mesures, mobiles, au sol, à différents moments de la journée. Elles comprendront la température, l'humidité et la vitesse de l'air. Les températures des surfaces doivent être aussi mesurées pour mettre en évidence les champs radiatifs thermiques. Les objets à saisir sont les surfaces minérales horizontales et verticales et les zones à l'ombre et au soleil.

Des mesures de la température, humidité et mouvements d'air sont effectués à l'intérieur des espaces des immeubles attenants afin de palper l'incidence des ambiances thermiques extérieures sur l'ambiance intérieure.

Une synthèse des résultats des simulations et du terrain constitueront une base pour établir des recommandations quant aux choix des stratégies adéquates concernant la géométrie urbaine, les caractéristiques thermiques de matériaux de surface minérales, ainsi que les éléments surajoutés pour un meilleur confort thermique dans de futurs projets d'espaces publics urbains.

Chapitre I :

Microclimat urbain et confort thermique

"... il n'y a pas un climat d'une ville, mais en fait une mosaïque de microclimats. [...] D'une rue à l'autre, à l'ombre d'un immeuble, dans un parc public, le temps change. Plus ou moins froid, plus ou moins venteux. A ce stade, les études se font à l'échelle d'un quartier, de quelques rues, voire d'un immeuble. Le but est de comprendre comment fonctionne la zone et d'en déduire l'impact d'un aménagement."

Claude Kergomard (2007)

Introduction

D'après le rapport des Nations Unies de 2010, 54% de la population mondiale vit aujourd'hui en ville. Le nombre de citadins est passé de 729 millions en 1950 à 3.5 milliards en 2010. Au même temps, le nombre de population totale du monde a grimpé de 2.5 milliards à 6.9 milliards. D'ici 2045, on s'attend à ce que chaque deux sur trois personnes vivent dans les villes correspondant à 5.9 milliards de personnes (Moon et al ,2012). Pour l'Algérie, 33 millions d'habitants sur 41 millions d'Algériens, soit 80%, seront concentrés dans les villes à l'horizon 2025 (Mazari ,2006).

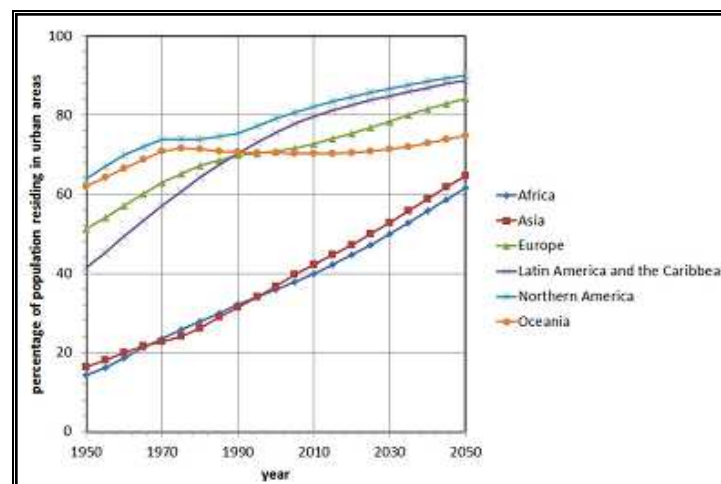


Fig.I.1 : Pourcentage de population résident dans l'espace urbain par continent 1950-2050 basé sur des données de nations unies 2010 (Moon et al., 2012).

Ce développement urbain provoque un changement du comportement physique du paysage, affectant ses propriétés hydrologiques, thermiques, radiatives et aérodynamiques, qui affecte alternativement l'échange de chaleur et de masse et la vitesse d'air entre la surface et l'atmosphère. Finalement ces changements ont comme

conséquence le développement d'un climat urbain "qui dévie de celui de ses environnements."

De ce fait, la compréhension des interactions entre les villes et l'atmosphère est indispensable afin d'orienter raisonnablement le développement de ces dernières, dans l'optique de créer un environnement confortable et sain auquel un nombre croissant d'habitants urbains est et sera exposé.

I-1- Les échelles du climat

L'étude du climat urbain nécessite de se pencher sur différents niveaux d'échelles, car les phénomènes qui s'y produisent ne sont pas forcément les mêmes ou n'ont pas les mêmes répercussions.

D'après Oke (2004), trois échelles principales sont utilisées sur le plan horizontal de la ville (cf. Fig. I.2) :

- ✓ l'échelle méso (10^4 à 2×10^5 m) ;
- ✓ l'échelle locale (10^2 à 5×10^4 m) ;
- ✓ l'échelle microclimatique : sur laquelle se focalise cette étude, est limitée à quelques centaines de mètres (10^2 à 10^3 m). Ceci permet de distinguer le microclimat au niveau d'une rue, d'un bâtiment, d'une place, d'une cour, d'un jardin, d'un arbre, etc. L'existence du moindre objet peut perturber le flux d'air et enregistrer de quelques degrés des différences de température.

D'après Arnfield (2003), d'autres échelles se distinguent également sur le plan vertical (cf. Fig. I. 2):

✚ la couche limite atmosphérique (CLA) : zone de l'atmosphère au voisinage de la surface terrestre dans laquelle, la variation diurne du rayonnement solaire est directement perceptible (Glockner, 2000).

✚ la couche limite urbaine (CLU) : qui se développe au-dessus des villes du fait de sa structure particulière.

✚ la canopée urbaine (CU) : contexte de cette recherche, englobe les éléments urbains rugueux, depuis le sol jusqu'au sommet des bâtiments. Dans cette couche, l'écoulement et les échanges d'énergie sont régis par des processus de micro-échelle, et dépendent précisément du lieu et du type de surface.

En raison de l'hétérogénéité de la topographie des villes, leurs structures sont particulièrement complexes, La nécessité de distinguer cette sous-couche atmosphérique vient du fait que la rugosité de la zone urbaine agit comme un brise-vent, et les

mouvements d'air y sont considérablement perturbés. En effet, le vent entre les bâtiments est affaibli et adopte un régime turbulent (cf. **Fig. I.2, I.3**), dont l'analyse montre des similitudes avec les mouvements d'air sous la canopée forestière (Voogt, 2002).

✚ L'échelle de surface : elle comprend toutes les surfaces horizontales de la ville et la fine couche d'air (quelques cm) située au dessus des surfaces. La température au niveau de cette couche d'air est fortement influencée par les échanges thermiques avec les surfaces (Nakamura et Oke, 1988 ; Nunez et Oke, 1977).

C'est au sein de la couche de surface que l'on va rencontrer les plus grandes variabilités spatiales du phénomène d'îlot de chaleur urbain (Chudnovsky et al., 2004) dont la formation et l'intensité sont gouvernées par les propriétés radiatives et thermiques des matériaux et la géométrie des rues (Arnfield, 2003).

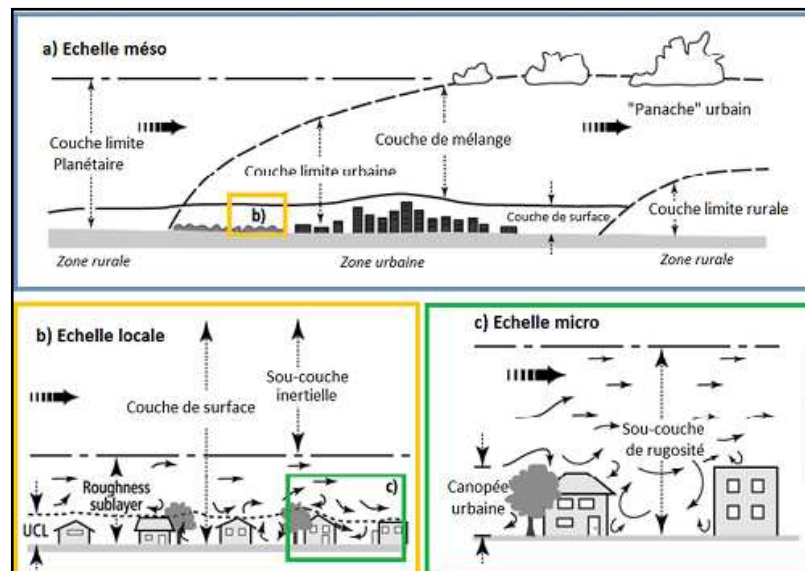


Fig.I.2 : Représentation schématique des échelles climatiques et des couches limites. (Oke, T.R, 2006).

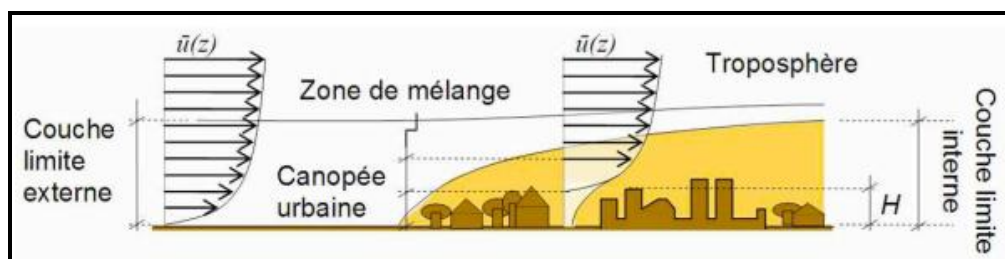


Fig. I.3 : Profil de vent dominant moyen en site homogène et en site urbain. (Plate, E. J. et Kiefer H, 2001).

La résistance accrue qui en résulte réduit l'écoulement au niveau de la canopée urbaine.

Ce qui différencie nettement la (CLU) de la (CLA) est l'existence au-dessus des villes de ce qui est communément appelé l'îlot de chaleur urbain.

I-2- Îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain est la manifestation climatique la plus évidente de l'urbanisation (Landsberg, 1981). C'est le phénomène le plus observé dans les études des microclimats urbains. Il se définit par l'écart des températures dans les zones urbaines en comparaison avec leur périphérie.

Il existe différents types d'îlots de chaleur urbains, liés aux différentes échelles de la climatologie urbaine précédemment décrites (Giguère, 2009).

✓ Ceux de la canopée urbaine correspondent aux mesures de la température de l'air située entre le sol et le sommet des arbres ou la toiture des bâtiments.

✓ Ceux situés à la surface du sol correspondent à des mesures de températures de surface.

✓ Ceux de la couche limite urbaine correspondent aux mesures de température de l'air située au-dessus de la couche de la canopée ces effets peuvent être ressentis jusqu'à 2 km au dessus de la zone urbaine (Gartland, 2010).

L'îlot de chaleur urbain atmosphérique varie beaucoup moins en intensité que celui de surface. (Environmental Protection Agency, 2008).

I-2-1- Îlot de chaleur de la canopée urbaine :

Les îlots de chaleur urbains de la canopée urbaine sont les plus souvent observés et étudiés. L'analogie physiographique provient de la similitude entre le modèle d'isotherme fermé et les contours de hauteur d'une île sur une carte topographique (cf. Fig. I.4).

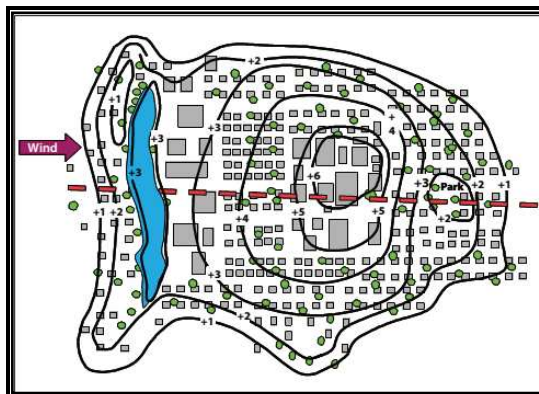


Fig. I.4 : Représentation en plan des isothermes d'un îlot de chaleur urbain nocturne (Voogt.J.A, 2003).

T.R. Oke (1987) définit l'intensité de ce phénomène comme étant la différence de température de l'air maximale entre le centre de la ville et les zones rurales environnantes, ($\Delta T_{u-r_{max}}$). L'intensité est déterminée principalement par l'équilibre thermique de la région, et par conséquent sujette à des variations journalières et à court terme des conditions atmosphériques (Santamouris, 2001).

L'écart est surtout important juste avant et après le coucher du soleil (Voogt, 2002 ; Oke et Maxwell 1975 ; Voogt et Oke, 2003). Il atteint son maximum 3 à 5 heures après celui-ci (Runnals et Oke, 2000). Il diminue ensuite rapidement après le lever du soleil. La **figure 1.5** met en évidence cette évolution de l'amplitude des îlots de chaleur urbains à partir de mesures effectuées à différentes heures de la journée dans différentes zones, urbaines et rurales.

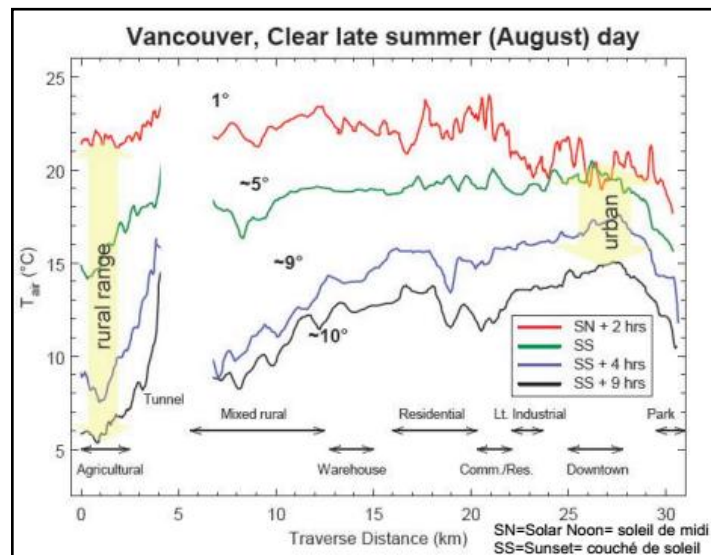


Fig.1.5 : Mesures des températures de l'air à différentes heures d'une journée d'été (claire et calme) à Vancouver (Voogt. J.A, 2003).

On remarque sur cette figure que la température au cours de la nuit est du même ordre de grandeur en ville comme à la campagne. L'écart est surtout important juste avant et après le coucher du soleil. Notons que la présence des parcs urbains coïncide avec les chutes de températures, jouant ainsi un rôle d'îlot de fraîcheur. Habituellement, l'intensité diurne est faible, 1 à 2°C, comparée à l'intensité nocturne standard comprise entre 3 et 5°C mais des différences plus importantes entre 8 et 10 °C ont été relevées (Chatzimitriou et al., 2006 ; Givoni, 1998).

Santamouris (2001) a compilé les données d'un grand nombre d'ICU étudiés dans le monde. Il rapporte des intensités pour les villes d'Europe entre 2.5°C à London (UK) et 14°C à Paris (France), pour les villes américaines entre 2°C à Sao Paulo (Brésil) et 10.1°C Calgary (Alberta), pour les villes asiatiques entre 1°C à Singapour et 10°C à Pune (Inde), et pour les villes africaines entre 1.9- 2°C à Johannesburg (Sud Afrique) et 4°C au Caire (Egypte).

Il peut être observé par vents faibles et ciel clair (Oke, 1976; Pigeon, 2007 ; Gartland, 2010). La fraction d'insolation dans la journée et la vitesse du vent sont les variables météorologiques qui influent le plus sur le différentiel de températures entre le centre de l'agglomération et la campagne environnante (Cantat, 2004). D'où son intensité moindre en conditions nuageuses (Morris et al., 2001 ; Alonso et al., 2007).

La nébulosité joue un rôle important quant à l'affaiblissement du phénomène puisque les nuages empêchent le refroidissement radiatif nocturne rural.

L'ICU diminue lorsque la vitesse du vent augmente (Alonso et al. 2007; Memon et al., 2010). Il devient négligeable pour des vitesses au-dessus de 5 m/s (Escourrou, 1991), disparaît pour des vitesses supérieures à 11 m/s (Pigeon, 2007).

L'ICU est par ailleurs d'autant plus fréquent en été. Des chercheurs américains ont constaté que les températures hivernales, dans les zones urbaines, sont généralement plus élevées de 1 à 4 °C que celles des zones rurales proches (Akbari et al., 1992).

Eliasson (1994) a relevé (ΔT_{u-r}) de 4°C en hiver et 5.5°C en été dans la ville de Göteborg.

I-2-2- Les îlots de chaleur de surface

La température de surface est également plus élevée en ville qu'à la campagne. Les îlots de chaleur mesurés à la surface du sol résultent de l'échauffement important des surfaces urbaines en raison des caractéristiques morphologiques et des matériaux qui constituent les villes. Ces effets apparaissent aussi bien le jour que la nuit, mais ont tendance à être plus importants le jour en raison de l'élévation de température des matériaux sous l'action des rayons solaires (**cf. Fig. I.6**).

De jour, la température moyenne de surface en milieu urbain est 10 à 15°C supérieure à la température de surface d'une zone rurale avoisinante. De nuit, elle est de 5 à 10°C supérieure (Cavayas et Baudouin, 2008).

De même, la chaleur de surface est plus importante en été par temps clair, lorsque l'intensité des rayons solaires reçus est maximale.

On peut observer et mesurer l'apparition des îlots de chaleur de surface grâce à des imageries satellites, des photographies aériennes ou bien depuis le sol au moyen de thermomètres laser à télédétection thermique (cf. Fig. I.7).

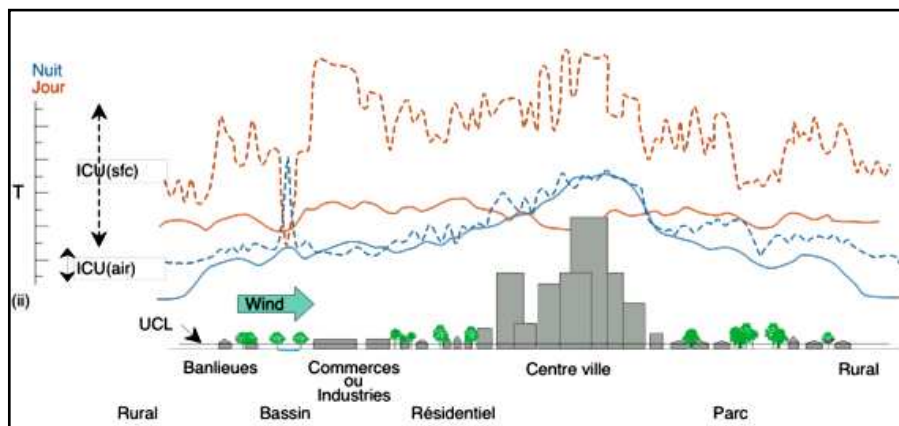


Fig. I-6 : Les variations journalières des températures d'air et de surfaces selon les types de milieu (Voogt. J.A, 2002).

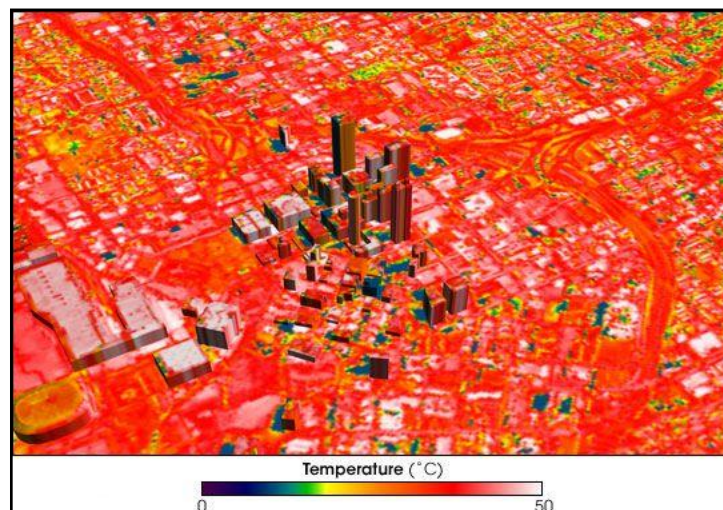


Fig. I.7: Carte des températures des surfaces Atlanta (<https://heatisland.lbl.gov>).

I-2-3- Causes des îlots de chaleur urbains

Les anomalies du climat urbain, dont les îlots de chaleur urbains, trouvent leur explication dans la modification du bilan énergétique de la ville conséquence de la nature intrinsèque de l'agglomération et de ses activités (cf. Fig. I.8). Un système est

dit en équilibre énergétique lorsqu'il reçoit autant d'énergie de l'extérieur qu'il ne lui en communique. L'équilibre thermique pour un secteur urbain est donné par l'équation :

$$R_n + F = H + LE + G + ph \quad \dots\dots\dots \text{Eq.I. 1}$$

Où :

R_n : Le flux radiatif net ou bilan radiatif. Il correspond au flux radiatif absorbé, toutes longueurs d'ondes confondues

F : Le flux anthropique. Il correspond au dégagement de chaleur produit par l'ensemble des activités humaines

H : Le flux de chaleur sensible. Il correspond au transfert de chaleur par convection (verticale) ou par advection (horizontale)

LE : Flux de chaleur latente, correspond à l'évaporation produite par les eaux de surface, par la végétation et par les surfaces perméables

G : Flux de chaleur (majoritairement radiative) stockée (généralement au cours de la journée) par conduction dans le sol, les rues et façades des bâtiments ou restituée (généralement au cours de la nuit) par les matériaux de construction.

ph : Stockage de l'énergie par les plantes pour assurer l'activité photosynthétique.

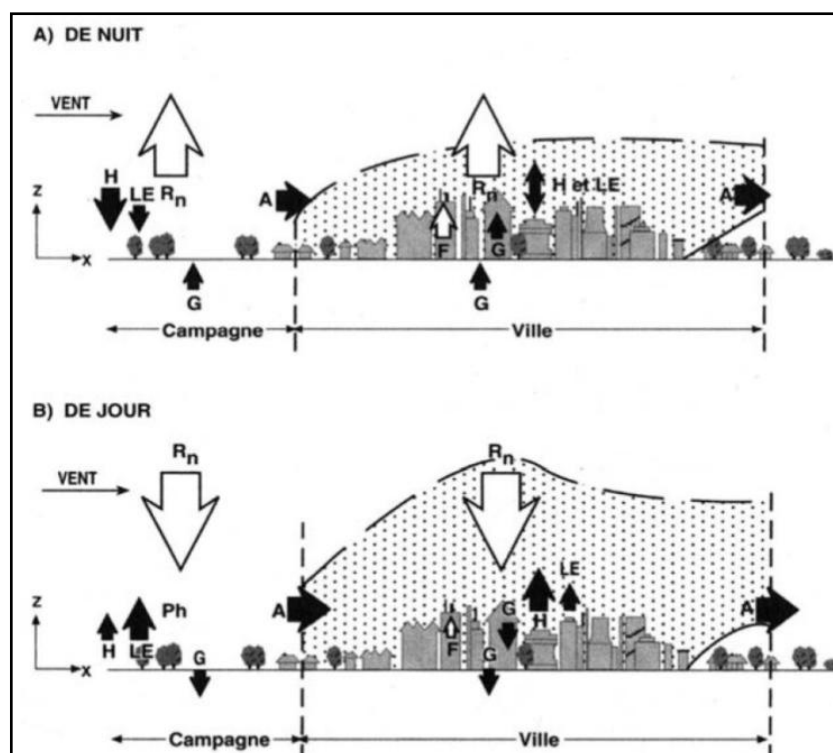


Fig. 1-8: Bilan d'énergie au-dessus d'une ville (Beltrando.G, 2011).

Il est à noter que ce bilan est positif pendant la journée car l'air est plus froid que la terre ainsi le transfert thermique tend à diminuer la différence et à chauffer l'air. La nuit, il devient négatif à cause de l'absence de livraison d'énergie sur la surface de la terre par le soleil.

En se basant sur les termes de ce bilan énergétique, les causes de la formation des îlots de chaleur urbains correspondent à une anomalie du bilan énergétique et peuvent être répertoriées selon leur mode d'action (Gartland, 2010 ; Oke, 1987 ; Akbari et al., 1997; Konopacki et Akbari, 2001; Santamouris, 2001 ; Moonen et al. ,2012).

I-2-3-a- Rayonnement net accru

Le rayonnement net est d'autant plus important que l'albédo des surfaces urbaines est faible, que les rues de la ville sont étroites et que le niveau de pollution est élevé. Les surfaces urbaines à cause de la pollution atmosphérique sont soumises à un rayonnement solaire direct déjà moindre qu'en milieu rural, 3 à 12% (Arnfield, 2003), Taha (1997) avance 12% de réduction et peut atteindre 33% dans un cas extrême de la ville de Hong Kong (Stanhill et Kalma,1995). Cette diminution concerne la composante directe du rayonnement solaire incident (Ringebach, 2004).

Ce rayonnement est encore amoindri par les masques solaires (l'ombre portée des bâtiments). Les surfaces urbaines sont plutôt soumises à un rayonnement solaire réfléchi et un autre infrarouge plus importants.

La morphologie urbaine favorise souvent le piégeage radiatif qui conduit à l'absorption d'une plus grande fraction du rayonnement solaire. Ce phénomène est le résultat des multi-réflexions du rayonnement solaire occasionnées par les surfaces urbaines en vis-à-vis et empiré par faibles ouvertures des rues étroites sur le ciel (cf. Fig. I.9).

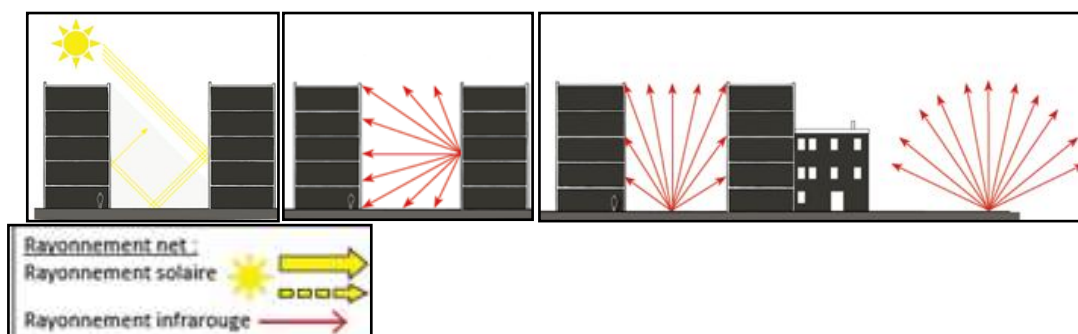


Fig. I.9 : Rayonnement net et piégeage radiatif en milieu urbain.
(Pommier.G et al., 2014).

Le faible albédo des matériaux de la ville (cf. Fig. I.10) tels que l'asphalte, les pavés ou le béton est synonyme d'une haute absorptivité solaire. Les matériaux à faible albédo absorbent plus d'énergie solaire et par conséquent se portent à de plus hautes températures. Ils contribuent ainsi au réchauffement de l'air par convection (Rosenfeld et al. , 1995; Taha et al., 1988). (cf. Fig. I.11, 12).

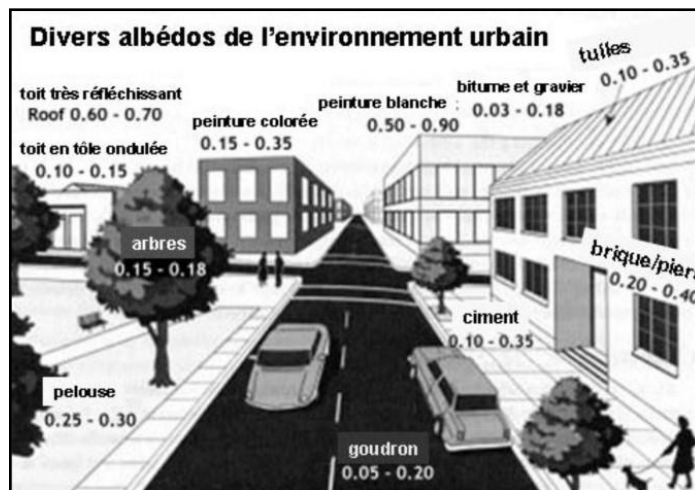


Fig. I.10 : valeurs d'albédo pour les différents types de surfaces urbaines (<https://notre-planete.info>).

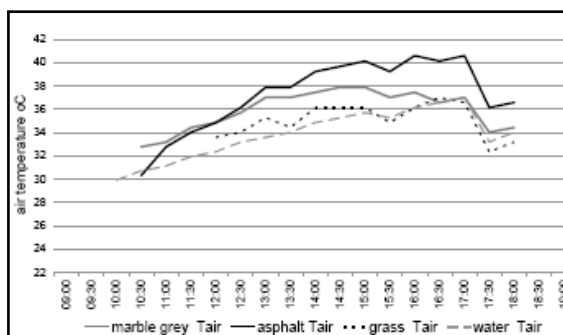


Fig.I.11:Températures de l'air au-dessus des surfaces naturelles et des surfaces artificielles (Chatzidimitriou.A et al., 2006).

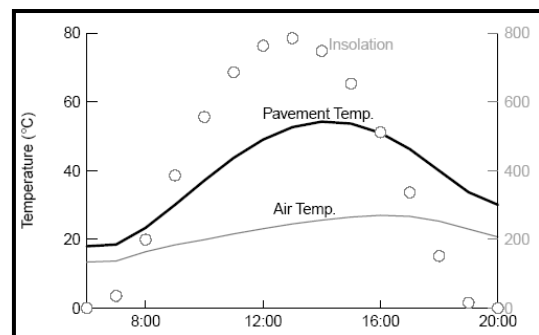


Fig.I.12 : la différence entre la température de l'air et la température de l'asphalte (Pomerantz.M et al., 2000.)

Les études estiment que si "le rayonnement solaire absorbé par tous les trottoirs (dans la ville) sont réduits de 65% à 90%, la température de l'air maximale diminuerait d'environ 0.6 °C (Musy, 2007). Par conséquent, l'emploi des matériaux à albédo élevé réduit la quantité du rayonnement solaire absorbé par les enveloppes des bâtiments et les structures urbaines et garde ces surfaces froides.

Taha et al. (1988) ont mesuré sur terrain l'albédo et les températures surfaciques d'une variété de surfaces. Ils ont trouvé que les enduits élastomères blancs avec un albédo de 0.72 étaient plus frais de 45°C que les enduits noirs (avec un albédo de 0.08) mesuré dans l'après-midi d'un jour clair en été. Une surface blanche avec un albédo de 0.61 était plus chaude de seulement 5°C que la température de l'air ambiant, tandis que le gravier conventionnel avec un albédo de 0.09 s'était réchauffé de 30°C de plus que l'air.

Asaeda et Wake (1996) ont examiné les effets de divers matériaux de pavage sur la température de l'air. L'étude a prouvé que les surfaces d'asphalte, aussi bien que les températures de l'air environnantes, étaient beaucoup plus chaudes en fin d'après-midi et pendant la nuit que les surfaces en béton ; cependant les températures prises à midi ont montré des températures de l'air au-dessus des surfaces en béton beaucoup plus élevées que celles au-dessus des surfaces en asphalte. C'est dû à la réflectivité élevée des surfaces en béton. Même conclusion a été tirée par Sasaki et al. (2015) et Scudo et al. (2004). Ce rayonnement solaire réfléchi va être absorbé par les bâtiments voisins et les piétons, ce qui rendrait l'environnement thermique plus hostile au confort piéton.

Le rayonnement infrarouge émis par les surfaces chauffées est fonction de l'émissivité. En l'absence des rayons solaires, elle est le facteur prédominant concernant l'équilibre thermique des matériaux plus elle est élevée meilleures sont les performances thermiques du matériau (Synnifa et al., 2006).

Un matériau ayant une forte absorption aux courtes longueurs d'ondes et une faible émissivité en grandes longueurs d'ondes constitue un véritable piège à énergie.

Le tableau **A.1** en **annexe A** donne les valeurs de l'albédo et de l'émissivité pour différents matériaux rencontrés en zone urbaine.

I-2-3-b- Stockage thermique accru

Contrairement aux surfaces naturelles, la grande capacité de stockage de chaleur des surfaces pavées et leur imperméabilité peuvent être d'une grande contribution à l'importance et à l'évolution de l'îlot de chaleur urbain (Pomerantz et al., 2000).

D'après Oke et al. (1991), les propriétés thermiques des matériaux de construction telles que la conductivité et la capacité thermiques jouent un rôle déterminant dans le comportement thermique dynamique des zones urbaines. Certains matériaux ont la capacité de diffuser rapidement la chaleur et de la stocker suffisamment pour la restituer progressivement à l'environnement urbain et continuer à fournir H en énergie

qui peut ainsi rester positif la nuit en ville. Le refroidissement radiatif plus rapide que la baisse de température de l'air met en évidence le rôle du flux de chaleur sensible dans le réchauffement de l'atmosphère (Nunez et Oke, 1976).

I-2-3-c- Evaporation réduite

A cause de l'imperméabilisation des sols urbains et l'évacuation rapide des eaux de pluies vers les égouts alliés au remplacement des surfaces végétales par du minéral, les phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration se trouve très réduit en ville. Cantat (1987) stipule que seuls les rejets de vapeur d'eau par les usines et la circulation automobile freinent l'assèchement des milieux urbains. A Tokyo, le passage de 22,1% à 37,1% d'espaces urbanisés (zones urbaines et résidentielles) dans un quartier de banlieue a diminué l'évapotranspiration de 38%, en 23 ans (Kondoh et Nishiyama, 2000).

En milieu naturel, le ruissellement de surface ne dépasse que rarement 10 % (cf. **Fig. I.13**), en revanche il atteint 55 % en milieu urbain, où les zones imperméables représentent entre 80 et 100% du total (Wong, 2008).

Les recherches estiment aussi que la différence de quantité de chaleur empruntée à l'environnement par m^2 correspond à 21×10^5 calories. En absence d'évaporation, un apport supplémentaire d'énergie en milieu urbain de $2,5 \text{ kWh.m}^{-2}$ en 24h.

Cette valeur représente un peu plus du double de l'énergie thermique résultant en été des activités humaines (Dettwiller, 1978).

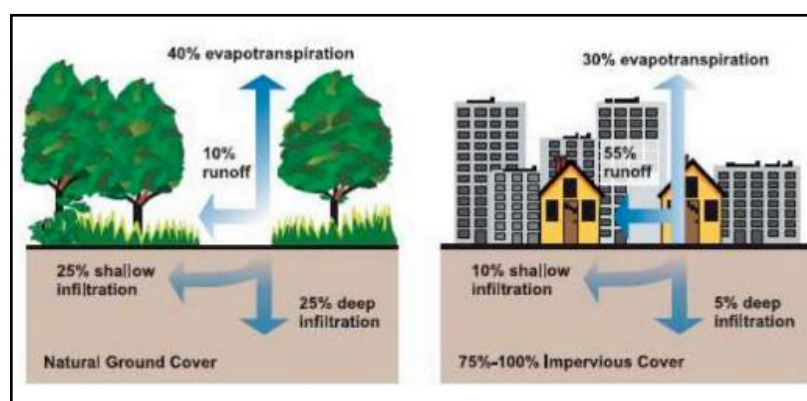


Fig.I.13: Perturbation du taux d'infiltration en milieu urbain due à l'imperméabilisation des sols (Wong.N.H, 2008).

Cantat (1993) estime qu'en milieu rural végétalisé la répartition entre flux de chaleur sensible et flux de chaleur latent est de l'ordre de 20% et 80% respectivement alors qu'en milieu urbain cette répartition est de 86% et 14%.

Le rapport du flux sensible au flux latent ($\beta = H/LE$) cité par Penicaud (1978) est appelé rapport Bowen. Il varie d'un lieu à un autre, suivant la possibilité d'absorption et de restitution d'eau et en particulier le pourcentage de surface végétale.

Dans une oasis il est compris entre 0.5-2, dans les secteurs urbains, il est en général autour de 5, dans un désert il est dans le voisinage de 10.

En Allemagne, Japon et l'Italie nombreuses villes et municipalités appliquent déjà depuis plusieurs années un principe de compensation qui prévoit de végétaliser en toiture l'équivalent de l'emprise au sol afin d'augmenter ce ratio (Müller, 2001).

La diminution de l'évaporation et de la transpiration des plantes entraîne aussi une humidité relative inférieure en zone urbaine qu'en zone rurale. Cette différence peut atteindre 20 à 30% en valeur extrême, et en moyenne 10% pour les mois d'été (Hage, 1975). En hiver par contre, l'air des villes est souvent plus humide que celui de la campagne environnante; cela est dû à la diminution du pouvoir de l'évapotranspiration de la campagne (sol gelé, absence de végétation) et à une augmentation du taux de vapeur en ville due aux processus de combustion.

On peut cependant à partir d'études expérimentales noter quelques traits caractéristiques du comportement de l'humidité en zone urbaine (Hage, 1975; Holmer et Eliasson, 1999; Mayer et al., 2003; Sacré, 1983). En général, l'air des villes est souvent plus sec le jour et un peu plus humide la nuit. Ce phénomène apparaît plus nettement en été par beau temps (cf. Fig. I.14).

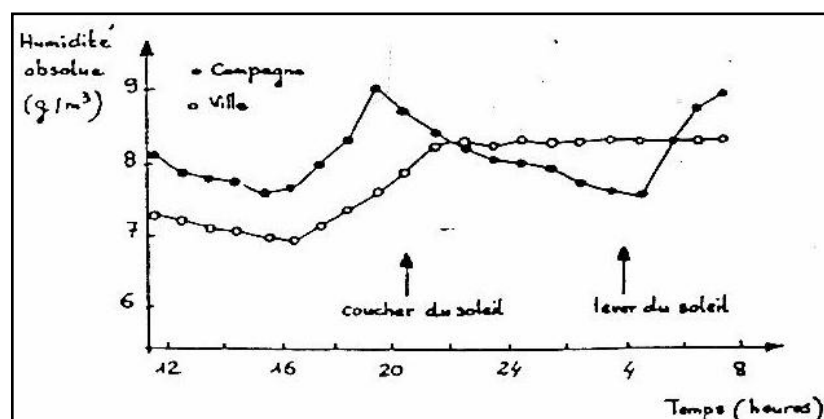


Fig. I.14 : Variation diurne de l'humidité absolue entre une zone urbaine et une zone rurale en été (Bonavitacola, M, 2001 d'après Hage, 1975).

L'excès d'humidité nocturne se traduit par un "îlot d'humidité", comparable à "l'îlot de chaleur" (Theeuwes, 2015). Comme pour ce dernier, la structure de l'îlot d'humidité

dépend étroitement de la structure de la zone urbaine, de la même façon son intensité diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent.

I-2-3-d- Apport anthropique

Les rejets de chaleur d'origine anthropique comme le chauffage et la climatisation des bâtiments, le transport et les activités industrielles sont très importants en milieu urbain à cause de la concentration des activités et des habitations.

Ces rejets peuvent, selon la saison et l'heure de la journée, contribuer de façon conséquente au bilan énergétique de la ville et affecter l'environnement thermique urbain de 2-3 °C (Taha ,1997a ; Memon et al. 2008 ; Oke, 1978; Taha, 1997b ; Mochida et al., 1999).

L'îlot de chaleur urbain est présent de façon plus nette en été qu'en hiver, on peut donc en déduire que les rejets thermiques d'origine anthropique, plus importants en hiver (chauffage), ne sont pas le principal facteur du réchauffement du climat urbain (Le bras, 2015).

I-2-3-e- Convection réduite

La morphologie de la ville influence, en plus du bilan radiatif, la vitesse du vent. De par sa rugosité élevée, la ville a tendance à ralentir la vitesse du vent dans les basses couches de l'atmosphère (cf. Fig. I.15).

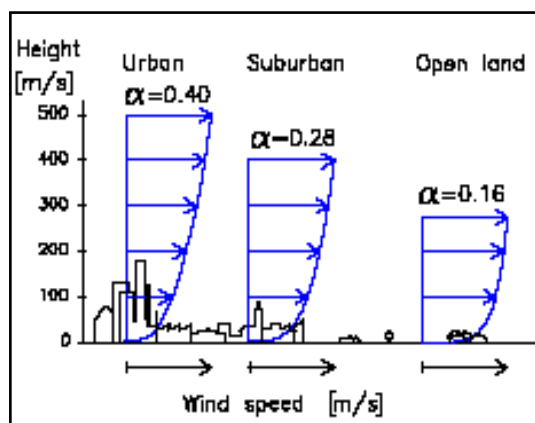


Fig. I.15 : Profils de vitesses du vent pour trois différents types de surfaces. La rugosité α est plus forte dans une ville dense avec des immeubles hauts. (Kofoed.N.U et Gaardsted.M , 2004)

Or, l'intensité de la convection est directement liée à la vitesse du vent à faible altitude. La réduction de la vitesse du vent réduit la convection. Ceci accentue le

stockage thermique et accroît la température des surfaces. Par ailleurs, la formation des zones de recirculation à l'aval des bâtiments dans les rues canyons et dans les espaces confinés conduit à des températures d'air locales élevées, plus importantes que l'intensité globale de l'îlot de chaleur à l'échelle de la ville.

Ces températures plus élevées créent une circulation d'air, un vent thermique, comme le décrit la **figure I.16** dit brise urbaine. Cette brise amène par des flux convergents l'air frais de la campagne vers les points chauds de la ville. Un flux ascensionnel se crée en centre ville et l'air est évacué par un flux divergent vers la campagne. (Ado, 1992 ; Lu et al., 1997 ; Hidalgo. J et al., 2010). Son extension est de 1 à 20 km (Escourou, 1991).

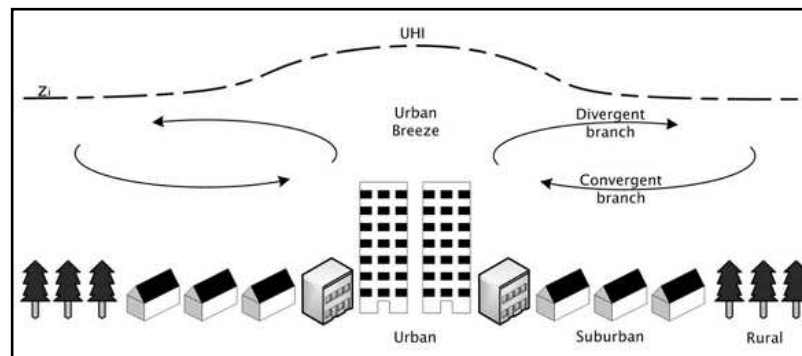


Fig. I.16. Représentation schématique du phénomène de brise urbaine.
(Hidalgo Rodriguez. J, 2008).

Elle apparaît généralement la nuit, lorsque la vitesse du vent régional est faible. Ceci lui attribue un rôle important dans la ventilation urbaine. D'où la nécessité de leur prise en compte dans la planification urbaine.

I-2-4- Effet de l'îlot de chaleur sur la consommation énergétique

Les dissipations thermiques des bâtiments notamment celles dues à la climatisation dans les basses et mi-latitude participent de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain. En Europe, lors de la canicule de 2003, la surconsommation énergétique avait été estimée à 10% de la consommation d'électricité totale (Le bras, 2015).

L'analyse d'Akbari et al. (1997) dans différentes villes des États-Unis a montré que les températures dans les zones urbaines ont augmenté de 0,5 -3°C en 100 ans. En conséquence, la demande d'électricité dans les villes a augmenté de 2- 4% pour chaque degré Celsius de plus. Néanmoins, en hiver aux moyennes latitudes, l'ICU peut être un

avantage car il contribue à diminuer la consommation de chauffage (Taha, 1997a ; Erell et al., 2011). Kolokotroni (2007) a analysé l'îlot de chaleur à Londres. Elle a constaté que la charge de refroidissement dans la ville était de 25% plus élevé que dans les milieux ruraux, alors que la charge de chauffage a diminué de 22%.

Santamouris et al. (2001) ont enregistré une réduction de 30% de la demande d'énergie pour le chauffage en période hivernale contre son dédoublement pour la climatisation à Athènes où l'intensité de l'îcu atteint les 10°C en été. Les mêmes conclusions ont été rapportées par Shimoda (2003) pour la ville d'Osaka (Japan).

I-2-5- Effet de l'îlot de chaleur sur la santé des populations

L'îlot de chaleur urbain a pour conséquence des fréquentes vagues de chaleur où les températures sont supérieures à 35°C. Ces canicules sont la première cause naturelle de surmortalité (Hajat et al., 2010; Vanos et al., 2014) et la vague de chaleur de 2003 en est l'exemple, car elle a provoqué la mort de 70.000 personnes en Europe avec une hausse seulement de 0,47°C aux valeurs moyennes sur 1961-1999 (Chaon, 2007).

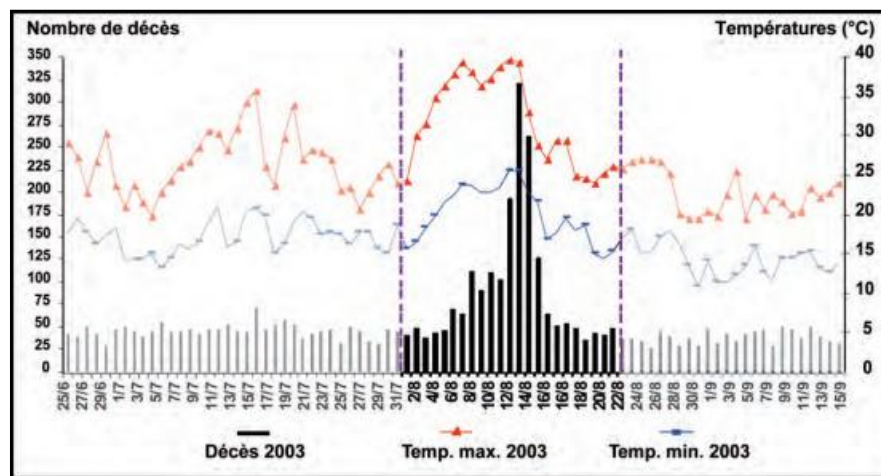


Fig. I.17. Températures minimales et maximales de l'été 2003 enregistrées à la station Paris Montsouris (zoom du 1^{er} au 22 août) et nombre de décès à Paris (adapté de l'INVS 2003, Sakhy. A et al., 2011)

La mortalité liée à la chaleur survient quand le corps humain absorbe plus de chaleur qu'il n'en dissipe. Très grave pour les sujets vulnérables tels que les personnes âgées et /ou souffrant de problèmes cardio-vasculaires.

De ceci, on conclut que préserver ou rétablir le confort thermique en espace urbain est vital pour la santé publique.

I-3- Le confort dans les espaces extérieurs

La notion de confort est complexe. Elle correspond à une sensation de bien-être par rapport à un sens. C'est pourquoi elle embrasse plusieurs champs : visuel, olfactif, acoustique thermique et aéraulique.

Les travaux entrepris, pour tenter d'appréhender l'influence des paramètres microclimatiques sur le confort des usagers en milieu urbain extérieur, se heurtent à la complexité des paramètres microclimatiques, qui se caractérisent par de fortes variabilités spatiale et temporelle d'une part et de la subjectivité du confort.

I-3-1- Le confort thermique

Le confort thermique est défini *« comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement »* (Liebard et De herde, 1996).

Cet équilibre est atteint lorsque "les conditions sous lesquelles les mécanismes d'autorégulation du corps sont dans un état d'activité minimum".(Givoni,1978 ; Depecker et al. , 1989).

De ce fait la sensation de confort thermique est associé aux échanges thermiques entre l'individu et les facteur microclimatiques (température de l'air, température radiante, vitesse du vent et humidité relative) ainsi que les facteurs personnels (vêtements et métabolisme) (Höppe ,1999 ; Matzarakis et Amelung, 2008 ; Taleghani et al., 2013) et d'autres facteurs contributeurs (alimentation, boisson, acclimatation, forme corporelle, poids, âge, sexe) (Auliciems et Szokolay, 1997).

Le présent travail se focalise sur l'effet des paramètres climatiques sur le confort aérothermique des piétons. Il est nécessaire d'étudier également les autres paramètres car c'est leur interaction qui modifie le ressenti des individus.

I-3-1-a- Effets thermiques

L'homme produit et échange de la chaleur. Sa production de chaleur interne se répartit dans sa masse corporelle tandis que ses échanges thermiques externes se font à la surface cutanée. Ces échanges dépendent du gradient de température existant entre la température de la peau du sujet (T_{sk}) et les paramètres environnementaux.

I-3-1-a-1- Effet dû à la conduction

Elle se fait à travers des surfaces en contact (sol, siège.....), négligeable pour un piéton de par la grande résistance des chaussures et des tissus qui agissent comme des

isolants et la faible densité de l'air qui en fait un mauvais conducteur. Cependant la température optimale du sol est de 23°C pour un individu chaussé debout et 25°C pour un individu chaussé assis (Belatrache, 2006).

I-3-1-a-2- Effet dû à la convection

Les échanges convectifs correspondent à l'échange d'énergie entre le corps humain et un fluide en mouvement (l'air ou l'eau).

Ces échanges sont d'autant plus importants que la ventilation est intensive et que la température du milieu ambiant est différente de celle de la peau.

Les échanges convectifs diminuent par l'interposition d'une couche isolante (qui va limiter l'écart entre sa température et celle de la température de la peau) comme les vêtements. Il existe deux sortes de convection :

- Convection naturelle : le mouvement de l'air est lié à son réchauffement à proximité du corps. Les vitesses maximales dans les couches limites se développent le long du corps et sont de l'ordre de 0.1 à 0.2 m/s.
- Convection forcée : l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe telle que le vent.

Dans les climats froids, le vent diminuera presque toujours les conditions de confort à l'extérieur, tandis que l'inverse est vrai dans les climats chauds (voir infra).

Les effets combinés du rayonnement solaire et de la vitesse du vent dans l'environnement présentent de nombreuses répercussions sur la sensibilité physiologique de l'individu.

Selon Liebard et De Herde (2005), pour des températures comprises entre 21 et 24°C, un déplacement d'air à la vitesse de 0,5 à 1 m/s donne une sensation rafraîchissante confortable à des personnes assises n'ayant que de faibles activités. Mais lorsqu'on fournit un travail musculaire dans un environnement chaud, des vitesses d'air de 1,25 à 2,5 m/s sont nécessaires pour apporter un soulagement (**cf. Tab.I.1**). L'effet rafraîchissant est ressenti peut-être exprimé en fonction de la diminution de la température de l'air qui donnerait le même effet rafraîchissant en air calme.

Tab.I.1 : Degrés de refroidissement en fonction des vitesses de l'air Valable pour des conditions moyennes d'humidité et d'habillement (*Osborne et Turner, 1969*).

Vitesse de l'air (m/s)	Refroidissement équivalent (°C)
0.1	0
0.3	1
0.7	2
1.0	3
1.6	4
2.2	5
3.0	6
4.5	7
6.5	8

I-3-1-a-3- Effet dû à l'évaporation

Régis par le taux d'humidité. A priori, l'humidité en elle-même n'a pas beaucoup d'impact sur les échanges thermiques. Elle intervient parce que l'organisme humain a des muqueuses qui, par définition, sont toujours moites ou mouillées (lèvres, yeux, voies respiratoires). A ce niveau les échanges sont relativement faibles mais la perception des changements est grande. Au niveau cutané, par contre, une augmentation d'humidité de l'air n'affectera pas le taux de sueur mais diminuera la perte de chaleur théorique maximum par l'intermédiaire de l'évaporation (Mathai et al., 2004 ; Candas, 2008).

Le mouvement de l'air affecte les échanges évaporatoires .Il accélère la perte de chaleur par évaporation. Dans des conditions où le taux d'humidité relative est bas soit inférieur à 30%. Cet effet est important car l'évaporation est limitée même en air calme. Dans des conditions très humides, où le taux d'humidité relative dépasse 85%, la perte de chaleur par évaporation est restreinte, en conséquence la perte évaporatoire due au mouvement de l'air ne peut pas significativement refroidir l'individu (Auliciems et Szokolay,1997).

I-3-1-a-4- Effet dû au rayonnement

Dans le domaine du confort extérieur, on peut distinguer deux types de rayonnement : Le rayonnement de courte longueur d'onde (CLO) et le rayonnement de grande longueur d'onde (GLO).

- Le rayonnement de courte longueur d'onde, $\lambda \leq 2.5\mu\text{m}$, Il correspond aux apports solaires (directs, indirects, diffus et réfléchis) et donc observable uniquement en période diurne. Cet apport est fonction de la surface du corps soumise au rayonnement solaire

plus importante pour la position debout qu'assise (Givoni, 1978), de l'albédo du terrain et des surfaces verticales environnantes. Toutefois, le rayonnement solaire direct est la composante dominante dans les calculs du confort thermique (Nazarian et al., 2017).

La vitesse du vent réduit le gain de chaleur dû au rayonnement solaire dont la grandeur de ses effets dépend de la tenue vestimentaire soit sa résistance thermique, sa couleur et son ampleur puisque les vêtements interceptent les rayons solaires à une certaine distance de la peau (Givoni, 1978).

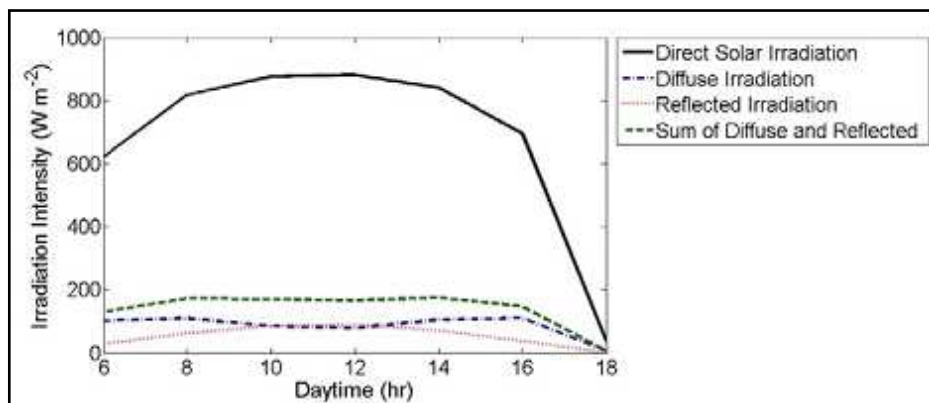


Fig. I.18. L'évolution journalière des composants du rayonnement solaire au niveau piéton (Nazarian. N, 2017).

- L'échange par rayonnement entre des surfaces terrestres (exemple : sol, surfaces urbaines etc.) se passe par des ondes électromagnétiques de grandes longueurs d'ondes dit rayonnement infrarouge qui provient de l'énergie absorbée et réémise par l'atmosphère et celle provenant des surfaces environnantes à des longueurs d'ondes plus importantes, $\lambda > 2.5\mu\text{m}$ et s'observent à tout moment, car tout objet dont la température est supérieure à 0°K (-459°F ou -273°C) émet de l'énergie radiante (Brown, 1982). Ces échanges s'opèrent sans contact entre le corps humains et les surfaces environnantes de différentes températures. Chacun d'eux absorbe une fraction de l'énergie par radiation émise par l'autre. Cette fraction dépend de leur température, de leur pouvoir respectif d'absorption et d'émission, de leur albédo, couleur ainsi que les conditions internes des bâtiments (chauffage et climatisation.....etc.).

I-3-1-a-5- La température moyenne radiante (MRT ou Tmrt)

Main radiant température, quantité de chaleur résultante de plusieurs modes d'échanges thermiques entre l'individu et son environnement soit par rayonnement en CLO et GLO (cf. Fig. I.19).

Il a été prouvé par des nombreuses études que la température (T_{mrt}) joue un rôle prépondérant dans le confort thermique piéton (Lindberg et al. 2008 ; Cohen et al. , 2012 ; Matzarakis et al., 2010 ; Mayer et Höppe, 1987 ; Shashua-Bar et al., 2012 ; Yang et al, 2013), essentiellement en conditions chaudes et ensoleillées (Mayer et Höppe, 1987 ; Nazarian, 2017 ; Ghaffarianhoseini. A et al., 2015) et par conséquent, elle a la plus forte influence sur les indices thermo physiologiques significatifs tels que la PET (la température physiologique équivalente) ou le PMV (vote moyen prévisible). (Matzarakis et al., 2006).

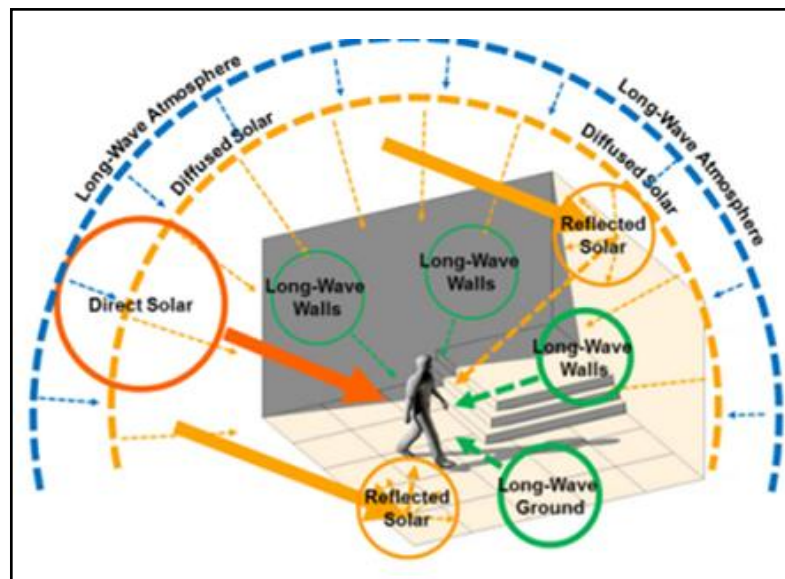


Fig. I.19 Composants de la T_{mrt} dans un environnement urbain. (Huang. J. et al. 2014).

En effet, le rayonnement solaire direct a l'effet le plus significatif sur la T_{mrt} (Nazarian et al.2017 ; Takebayashi, et al., 2014 ; Höppe, 1993 ; Taleghani et al., 2014, 2015 ; Thorsson et al., 2014). D'où l'impacte de la géométrie de l'espace et son orientation au soleil sur le confort thermique extérieur (Arnfield, 1990 ; Littlefair, 1998 ; Van Esch et al., 2012).

Elle est définie comme "*température uniforme des surfaces extérieures environnantes qui procurent un rayonnement de corps noir (coefficient d'émission $\varepsilon = 1$) donnant lieu, pour le corps humain les mêmes gains d'énergie par rayonnement que les flux radiatifs, souvent très variables, qui prévalent dans les conditions d'un espace ouvert. En d'autres termes, la MRT est une valeur moyenne des températures des surfaces solides ou fictives (comme la voûte céleste) pondérées par des facteurs de forme.*" (Ruros, 2004).

La T_{mrt} peut être obtenu par mesure directe de tous les flux radiatifs régnant dans l'espace ou par des calculs (Matzarakis et al., 2006). Différents programmes de simulation permettent le calcul de la T_{mrt} dans les espaces urbains, notamment le modèle RayMan (Matzarakis et al., 2010), ENVI-met 3.1 (Bruse, 2009) et SOLWEIG 2.2 (Lindberg et al., 2008).

I-3-1-b-Effet métabolique

La production métabolique représente environ 77% de la dépense énergétique du fait du rendement musculaire. Le corps humain maintient un taux minimal de production de la chaleur d'environ 75 watt ($\approx 45 \text{ w.m}^{-2}$) pendant le sommeil et 120 watt ($\approx 60 \text{ w.m}^{-2}$) lorsqu'il est éveillé mais au repos (Hutchon, 1972). A mesure que l'activité du corps augmente, le taux d'oxydation des aliments avec leur distribution d'énergie doit augmenter, La dépense énergétique dans ce cas dépend de la vitesse de marche, de la nature du terrain et aussi de la charge portée (adnsp, 2003).

Elle est évalué en général en met, $1 \text{ met} = 58.2 \text{ w/m}^2$ (unités de SI).

La norme ISO 8996 donne une classification de la dépense énergétique selon l'activité (cf. **Tab. A-2, annexe A**).

I-3-1-c- Effet vestimentaire

C'est l'isolement thermique apporté par les vêtements. La température de la peau (T_{sk}) peut varier entre 33 à 34.5°C d'où il y a inconfort généralisé en dessous de 32,5°C et au dessus de 34.8°C (Vinet, 2000).

L'habillement influe sur le terme de convection : plus il est élevé, plus il limite les échanges, mais aussi le terme d'échanges radiatifs, là aussi les vêtements du fait qu'ils couvrent la peau limitent les échanges radiatifs. Une personne en costume de travail et sous-vêtement en coton peut demander une température d'environ 9°C inférieure à un corps nu (Koenisberger et al., 1973).

L'isolation thermique vestimentaire I_{cl} s'exprime en $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ par watt ou en Clo. Une isolation de 1 Clo correspond à $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$, isolement nécessaire au maintien de la balance thermique de l'homme sédentaire à 21° C en air calme (Candas, 2008) et est fournie, par exemple, par une tenue de ville classique (chemise, cravate, pantalon, veston, etc.). L'isolation thermique des vêtements se trouve dans la norme ISO 9920 (1995) (cf. **Tab. A.3, annexe A**).

Il est à noter que sous des conditions venteuses et humides, le pouvoir réchauffant des vêtements diminue de 90% par rapport à des conditions sèches ([http:// : www.med.univ.angers.fr](http://www.med.univ.angers.fr)).

I-3-1-d- Thermique du corps humain

L'activité métabolique consiste à transformer la nourriture consommée, d'une part en constituants du corps (protéines, tissus) et d'autre part en énergie. L'énergie ainsi produite nous permet différentes activités ainsi que le maintient, grâce au sang qui parcourt toutes les parties du corps, la température interne dans des limites très restreintes 37 ± 0.8 °C (Reckenagel, 1996) afin que les réactions biochimiques nécessaires puissent se faire dans de bonnes conditions.

Toutefois le maintien de cette homéothermie fait appel avant tout aux mécanismes physiologiques assurant la thermorégulation dont le but est de conserver un équilibre entre les gains et les pertes de chaleur selon l'équation :

$$M \pm K \pm C \pm R - E = 0 \dots\dots\dots \text{Eq.I.2}$$

Où :

M : flux d'énergie produit par le métabolisme des organes (toujours positif)

L'activité métabolique consiste à transformer la nourriture consommée, d'une part en constituants du corps (protéines, tissus) et d'autre part en énergie. L'énergie ainsi produite nous permet différentes activités ainsi que le maintient, grâce au sang qui parcourt toutes les parties du corps, la température interne dans des limites très restreintes 37 ± 0.8 °C (Reckenagel, 1996) afin que les réactions biochimiques nécessaires puissent se faire dans de bonnes conditions.

K : flux d'énergie perdu ou gagné par conduction.

C : flux d'énergie perdu ou gagné par convection.

R : flux d'énergie perdu ou gagné par rayonnement.

E : flux d'énergie perdu par évaporation (toujours négatif).

Ce bilan thermique doit être égal à zéro sinon l'équation est :

⊕ positive : donc les gains sont supérieurs aux pertes de chaleur, un stockage thermique intervient avec risque d'hyperthermie et de déshydratation.

Seules une vasodilatation cutanée et une évaporation sudorale assure une thermolyse efficace pour rétablir l'équilibre du bilan thermique mais cette dernière dépend aussi du

gradient qui existe entre la pression saturante de vapeur d'eau au niveau de la peau, qui est fonction de la température de la peau et la pression partielle de la vapeur régnant dans l'air, fonction à son tour de la température de l'air et l'humidité relative (Adnsp, 2003).

✚ Négative : les pertes de chaleur sont supérieures aux gains, une dette thermique s'installe, la température interne chute avec risque d'hypothermie accidentelle. le corps peut lutter en générant un mécanisme thermo protecteur que constituent les frissons et la vasoconstriction cutanée.

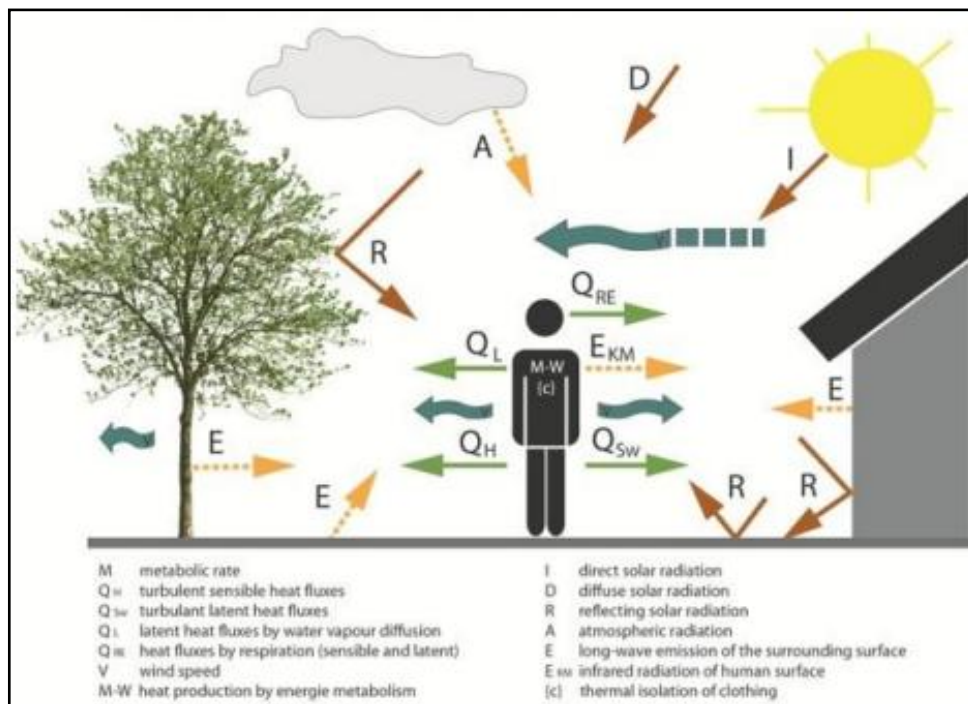


Fig. I.20 : Variables du bilan énergétique de l'être humain.
(Hirashima.S et al., 2015).

I-3-1-e -Les indices du confort thermique dans les espaces extérieurs

Environ 162 indices thermiques ont été développés décrivant l'échange thermique entre un corps humain et son environnement dans des conditions chaudes et froides (De Freitas et al., 2014). La plupart des recherches concernant le confort thermique se sont focalisées sur les espaces intérieurs. Ces dernières décades, beaucoup de recherches se sont focalisées sur le confort thermique en espaces extérieurs, ce qui a exigé la reconsidération et l'addition d'autres facteurs tels que le rayonnement solaire, vitesse de vent, différentes activités, le taux de sueur et les vêtements (**voir supra**).

Une littérature assez abondante décrit ces différents indices. On présentera ici les indices les plus récents et applicables, notamment, dans cette recherche.

I- 3-1-e-1- Le vote moyen prévisible

The Predicted Mean Vote (PMV) défini par Fanger en 1972 pour des espaces intérieurs afin d'évaluer l'environnement thermique. Il représente la valeur moyenne des expressions subjectives d'un groupe de personnes exposées à la même ambiance thermique en se basant sur les sept échelles de confort définies par Ashrae qui s'étale de -3 (très froid) à +3 (très chaud) (Mayer,1993).

Cet indicateur, basé sur le modèle d'équilibre énergétique a fait l'objet de plusieurs modifications visant à l'adapter pour une utilisation dans les milieux extérieurs. Parmi ces modifications nous citons celle de Gagge et al. (1986) qui a introduit la variable « Température effective » (ET*) dans la méthode de calcul du PMV pour une meilleure prise en compte de l'hygrométrie en zone chaude.

Afin de pouvoir prendre en compte les apports solaires ainsi que l'hétérogénéité des conditions extérieures. Jendritzky et al. (1979) développa le Klima Michel Model (KMM) significativement utilisée aujourd'hui (Matzarakis, 2008 ; Tsuyoshi, 2009).

C'est une autre adaptation du PMV de Fanger avec les radiations de courtes longueurs d'ondes, calculées dans la température moyenne radiante.

Michel est un nom allemand typique, fait référence à ce que Jendritzky appelle un Allemand de référence: un mâle de 35 ans, 1,75m de taille, 75 kg de poids et marche à 4 km/h. Pour ce qui concerne l'habillement, il est sélectivement choisi entre 0.5 et 1.75 clo (ensembles d'habillement allemands d'été et d'hiver respectivement).

Le **tableau I.2** présente l'échelle d'appréciation du PMV.

Michael Bruse dans ses travaux effectués lors de l'actualisation de son programme de simulation Envimet a adopté neuf échelles de confort propres aux espaces extérieurs, où la zone théorique de confort extérieur est comprise entre -4 et +4 (Bruse, 2004).

Cet indice purement physiologique a été remis en cause par plusieurs recherches expérimentales sur l'évaluation du confort thermique extérieur à court terme principalement, parce qu'il ne peut analyser l'exposition passagère (Thorsson et al., 2006), et les variations interpersonnelles sont sous estimées (Nikolopoulou et al., 2001).

Tab. I.2. Niveaux du PMV et stress physiologiques associés (Jendritzky *et al.* 1990).

PMV	Niveau de stress	Sensation thermique
Au dessus de 3.5	Stress thermique extrême	Torrède
3.5~ 2.5	Très fort stress thermique	Très chaud
2.5 à 1.5	Fort stress thermique	Fortement chaud
1.5 à 0.5	stress thermique modéré	Chaud
0.5 à -0.5	Aucune contrainte thermique	Confortable
-0.5 à -1.5	Léger stress du au froid	Légèrement frais
-1.5 à -2.5	Stress modéré du au froid	Frais
-2.5 à -3.5	Fort stress du au froid	Froid
Au dessous de -3.5	Extrême Stress du au froid	Très froid

I- 3-1-e-2- La température physiologique équivalente

The physiological equivalent temperature (PET) est devenu ces deux dernières décades le moyen le plus adéquat pour évaluer le confort thermique en différents climats car elle peut évaluer l'effet de plusieurs éléments sur l'environnement thermique urbain. (Mayer et Höppe, 1987; Höppe, 1999; Matzarakis *et al.*, 1999), et son unité en (°C) facilite son interprétation par les acteurs de projets urbains, architectes, décideurs et urbanistes.

Définie par Höppe en 1999, c'est la température d'un environnement avec ou sans rayonnement solaire, à laquelle, dans l'environnement de référence, l'équilibre thermique de la peau et la température centrale sont les mêmes que ceux trouvés dans l'environnement donné.

L'environnement de référence pour un sujet de sexe masculin, âgé de 35 ans, de 1.75 m de taille et d'un poids de 75Kg est défini par :

- La température moyenne radiante (t_{rmt}) = température de l'air (t_a);
- vitesse d'air (V) = 0.1 m/s;
- pression de vapeur (p_v) = 12 hPa (humidité relative RH = 50% à $t_a=20$ °C);
- Métabolisme (M) = activité légère, métabolisme de travail de 80 w à ajouter au métabolisme de base.
- Résistance des vêtements (R_{clo}) = 0.9 Clo .

Selon Höppe (1999), la supposition des valeurs constantes pour l'habillement et l'activité dans le calcul de la PET ont été faites afin de définir un indice indépendant des paramètres individuels (Farajzadeh et al., 2015)

Dans le cas concret d'une journée chaude et ensoleillée d'été, la valeur de la PET peu valoir 43°C, cela signifie qu'un individu dans une pièce avec une température de l'air de 43°C atteint le même état thermique que dans ces conditions en extérieurs. S'il avait à se déplacer à l'ombre, la PET diminuerait de 14°C pour atteindre une valeur de 29°C (Masmoudi, 2003) (**cf. Tab. I-3**).

Ainsi la **PET** permet de comparer les effets d'un environnement thermique complexe en extérieur avec sa propre expérience en intérieur.

L'influence de l'humidité sur la PET est limitée au flux de chaleur latente via la respiration et par diffusion à travers la peau. Cette sensibilité à l'humidité jugée insuffisante est un inconvénient de la PET (Köppe. Ch. et al., 2003). Toutefois une étude de Lin. T.P et al. (2009) à Tawain affirme que pour des personnes acclimatées à des humidités relatives importantes, il n'est pas très significatif de sous- estimer l'influence de l'humidité.

Tab. I-3: Exemples de PET pour différents scénarios (Höppe, 1999).

	T _{air} (°C)	T _{mrt} (°C)	U (m/s)	P (hPa)	PET (°C)
Pièce typique	21	21	0.1	12	21
Hiver, au soleil	-5	40	0.5	2	10
Hiver, à l'ombre	-5	-5	5.0	2	-13
Été, au soleil	30	60	1.0	21	43
Été, à l'ombre	30	30	1.0	21	29

L'échelle d'évaluation de la PET (**cf. Tab. I-4**) est obtenue en calculant le PMV de Fanger (1972) pour différentes températures de l'air dans l'environnement de référence en utilisant les paramètres pour le sujet de référence (Matzarakis et al.1999).

Pour déterminer une classification des plages du confort thermique et l'influence des paramètres thermiques, une enquête de confort thermique ayant comme indice la PET a été menée dans plusieurs pays : l'Italie (Salata et al., 2016), Portugal (Oliveira et Andrade, 2007), Territoires occupées (Cohen et al. , 2013), Taiwan (Lin et Matzarakis, 2008; Lin et al., 2015), Egypte (AHA, 2011), Chine (Zeng et Dong, 2015) et Syrie (Yahia et Johansson, 2013).

Tab. I-4: Niveaux de la PET et stress physiologiques associés (*Matzarakis et Mayer, 1997*).

PET (°C)	Niveau de stress	Sensation thermique
> 41	Stress thermique extrême	Torrède
35 à 41	Très fort stress thermique	Très chaud
29 à 35	fort stress thermique	Fortement chaud
23 à 29	stress thermique modéré	chaud
18 à 23	Aucune contrainte thermique	Confortable
13 à 18	Léger stress du au froid	Légèrement frais
8 à 13	Stress modéré du au froid	Frais
13 à 8	Fort stress du au froid	Froid
8 à 4	Très fort stress du au froid	Très froid
< 4	Extrême Stress du au froid	Extrêmement froid

Dans ces études, les résultats indiquent que la température neutre et la plage de confort thermique sont généralement les mêmes (26 -30 ° C).

Une calibration de l'indice PET par Hirashima et al.(2015) pour la ville de Fribourg (Allemagne) au climat chaud en été et froid en Hiver avec des fortes amplitudes , donc une grande similitude avec le climat de Constantine (**Cf. Tab.3 annexe C**) donne une nouvelle classification des sensation thermiques pour la PET (**cf. Tab. I-5**).

Tab. I-5: Niveaux calibrés de la PET et stress physiologiques associé (*Hirashima et al, 2015*).

PET (°C)	Niveau de stress	Sensation thermique
> 38	Très fort stress thermique	Très chaud
35 à 38	fort stress thermique	Fortement chaud
29 à 34	stress thermique modéré	chaud
18 à 28	Aucune contrainte thermique	Confortable
13 à 17	Stress modéré du au froid	Frais
8 à 12	Fort stress thermique du au froid	Froid
< 8	Très fort stress du au froid	Très froid

Pour la PET, il est important d'évaluer tous les paramètres climatiques à 1.1m relative au centre de gravité d'une personne debout (Gulyas et al., 2006).

Pour des faibles vitesses de vent, le paramètre clé qui influence la température de l'air est la T_{mrt} . La **figure I-21** illustre la corrélation positive entre la T_{mrt} et la PET.

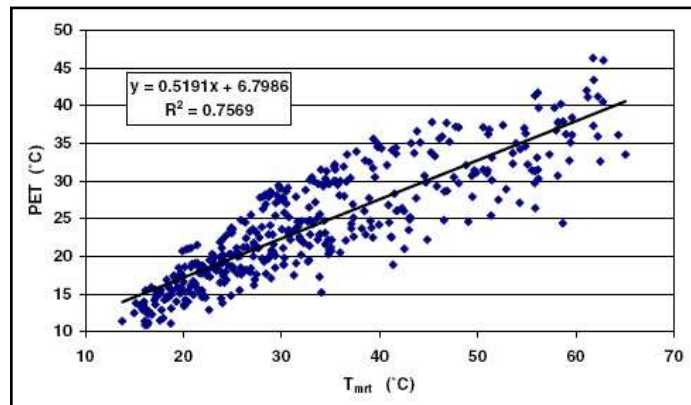


Fig. I.21 : Relation entre T_{mrt} et PET durant des journées d'été (2001) à Fribourg. (Matzarakis.A et al., 2007).

I- 3-1-e-3 - L'indice universel du climat thermique

L'Universal thermal climate index (UTCI). Un des plus récents indices. Il a pour but d'être valable et précis pour tous les climats, toutes les saisons et ceci à toutes les échelles spatiales et temporelles c-à-d. applicable aussi bien pour une exposition longue que passagère, indépendamment des caractéristiques personnelles et prend en considération la possibilité de différents niveaux d'isolation par les vêtements (Jendritzky et al., 2010 , 2011).

Il désigne le stress thermique ressentie par l'homme par la combinaison des paramètres de température de l'air, humidité ou pression de vapeur d'eau, vitesse de vent (à 10m), radiation thermique avec un modèle physiologique (Fiala et al., 2012), un modèle d'habillement et une situation de référence d'une personne se déplaçant à une vitesse de 4 km/h qui correspond à un taux métabolique de 135 W. m² (Błażejczyk et al., 2010 , 2012 ; Bröde et al., 2011 , 2012);

- température moyenne radiante (T_{mrt}) = la température de l'air (t_a)
- vitesse d'air (v_a) = 0.5 m/s à (10 m);
- pression de vapeur (p_v) = 12 hPa à $t_a < 29$ °C ;
- humidité relative (HR) = 50% à $t_a < 29$ °C;

- Résistance des vêtements allant de 0.4 à 3.0 clo (dépendant de la température de l'air d'une manière non linéaire).

Le calcul de l'UTCI s'effectue par le logiciel BioKlima 2.6 (téléchargeable à partir de: <http://www.igipz.pan.pl/Bioklimazgik.html>), ou le logiciel RayMan.

Les valeurs de l'UTCI sont interprétées suivant l'échelle d'appréciation présentée dans le **tableau I.6**.

Tab. I.6 : Niveaux de l'UTCI et stress physiologiques associés (*www.UTCI.org*).

UTCI (°C)	Niveau de stress	Sensation thermique
>46	Stress thermique extrême	Torrède
+38 à +46	Très fort stress thermique	Très chaud
+32 à +38	fort stress thermique	Fortement chaud
+26 à +32	stress thermique modéré	chaud
+9 à +26	Aucune contrainte thermique	Confortable
+9 à 0	Léger stress du au froid	Légèrement frais
0 à -13	Stress modéré du au froid	Frais
-13 à -27	Fort stress thermique du au froid	Froid
-27 à -40	Très fort stress du au froid	Très froid
< -40	Extrême Stress du au froid	Extrêmement froid

La principale différence entre la PET et l'UTCI est que la première utilise toujours des vêtements standards (Clo = 0,9) et l'UTCI ajuste les vêtements en fonction des conditions spécifiques existantes à l'extérieur (Jendritky et al., 2012).

L'isolation des vêtements, ajustée à la température ambiante, en tenant compte des habitudes saisonnières d'adaptation des vêtements, a un effet notable sur la perception humaine du climat extérieur (Havenith et al., 2012).

La comparaison de ces deux indices à partir de données horaires recueillies pendant 10 années dans la ville européenne Freiburg (Allemagne) à climat tempéré a révélé un coefficient de corrélation entre les deux indices de 0,936 (cf. **Fig. I.22**) et que le nuage est plus étroit pour des températures supérieures à 15 °C où les différences maximales sont d'environ 5 °C. Pour les conditions de froid, les différences peuvent être supérieures à 30 °C en raison de l'inégale efficacité de la modélisation thermo-physiologique de l'isolation par les vêtements (Matzarakis et al., 2014).

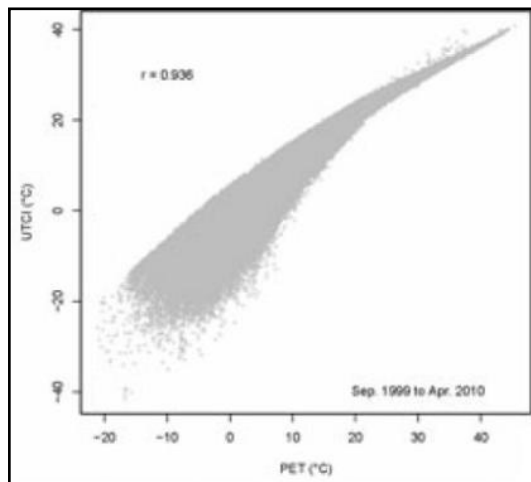


Fig.I.22 : Le diagramme de dispersion de l'UTCI et la PET à Fribourg pour la période 1.09.1999 au 30.04.2010 (Matzarakis et al., 2014)

I- 3-1-e-4 - La température physiologique équivalente modifiée

Chen et Matzarakis (2017) ont redressé la limitation de la PET de plusieurs manières: en remplaçant le modèle MEMI, jugé dépassé, par l'équation de la bio-heat en utilisant un modèle de corps multi-segment (16–26 nœuds) pour améliorer la thermo-physiologie et la thermorégulation de la PET, un habillement multicouche basé sur l'isolation totale des vêtements, en modifiant le mécanisme de transfert du flux de chaleur latent provenant de la peau et de l'habillement vers l'air, et enfin le développement de la PET Modifiée (Modified physiological equivalent temperature, mPET) adaptée aux différentes conditions climatiques (Lin et al., 2018).

En résumé, mPET a modifié la faiblesse de la PET sur la performance des vêtements et de l'humidité et gardé le meilleur des performances sur la température de l'air, la température moyenne radiante et la vitesse du vent.

Pour tester si la mPET est plus appropriée dans les régions chaudes et humides que la PET jugée peu sensible à l'humidité, une analyse d'une base de données d'enquête sur le confort thermique, contenant 2071 questionnaires recueillis auprès de participants à Taiwan au climat chaud et humide, a été réalisée (Lin et al., 2018).

Les résultats indiquent une grande corrélation de $R^2 = 0,99$ des résultats de la mPET et la PET appliqués pour une plage de confort thermique similaire (26-30° C).

La **figure I.23** montre la distribution des valeurs de PET par rapport aux valeurs mPET pour 2071 sujets. PET et mPET sont identiques pour une valeur de 31,2 °C. Au-dessus de 31,2 °C, le mPET est légèrement inférieur à la PET.

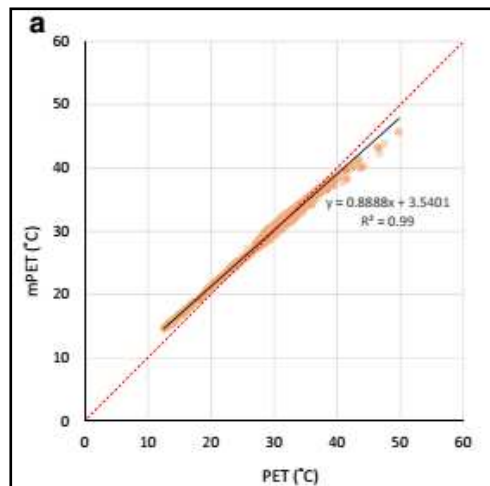


Fig. I.23: Corrélation entre la mPET et la PET pour une enquête sur 2071 sujets (Lin et al., 2018).

La déviation indique que la mPET a des valeurs modérées aussi bien pour les conditions très froides que très chaudes et s'adapte ainsi aux différents climats.

La diversité des indices de confort humain nous laisse confus quant à leur utilisation. Chaque indice possède ses avantages et ses inconvénients. Il est donc difficile de dire si l'un est meilleur que l'autre. C'est pour cette raison que Matzarakis et al. (2014) recommandent l'utilisation de plus d'un.

1-3-1-f- Subjectivité du confort thermique

Le confort thermique extérieur est non seulement le résultat d'une réponse physiologique aux paramètres microclimatiques fortement variables mais également d'une adaptation psychologique et culturelle.

Les variables psychologiques peuvent prendre en compte jusqu'à plus de 50% de l'évaluation globale de confort (Nikolopoulou et Steemers, 2003 ; Chen et N G, 2012).

L'adaptation est définie en tant que diminution progressive de la réponse de l'organisme à une exposition répétée à un stimulus. Dans le contexte du confort thermique, ceci peut comporter tous les processus d'amélioration que l'individu fait intervenir pour s'ajuster à ses conditions environnementales.

L'adaptation peut être divisée en trois différentes catégories:

✚ physique (habillement, position, consommation, parasol....) (cf. Fig. I. 24) ;

- ✚ physiologique (hypertrophie des glandes sudoripares pour s'acclimater à la chaleur et l'hypertrophie de la glande thyroïdienne pour s'acclimater au froid (Den, 2013) ;
- ✚ psychologique : détaillés dans les travaux de Nikolopoulou et Steemers (2003) et Höppe (2002) que nous résumons ainsi :
- ✚ **L'aspect naturel** : le caractère naturel d'un environnement peut amener l'individu à tolérer les grands changements de l'environnement physique.
- ✚ **L'attente** : correspond à l'état dans lequel selon l'individu devrait se trouver l'environnement plutôt qu'à l'état dans lequel il est effectivement.

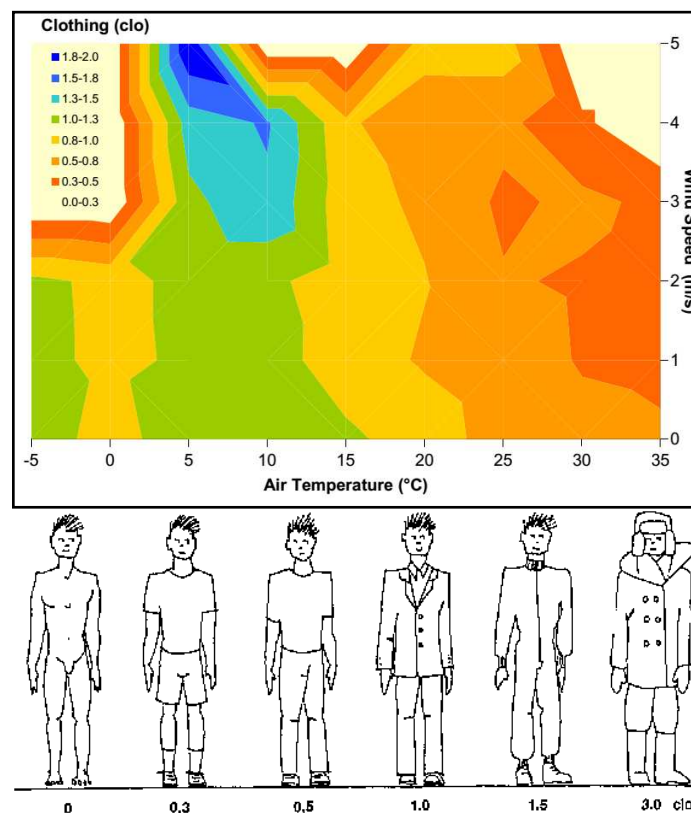


Fig. I. 24 : Adaptation des vêtements selon la vitesse de vent et la température de l'air (Nikolopoulou. M, 2008)

- ✚ **L'expérience** : elle influe directement sur le facteur de l'attente et peut être à court terme ou à long terme.
- ✚ **Le temps d'exposition** : L'exposition à une situation d'inconfort n'est pas perçue négativement si l'individu s'attend à ce qu'elle soit de courte durée.
- ✚ **Le sentiment de contrôle** : une personne ayant un haut niveau de contrôle sur une source d'inconfort tolère les grandes variations et en est moins gênée.
- ✚ **La stimulation environnementale** : un environnement variable, plutôt que fixe, est

préférable. En effet, un environnement ayant un aspect statique devient très vite intolérable (Hawkes, 1982 cité par Nikolopoulou et Steemers, 2003).

✚ **La culture** prend aussi une part dans l'évaluation subjective des espaces urbains en dépit des conditions thermiques semblables, l'évaluation du confort thermique avec les modèles physiologiques d'équilibre thermique dans les espaces extérieurs peut ne pas être applicable dans différentes zones climatiques et culturelles sans modifications (Thorsson et Knez, 2006).

D'autre part, du point de vue temporel, Fanger a étudié l'impact des changements de température sur le confort thermique en chambre climatique. Son étude démontre que la vitesse d'adaptation à un nouvel environnement est différente selon que le changement va dans la direction d'un environnement plus neutre ou plus extrême.

Pour un changement qui s'éloigne de la condition de confort (neutralité), un long temps d'adaptation (au moins 20 minutes) est nécessaire pour arriver à une condition d'équilibre. Par contre, un changement allant vers le confort offre un degré d'acceptabilité atteint en cinq minutes. Notons en outre que le corps humain s'adapte plus facilement à un environnement trop chaud que trop froid. La sensibilité humaine est donc plus grande au froid qu'à la chaleur (Nikolopoulou et Lykoudis, 2005).

I- 3-2- Le confort aéraulique (Effets mécaniques)

Confronté aux implantations physiques de la ville, le vent, avec son caractère fluctuant et instable génère des anomalies aérauliques autour des constructions. Ceci oblige le piéton à résister à son écoulement fort afin de retrouver l'équilibre physique et physiologique. Pour un seuil de gêne franchi, "l'obstacle humain" est sollicité et manifeste une acceptabilité ou non acceptabilité de la nuisance aérodynamique.

Le vent était largement évoqué dans les enquêtes menées sur la fréquentation des lieux, des placettes, des jardins publics et différents types d'espace communs. Boussoualim (2002), évoque le vent en première position, comme un facteur de la gêne climatique limitant l'usage de l'espace. Elle cite : "*37,5 % ont déclaré que le vent est le premier élément gênant et limitant leurs activités divertissantes, surtout place des Marronniers, 25 (24%) personnes ont évoqué le vent fort comme élément gênant*".

Des vitesses de vent supérieures à 4 m/s accentuent les échanges convectifs et perturbent tous les autres modes de transfert dans l'atmosphère. Le confort de type thermique est dans ce cas difficile à appréhender. Il est masqué par une forme d'inconfort dite «aérodynamique» induite par des vents très violents (Sacré, 1983).

Face aux intempéries aérauliques, « l'acclimatation » des usagers se manifeste par une réaction mécanique du corps. Cette force exercée pour se maintenir à l'équilibre dans le déplacement, définit l'état de confort ou d'inconfort aéraulique (Ruros, 2004).

Considérant ces effets mécaniques, selon les recommandations pour les piétons établies par l'échelle de Beaufort et Penwarden (Blocken et al., 2003) (cf. **Tab. A-5, annexe A**), il est possible de diviser les vitesses de vent urbaines en trois catégories :

1- la vitesse de vent acceptable qui est moins de 5.4 m/s:

Feuilles et petits rameaux en mouvement permanent, le vent déploie pleinement les drapeaux, les cheveux sont décoiffés, les vêtements amples battent au vent.

2- vitesse de vent désagréable plus de 7.5 m/s :

Il est difficile de marcher droit, les parapluies sont difficiles à utiliser, le vent siffle dans les oreilles

3- vitesse de vent dangereuse au delà de 14,6 m/s :

Progression pédestre très difficile et dangereuse avec risque d'être projeté par terre.

L'environnement éolien sera acceptable pour des personnes assises à l'extérieur pour de courtes périodes si la vitesse moyenne du vent n'excède pas 5 m/s plus de 6% du temps. Si ces personnes restent assises pour de plus longues périodes, les 5 m/s ne doivent pas être dépassés plus de 0.1% du temps.

Le **tableau I.7** peut être utilisé pour une température de l'air supérieure à 10°C.

Tab.I.7 : Caractéristiques du critère 5 m/s. A= Acceptable, I= Inconfortable, TI= Très inconfortable / Dangereux (Kofoed et Gaardsted, 2004).

Activité	Emplacement	Caractéristiques		
		A	I	TI
Marche rapide	Chaussée, chemins	43%	50%	53%
Déambuler	Parcs, rues marchandes	23%	34%	53%
Debout /assis pour une courte période	Parcs, espaces urbains	6%	15%	53%
assis pour une longue période	Restaurants extérieurs	0.1%	3%	53%

Penwarden et al. (1975) ont mis en relation la température de l'air avec la vitesse du vent. Ils ont indiqué, qu'un sujet qui passe d'une zone ensoleillée où le vent coule à 0.5 m/s à une zone à l'ombre dans laquelle le vent circule à une vitesse de 5 m/s, doit ressentir une diminution de la charge thermique équivalente à une baisse de température de 13°C.

La **figure I.25** illustre la correspondance de la vitesse et de la température de l'air pour un type de vêtement défini. Elle indique que le confort physiologique d'un individu à l'ombre pour une même vitesse d'air et un même isolement vestimentaire, nécessite des températures légèrement supérieures d'au moins 2-3°C comparé à un individu exposé au soleil. En outre, dans des conditions d'hiver, le confort peut être défini à une température de -4°C, alors qu'à l'ombre la température pour le confort ne doit pas être en dessous de 4°C.

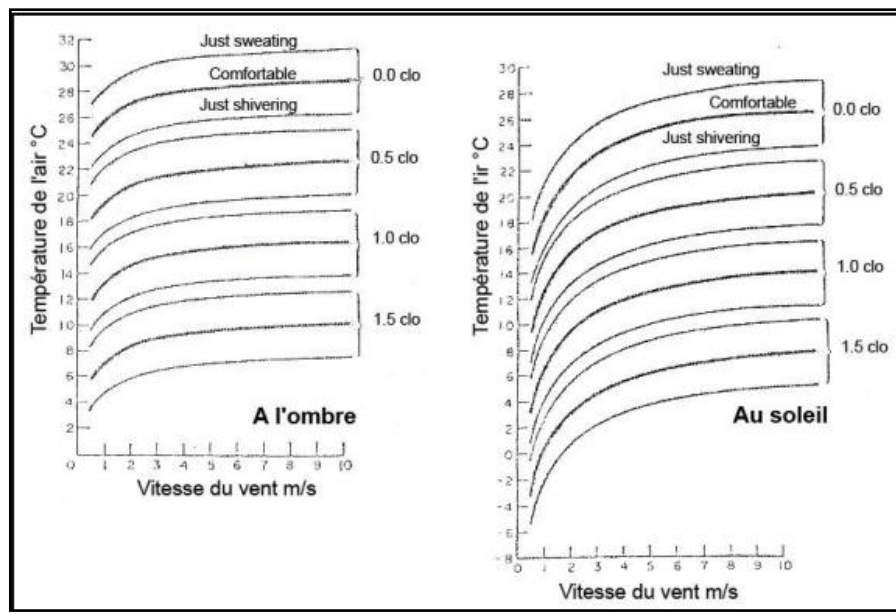


Fig. I.25 : Conditions de confort pour un piéton à l'ombre et au soleil en fonction du vent et de la température de l'air d'après Penwarden et al. 1975. (Sacré, 1983).

I-3-3- Impact des facteurs microclimatiques sur la fréquentation des places

Dans le contexte d'aide à la conception et à l'aménagement des espaces urbains, plusieurs recherches ont mis en évidence les effets des facteurs microclimatiques sur le taux de fréquentation et le comportement des usagers des espaces extérieurs notamment les places (Li, 1994 ; Weterberg, 1994 ; Boussoulim, 2002 ; Zacharias, 2001,2004 ; Eliasson et al., 2007) en avançant, entre autres, l'argument qu'un aménagement d'un espace urbain est considéré comme réussi si cet espace est agréablement perçu et fortement fréquenté.

Dans les recherches de Boussoulim (2002), sur l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur, en hiver, le soleil est perçu le plus souvent comme l'élément climatique qui contribue le plus à rendre le lieu agréable.

Le nombre de personnes fréquentant les places en été double pratiquement en hiver. l'auteur a également constaté que les stations de moyenne ou de longue durée dans l'espaces s'effectuent en fonction des éléments structurant la place (tronc d'arbre, bord du bassin, vitrine, muret, tableau d'affichage...) et du mobilier urbain (bancs). Elle a observé qu'en été, aucune station de moyenne ou de longue durée n'a été effectuée dans un endroit ensoleillé et que les endroits où les stations de longues durées ont été effectuées sont ceux où il fait plus frais et/ où il y a de l'ombre sur place.

Zacharias et al. (2001, 2004) ont observé un comportement similaire des usagers des espaces urbains face aux paramètres microclimatiques dans deux villes où la température, l'humidité et l'ensoleillement sont sensiblement différents (San Francisco, Méditerranéen froid ; Montréal, tempéré froid). Ces auteurs ont conclu l'invariabilité des réponses physiologiques humaines aux régimes microclimatiques.

Le facteur " température" a un effet prépondérant sur le taux de fréquentation et sur la nature des activités piétonnes (position assise, debout, exercices...); leurs études montrent notamment que l'accroissement de la température combinée à la présence d'ensoleillement peut amener une augmentation sensible du taux de fréquentation (cf.Fig. 26, 27).

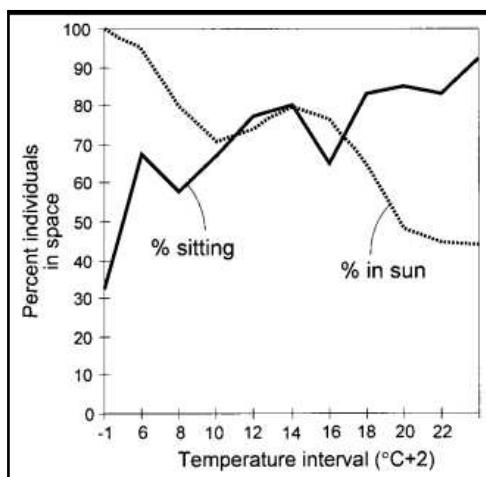


Fig. I.26 : Pourcentage des usagers assis en fonction de la température de l'air et du soleil dans tous les espaces publics

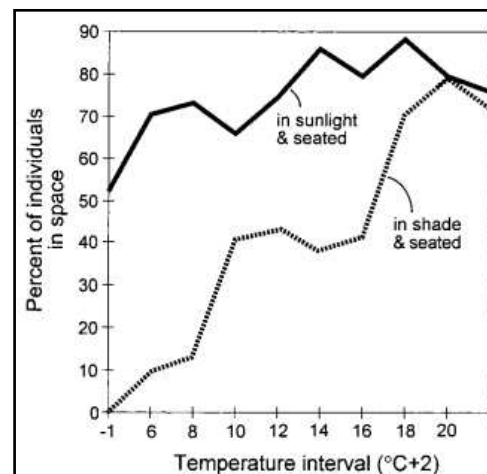


Fig. I.27 : Pourcentage des usagers assis au soleil en fonction de la température de l'air (aussi pour ceux à l'ombre).

Source : Zacharias. J et al.,2001

Cependant la présence du vent est un facteur inhibiteur à l'usage de ces espaces. Ces mêmes conclusions ont été tirées par Westerberg (1994, 2004), Li (1994), Boussoulim (2002) et Eliasson et al. (2007).

Zacharias et al. (2004) ont observé que le nombre d'utilisateurs de la place s'élève à fur et à mesure que cette dernière s'éclaire par le soleil (**cf.Fig.I.28**), alors que pratiquement tous les usagers se retrouvent dans des zones ensoleillées lorsque la proportion de la place au soleil est aussi basse que 0,30 (15 personnes par 9 m²). L'auteur conclut qu'il y a une limite à l'encombrement dans les conditions les plus favorables (sous le soleil), mais les utilisateurs vont graviter ces espaces lorsqu'ils sont disponibles. La préférence pour le soleil dans l'espace public a fait que les zones ensoleillées ont 4,5 fois plus de personnes par unité de surface que les zones à l'ombre sur l'ensemble de l'échantillon.

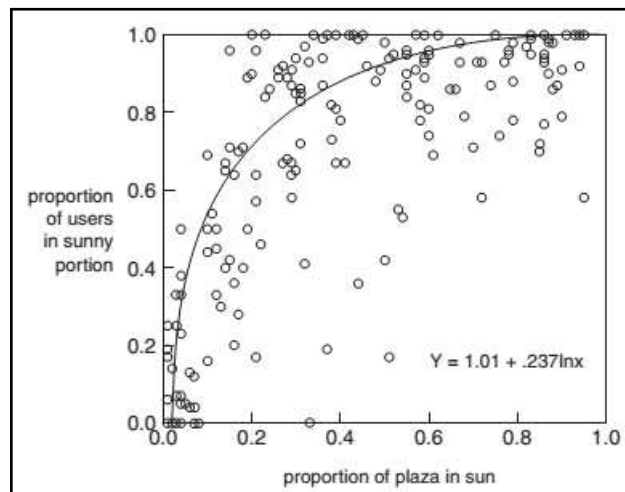


Fig.I.28 : Proportion d'utilisateurs de la place sous le soleil en fonction de la proportion de la place au soleil (Zacharias. J et al.,2004).

Westerberg (1994) et Zacharias et al. (2001) ayant mis en évidence des valeurs seuil de température à partir desquelles les piétons se déplacent de zones ensoleillées vers des zones ombragées ou moins ensoleillées Ils sont parvenus également à identifier une valeur seuil de la température équivalente à 20°C. A partir de ce seuil, en présence des rayons solaires, les gens ont plutôt tendance à rechercher les zones ombrées ou du moins des zones moins ensoleillées.

Notons que les résultats présentés ci-dessus, basés sur des données empiriques limitées à quelques sites, sont à considérer avec précaution. En effet, les corrélations identifiées entre les facteurs microclimatiques et les comportements, ainsi que les

différents seuils de température ou de vitesse du vent, sont étroitement liés à l'appartenance socioculturelle des usagers et aux lieux dans lesquels se sont déroulées les études.

De tels résultats ne peuvent se généraliser. Un seuil de température au soleil équivalent à 20°C à partir duquel les gens commencent à rechercher les zones ombrées est peut être un seuil valable à Montréal ou à Stockholm, mais il serait de loin plus élevé dans des villes des basses ou moyennes latitudes.

D'autres parts, Eliasson et al. (2007) ont mis en évidence à travers leur étude l'interaction entre les facteurs microclimatiques et les aspects psychologiques de l'individu. L'évaluation de l'environnement par les usagers diffère ainsi d'un site à un autre. Le vent est, par exemple, perçu positivement dans un site urbain en front de mer et négativement dans le site entouré de bâtiments. Ce qui va dans le sens de ce qu'avancent Nikolopoulou et Steemers (2003) dans leur étude sur l'adaptation psychologique, qui stipule que le caractère naturel de l'environnement, en l'occurrence du vent fort en bord de mer, est plus apprécié que des courants d'air dus à la disposition des bâtiments.

Ces différents auteurs (Katzschner 2003, 2004; Nikolopoulou et Steemers 2003) ont également montré l'intérêt urbanistique de développer différents microclimats afin que les usagers puissent choisir le plus adapté au contexte ; par ex. ambiance chaude en période normale, ambiance ombrée et/ou ventilée en période chaude. Cependant, la diversité des microclimats nous paraît actuellement difficilement appréhendable.

Conclusion

L'expansion de l'urbanisation a des graves retombés sur l'environnement. La ville est un milieu « fabriqué » qui évolue au sein d'un environnement « naturel » avec lequel elle interagit en permanence. Le climat fait partie intégrante de cet environnement.

Le climat agit sur la ville par l'ensoleillement et la nébulosité, l'humidité et les courants aériens. Ces facteurs ont une influence sur la température des habitations, sur les ambiances des voies publiques, des terrains et des espaces verts, et d'une manière générale sur les conditions d'habitabilité des agglomérations.

D'une autre part une ville une fois construite, le climat n'est plus celui qui régnait auparavant. Les matériaux et les formes en ville influent sur la relation entre la couche atmosphérique et le sol. En effet, l'albédo plus faible qu'en milieu rural, la capacité

calorifique des matériaux, le piégeage radiatif dû à l'agencement des bâtiments, ou encore l'imperméabilisation des sols pour ne citer que ceux-là, modifient les caractéristiques environnementales de la ville. Ceci est encore accentué par l'activité urbaine et ses rejets.

L'élément le plus facilement observable est la température de l'air d'où le concept d'îlot de chaleur urbain. Cependant, l'augmentation de la température est loin d'être l'unique facteur de ce climat particulier. L'humidité a diminué et le régime des vents est modifié. Ces modifications ont des conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments, le confort thermique extérieur et la santé des habitants.

La connaissance du confort thermique des humains dans les espaces extérieurs joue un rôle important dans la santé et les activités de leurs usagers.

Les paramètres climatiques en interaction avec les composants du paysage urbain jouent un rôle prépondérant dans la détermination du bilan thermique de l'individu.

Par temps calme, la température moyenne radiante joue un rôle plus important que la température de l'air. L'augmentation de la vitesse d'air réduit la charge thermique globale et diminue les températures. Toutefois à un certain seuil, cette vitesse freine l'usage de l'espace. Ceci oblige à tenir compte de l'intensité des fluctuations du vent, en plus des variations du rayonnement. Ces deux paramètres dépendent de la structure morphologique du tissu urbain et ses espaces ouverts.

En dépit des efforts fournis depuis le dernier siècle pour déterminer des indices d'évaluation du confort thermique, les résultats ne peuvent clarifier complètement l'impact de l'environnement urbain sur les utilisateurs, car il est sujet à la subjectivité. Cette subjectivité est sujette à l'influence physiologique, psychologique et culturelle différente entre individus et pays.

La diversité des ambiances thermiques au sein d'un même espace urbain est donc un paramètre non négligeable pour toute planification urbaine. Elle assure sa pérennité et rend sa fréquentation plus agréable.

De par leur action sur le rayonnement solaire et radiatif, l'humidité ainsi que le régime du vent, différentes stratégies peuvent être garantes de cette diversité, du confort thermique humain et à une plus grande échelle un moyen d'adapter l'organisme de la ville aux changements climatiques.

Les chapitres suivants mettront l'accent sur ces différentes stratégies dont la requalification des aménagements urbains et la modification des formes urbaines.

Chapitre II :

Stratégies d'amélioration de l'ambiance thermique urbaine

"La place plantée de platanes avec sa fontaine correspond à un modèle d'espace extérieur urbain présentant des aptitudes microclimatiques favorables au confort dans la région méditerranéenne. En effet, où l'on se trouve, la voûte formée par le feuillage protège des rayons chauds et éblouissants, par ailleurs elle maintient la fraîcheur dégagée par la présence d'eau."

J.L.Izard, 1979.

Introduction

Les facteurs d'ambiance thermique dans les espaces urbains résultent d'une interaction complexe entre les phénomènes physiques et la nature de la ville.

De nos jours, cette interaction devient hostile à la santé humaine et aux performances énergétiques de l'habitat.

Le confort thermique humain est un des facteurs d'influence sur les activités en plein air dans les rues, places, cours, espaces de jeux, parcs urbains,.....etc

La chaleur ou le froid intense due à l'effet combiné de la température de l'air, la température des surfaces environnantes, la vitesse du vent, le niveau d'humidité peuvent décourager l'utilisation des espaces extérieurs et altérer les conditions de confort dans les bâtiments.

Les niveaux de la température de l'air ambiante, rayonnement et vitesse de vent dans un endroit spécifique peuvent être modifiés par des détails de conception des espaces extérieurs.

A travers ce chapitre, on tentera de mettre le jour sur ces différents éléments de correction du microclimat urbain, notamment de rafraîchissement, de définir les détails de leurs dispositions recueillis depuis une recherches scientifiques assez abondantes afin de tirer profit au maximum de leurs impacts positifs.

II- Stratégies d'amélioration de confort dans les espaces urbains

Il existe différentes formes et échelles de mise en œuvre de stratégies pour améliorer l'ambiance thermique urbaine. Ces mesures sont nombreuses et concernent divers domaines professionnels, dont l'urbanisme, l'architecture, la gestion des

ressources naturelles et les transports. Elles ont une incidence positive tant sur le microclimat que sur le climat global.

En plus de favoriser la fraîcheur dans les milieux urbains, ces mesures comportent d'autres bénéfices, notamment la réduction de la demande en énergie ainsi que la diminution de la pollution.

Même s'il est évident qu'une intervention en synergie sur tous les plans est nécessaire pour obtenir les meilleurs effets, on se concentrera sur le cadre d'intervention des architectes et urbanistes pour lesquels se dessine un nouveau champ d'intervention interdisciplinaire (Gago et al., 2013).

II - 1- Les matériaux

Le rôle des matériaux de construction est impératif pour la réduction des gains thermiques et des surchauffes liés principalement à leurs comportements vis à vis le rayonnement solaire déterminés par leurs caractéristiques optiques (albédo) et thermiques (émissivité).

La réduction de la température de surface réduit également l'intensité du rayonnement en grande longueur d'onde. Les températures ambiantes de l'air seraient inférieures en raison du flux de chaleur convecteur réduit en provenance des surfaces plus fraîches (**cf. chap. I**).

Une telle réduction des températures peut avoir des impacts significatifs sur la consommation d'énergie de refroidissement dans les secteurs urbains, un fait d'importance particulière dans les villes à climat chaud.

Des simulations météorologiques unidimensionnelles effectuées par H. Taha et al. (1988) ont prouvé que pendant les après-midi des jours d'été, les températures de l'air intérieures peuvent être abaissées d'environ 4°C en augmentant l'albédo extérieur de 0.25 à 0.40 dans un climat chaud typique de mi-latitude.

D'autres simulations tridimensionnelles de l'effet de l'augmentation de l'albédo à l'échelle méso dans le bassin de Los Angeles effectuées par le même chercheur en ont montré d'importants effets semblables sur la température de l'air en été. Une diminution moyenne de 2°C et jusqu'à 4°C peut être possible en augmentant l'albédo de 0.13 dans le secteur urbanisé du bassin. La diminution de la température de cette grandeur a pu réduire la charge de l'électricité de la climatisation de 10% et le smog (concentrations en ozone) d'environ 20% pendant un jour d'été chaud (Taha et al., 1996).

Ainsi, la sensibilité de la température de l'air au changement de l'albédo a été d'intérêt majeur pour les recherches visant à réduire l'effet de l'ICU.

M. Pomerantz et al. (2000) ont pu augmenter l'albédo des surfaces pavées ou revêtues comme les routes, les cours de récréation et les parkings par l'ajout d'une couche mince de granulats clairement colorés sur les surfaces d'asphalte et leur donner ainsi une couleur plus claire et diminuer ainsi leur absorption de la chaleur. Le remplacement de l'asphalte par du béton permet aussi une légère augmentation de l'albédo.

L. Doulos et al. (2004) ont déterminé une gamme de matériaux dits "cool" (froid) dont l'émissivité est d'environ 0.9 et cela après avoir varié les caractéristiques physiques à savoir la couleur, la texture extérieure et les matériaux de composition affectant l'albédo des carreaux de pavage. Les "matériaux froids" sont caractérisés par une couleur claire, une texture lisse et plate et composés de marbre, ou mosaïque ou de la pierre. Par opposition, les "matériaux chauds" pourraient être définis par ceux de surface rugueuse, de couleur foncée et composés de cailloux, pavement de pierre ou d'asphalte

Ils réduisent la quantité du rayonnement solaire absorbée par les enveloppes des bâtiments et les structures urbaines et libèrent rapidement la chaleur absorbée par ces surfaces accélérant ainsi le refroidissement des espaces.

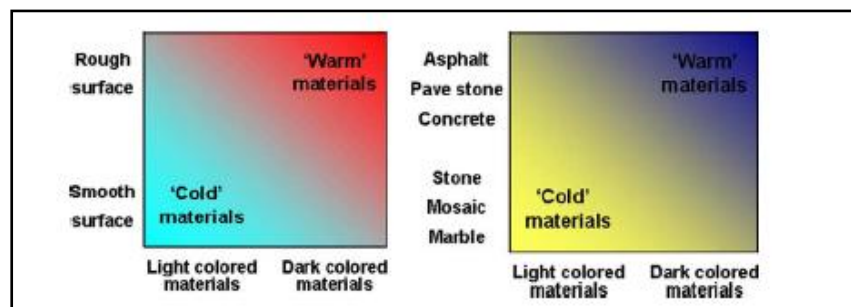


Fig. II-1: Définition des matériaux chauds et des matériaux froids.
(Doulos. L et al., 2004)

A partir de mesures prises l'été à Athènes sur 10 enduits différents, Synnefa et al. (2007) ont démontré que la température à la surface des enduits classiques était de 10 °C supérieurs à celle des enduits de type "cool" de la même couleur.

A La Rochelle, M. Doya (2010) a relevé des écarts de température compris entre 2 et 8 °C pendant 10 à 20 % du temps d'exposition pour des peintures de type "cool" appliquées sur des façades.

Cependant, le fait que les surfaces de couleurs claires peuvent augmenter la quantité du rayonnement réfléchi atteignant un corps exposé, soulève des questions sur la convenance de leur usage dans les espaces ouverts, particulièrement concernant les états de confort des piétons. Les études ont indiqué que les températures moyennes radiantes les plus élevées correspondent aux secteurs aux surfaces à albédo élevé, comparées aux surfaces moins réfléchissantes (Y. Shiraishi et al., 2005; H. Andrade et al., 2003).

Les recherches d'A. Chatzidimitriou et al. (2006, 2015) ont révélé aussi l'importance de l'ombrage des surfaces pavées. Les surfaces ombragées (herbe et carreaux de béton) ont des températures surfaciques inférieures de 21% que la température de l'air au dessus des surfaces à découvert et sont plus froides de 40% que les mêmes surfaces exposées aux rayons solaires.

La différence de température entre les différentes surfaces ombrées est minime et sous différentes couvertures pour la même surface est négligeable (cf. Fig. II. 2 - 4).



Fig.II-2 : Différentes couvertures utilisées pour l'ombrage.
(Chatzidimitriou.A.et al., 2006)

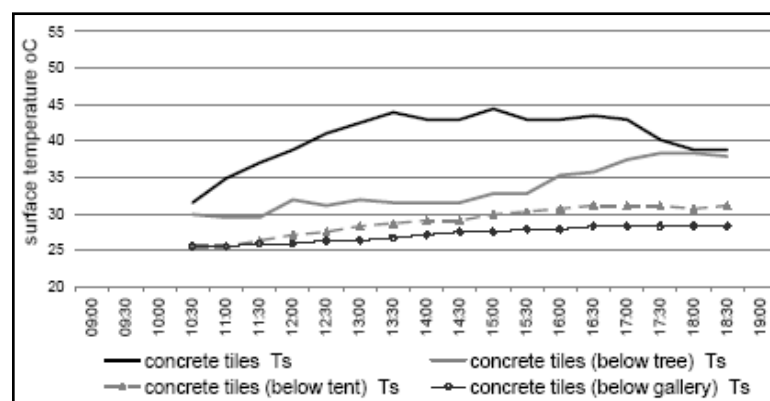


Fig.II-3:Températures surfaciques des carreaux de béton sous différentes couvertures utilisées pour l'ombrage (Chatzidimitriou.A et al.,2006).

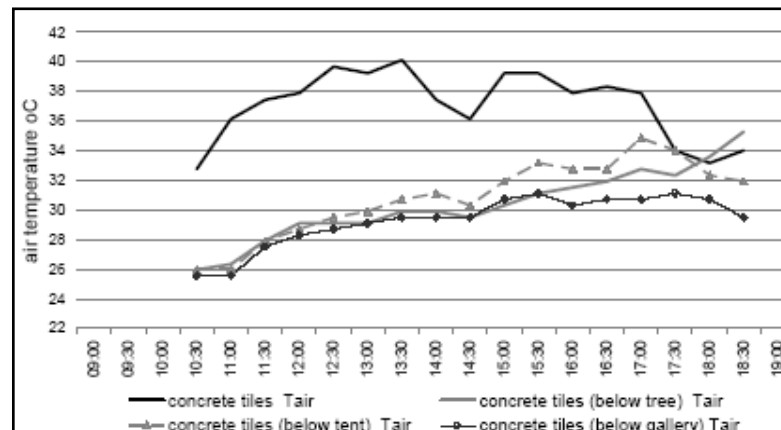


Fig.II-4: Températures de l'air des carreaux de béton sous différentes couvertures utilisées pour l'ombrage (Chatzidimitriou.A et al., 2006).

Ceci met en évidence l'importance de la réduction de l'effet négatif des matériaux de surface sur le microclimat par des dispositifs d'ombrage.

II-2- L'eau

L'eau joue un rôle essentiel dans la définition du microclimat. Elle intervient dans le bilan radiatif par absorption du rayonnement solaire et du rayonnement émis par la surface terrestre et dans le bilan thermique par échanges de chaleur liés aux changements d'état de l'eau (K. Laval, 2001).

A l'inverse des sols qui s'échauffent et restituent la chaleur rapidement, l'eau emmagasine et rend la chaleur lentement. Les apports énergétiques solaires qui arrivent sur la surface de l'eau, sont faiblement réfléchis puisque le coefficient de réflexion n'est que de 3% pour les heures du rayonnement maximal. Elle absorbe pratiquement 80% du rayonnement solaire selon la profondeur du bassin. (Sanchez de la Flor et Dominguez , 2004).

Par sa masse thermique élevée proportionnelle à la profondeur du bassin, l'eau atténue les fluctuations des températures en absorbant la chaleur de l'air pour passer de l'état liquide à l'état gazeux (Sánchez de la Flor et Dominguez , 2004).

Il est à noter que pour évaporer une lame d'eau d'1 mm d'épaisseur sur une surface de 1m², il faut 2.45 Mj.m⁻²(ou 590kcal.m⁻²).

La sensation de bien être éprouvée auprès des bassins et des fontaines est la conjugaison de deux facteurs liés à l'évaporation : refroidissement de l'atmosphère et augmentation de l'humidité.

Des mesures ont été effectuées par simulation pour mettre en évidence cette réalité. Les résultats prouvent, comme illustré par la **figure II-5** qu'il y a une grande différence entre la température de surface de l'eau et celle de l'asphalte. Cette différence est de 4°C à 6h et 25°C à 13h quand la valeur maximum de la température de surface est enregistrée, c'est à dire 33.2°C pour la surface de l'eau et 58.3°C pour la surface d'asphalte. Cette différence est due à l'évaporation de l'eau aussi bien qu'en raison des propriétés des matériaux des deux surfaces, eau et asphalte (M. Robitu et al., 2003).

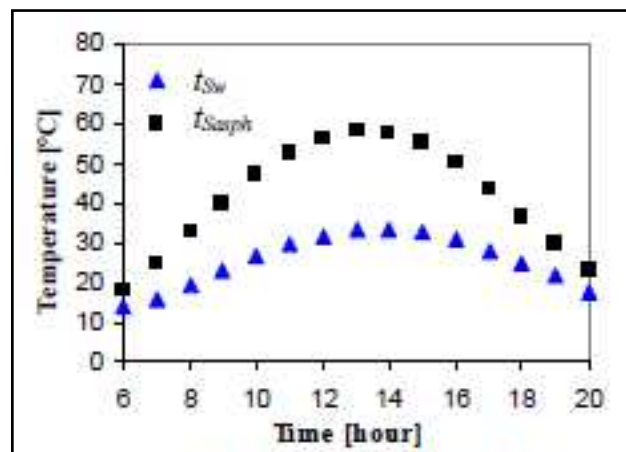


Fig. II - 5 : Températures surfaciques de l'eau et de l'asphalte.
(Robitu. M. et al., 2003)

Les mesures de température de l'air effectuées par N. Nishimura et al. (1998) du côté sous le vent d'un jet d'eau localisé dans un parc de la ville d'Osaka (Japan) ont enregistré une réduction approximativement de 3 K durant la période 14h- 15h, et cet effet a été ressenti jusqu'à une distance d'approximativement 35m.

Sun et Chen (2012) ont quant à eux évalué la capacité de plans d'eau d'atténuer un ICU en termes d'intensité et d'efficacité. Cent quatre-vingt-dix-sept plans d'eau de la ville de Pékin ont ainsi été examinés selon les 4 critères suivants : surface, géométrie, distance par rapport au centre de la ville et densité bâtie environnante.

Les résultats soulignent que la surface des plans d'eau est responsable des plus grandes variations d'intensité de l'ICU, mais qu'elle n'est pas déterminante de leur efficacité. Ainsi à surface équivalente, la multiplication de petits plans d'eau disséminés dans la ville procurerait un rafraîchissement supérieur à celui produit par quelques plans d'eau majeurs. Les résultats ont aussi démontré l'importance de la densité bâtie au pourtour des plans d'eau, car certains de forme et de surface similaires, n'ont pas refroidi l'air ambiant de la même manière.

Y. Toparlar et al. (2013) ont comparé par simulation pour une journée d'été caniculaire (16 Juillet 2003) à 14h à Rotterdam (Holland) l'effet du refroidissement évaporatif de trois bassins d'eau dont deux sont situés dans des cours urbaines aux dimensions : $30 \times 25 \times 0.3 \text{ m}^3$ pour le grand bassin et $25 \times 20 \times 0.3 \text{ m}^3$ pour le petit bassin et un troisième de dimensions $25 \times 25 \times 0.3 \text{ m}^3$ situé sur un toit (cf. Fig. II. 6).

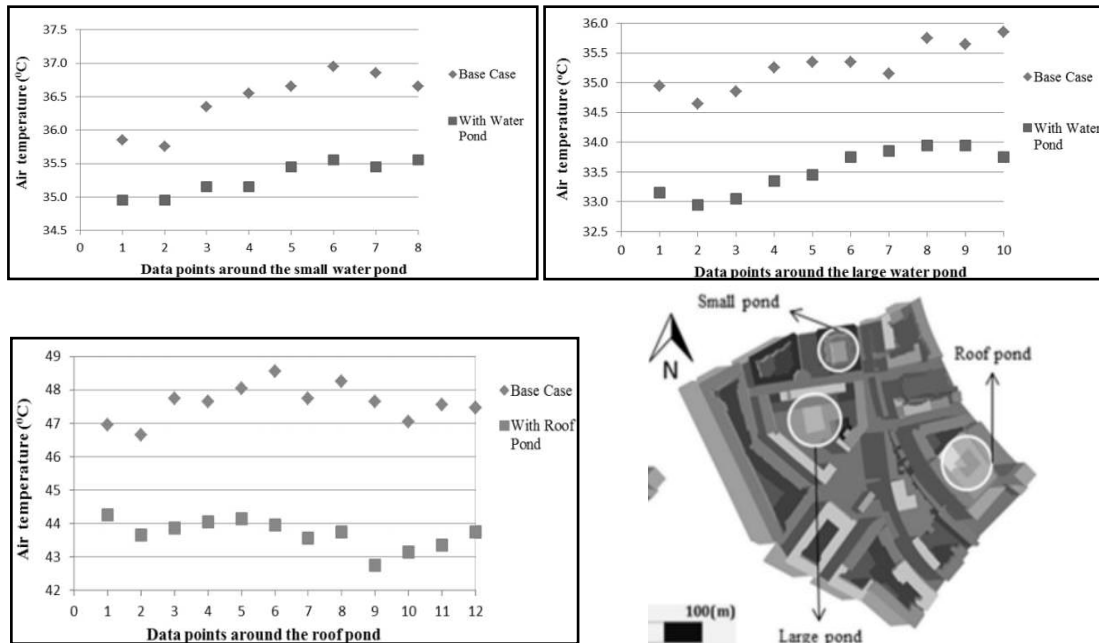


Fig. II- 6 : Effet des bassins d'eau sur le refroidissement de l'air.
(Toparlar. Y et al., 2013)

Le nombre de points de repères autour des bassins d'eau dépend de la taille de la cours correspondantes. Par conséquent, les résultats de simulation sont enregistrés à une hauteur de 1.8 m pour 10 points autour du grand bassin et 8 points autour du petit et à 0.5 m pour 12 points autour du bassin du toit. La température de l'air avec et sans bassin d'eau est représentée sur la (cf. Fig. II. 6).

L'étude a eu pour conclusion que l'eau des bassins peut diminuer la température de l'air de 0.9°C à 2.0°C (à $z = 1.8 \text{ m}$) à l'intérieur des cours et de 2.7°C à 3.9°C sur le toit (à 0.5 m) ; que l'efficacité des bassins d'eau est intimement liée à leurs tailles ; et que l'effet de refroidissement des bassins d'eau est plus prononcé pour des mesures collectées à des hauteurs inférieures.

Dans les villes, les surfaces imperméabilisées sont importantes. Il est devenu indispensable de favoriser l'évaporation des eaux de pluie et leur infiltration naturelle. Plusieurs mesures facilement et rapidement applicables ont déjà prouvées leur efficacité. On peut citer :

- La substitution des aires imperméables par un revêtement qui permet l'infiltration de l'eau dans le sol par exemple du gazon stabilisé ou du gazon sur dalles perforées béton, asphalte, céramique, et unités de plastique ou de béton interconnectées remplies de gravier.



Fig.II.7 : Stratégie de perméabilisation des surfaces urbaines.
(Rullier. F, 2012)

Le potentiel de rafraîchissement des pavés végétalisés est corroboré par de nombreuses études; la température mesurée à leur surface étant bien inférieure à tout autre matériau de revêtement utilisé pour les chaussées (Takebayashi et Moriyama 2012; Chatzidimitriou. A et al. , 2006, 2015).

A.Chatzidimitriou et al. (2006) ont observé l'effet de la porosité en comparant les températures de surface de la pierre et du marbre poreux. La pierre poreuse de couleur claire présente des températures surfaciques semblables à celles du marbre blanc qui a un albédo plus élevé et une surface plus lisse.

Les résultats ont indiqué une plus basse température des matériaux poreux attribuée aux taux élevés d'échange de l'eau entre la surface et le sol profond, qui augmente le refroidissement par évaporation (**cf.Fig.II-8**).

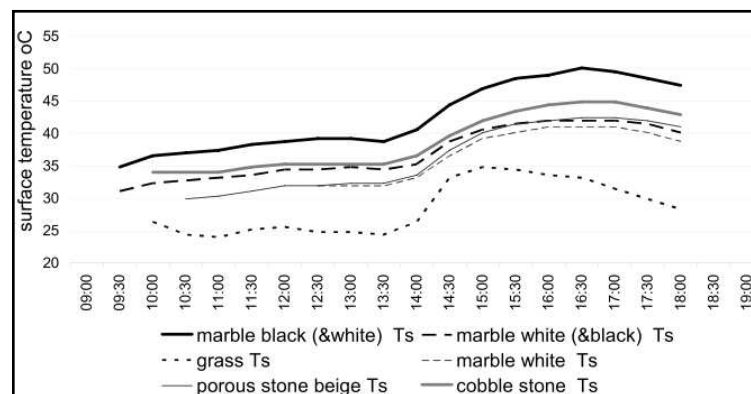


Fig.II-8: Températures de surface des couvertures au sol.
(Chatzidimitriou. A et al., 2006)

Hoyano et al. (2011) rapportent qu'une chaussée de béton perméable demeure plus fraîche de 4 °C comparativement à une chaussée de béton ordinaire.

- La conduite des eaux de ruissellement dans des tranchées drainantes, des fossés absorbants engazonnés ou des petites marres plantées, (cf. **Fig. II.8**).



Fig .II.8 : L'eau ruisselant en surface dans les espaces ouverts augmente le flux latent ([http:// www.panoramio.com](http://www.panoramio.com)).

II - 3- La végétation :

La végétation, notamment l'arbre urbain, est probablement la composante de l'aménagement urbain à laquelle on prête le plus de qualité, car elle joue plusieurs rôles :

- ✚ crée un changement de texture et d'échelle, un contraste de couleurs et de formes par rapport aux bâtiments adjacents ;
- ✚ améliore la qualité de l'air par la production d'oxygène, l'absorption du CO₂, la filtration des particules en suspension et des poussières (Izard, 1979 ; G. Kuchelmeister et al, 1993/ Gauzin- Müller, 2001 ; Escobedo et Nowak, 2009; Escobedo et al., 2011; McPherson et al., 2011 ; Livesley et al., 2014) ;
- ✚ minimise les nuisances sonores (Heisler, 1977 ; Izard, 1979) ;
- ✚ réduit l'intensité lumineuse réfléchiée par le sol, considérée comme contrainte pour les yeux, et les différents objets. De plus, une couverture végétale assure une lumière diffuse, atténuant les effets d'éblouissement dus à la présence d'ombre et de soleil (M.A.Guyot ,1998) ;
- ✚ améliore la gestion des eaux grâce à la rétention de l'eau de pluie dans le sol et protège ces derniers de l'érosion par l'eau et le vent ;
- ✚ assure la protection de la faune en offrant abri à toute une faune terrestre et avienne ;

✚ offre des bienfaits pour la santé de la population, par la protection contre le rayonnement ultraviolet (UV), la réduction du stress dû à la chaleur (Chinsura et al., 2004; Rowntree et Nowak, 1991) .

✚ la fraîcheur apportée par la végétation peut être garante de la fréquentation de ces espaces par les citoyens. Ceci favorise le contact social ;

✚ améliore le microclimat et réduit la demande énergétique liée à la climatisation.

Plusieurs études font état de l'importance primordiale de la végétation pour réguler le climat urbain. (Heisler et al., 1994; Taha et al., 1996; Nikolopoulou et al., 2003 ; McPherson et Muchnick, 2005) ;

Elle est l'approche la plus efficace et la moins coûteuse pour l'atténuation et l'adaptation aux ICU sur toutes les échelles (Norton et al. 2015; Solecki et al. 2005). (cf.Fig. II.9).

Les modifications radiatives et thermiques du climat urbain engendrées par la végétation résultent de trois processus physiques :

➤ **l'évaporation** de l'eau retenue dans le sol et interceptée par le feuillage des plantes. Elle concerne toutes les surfaces naturelles et peut se produire de jour comme de nuit.

➤ **la transpiration des plantes (cf.fig.II.9)**, qui concerne tous les types de végétaux (pelouse, buissons, arbustes, arbres, façades et toitures végétalisées, etc..) mais se produit le jour.

Ces deux processus combinés, évapotranspiration sont à l'origine d'un effet oasis (Oke, 1987, Shashua-Bar and Hoffman, 2000 ; Taha, 1997a), par opposition à l'îlot de chaleur.

➤ **interception d'une partie du rayonnement solaire incident (cf.fig.II.9)**.

Les arbres peuvent avoir un effet certain sur chacun des facteurs climatiques, mais les plus importants sont leur influence sur le rayonnement solaire (CLO) et le rayonnement terrestre émis par des objets sur terre (GLO), elle crée ainsi des effets d'ombrage sur les surfaces artificielles qui limitent leur réchauffement.

L'effet d'ombrage apporté par la végétation cumulé avec le phénomène d'évapotranspiration joue un rôle très important dans l'atténuation des températures urbaines. Shashua-Bar et Hoffman (2000) attribuent 80% des effets du refroidissement des sites à l'ombrage des arbres. Ceci dit qu'on s'attend à une réduction de température de l'air entourant la végétation d'environ 5°C (Meerow et Black , 1991).

Dans les régions chaudes et humides, l'effet de rafraîchissement peut atteindre 3 à 6°C dans la journée, dans le cas d'arbres adultes (Musy, 2007).

Les expériences entreprises en Allemagne accentuent la différence dans la température entre les parcs et les secteurs urbains environnants pour être aussi hautes que 7°C (Dimoudi et Nikoloupoulou, 2003).

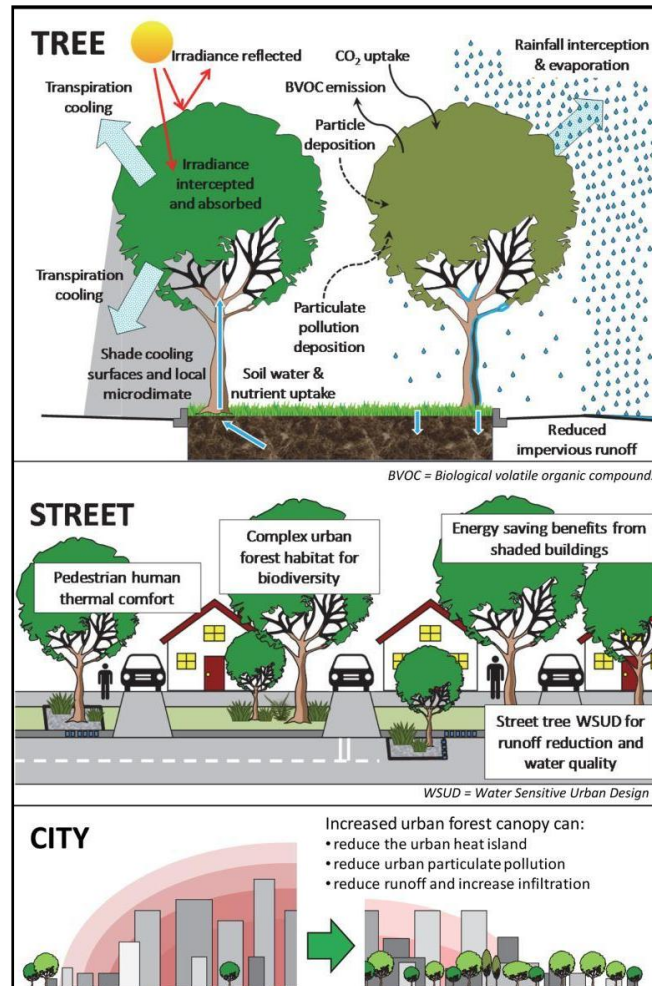


Fig. II.9 : Services et fonctions de l'arbre urbain à toutes les échelles.
(Livesley, S. J, 2016)

II -3- 1- Arbres et Evapotranspiration

La plante, afin d'absorber le CO₂ de l'atmosphère, doit maintenir ses stomates ouverts et de cette façon elle desserre l'eau sous forme de vapeur. Sachant qu'un gramme de vapeur demande 633 calories, une place bordée d'arbre de 100 m x100 m peut atteindre un niveau de transpiration de 50.000 litres par jour. Ainsi pour le changement d'état de l'eau approximativement 31.650.000 calories sont employées et prises de l'environnement extérieur (Bellomo, 1998) au lieu d'être absorbées par les bâtiments et restituées par la suite comme chaleur sensible qui réchauffe l'atmosphère. Un arbre mature peut perdre jusqu'à 450 litres d'eau par jour par évapotranspiration, ce

qui équivaut cinq climatiseurs fonctionnant 20 heures par jour (Johnston et Newton, 2004; Bolund et al., 1999).

Ballinas et Barradas (2016) révèlent par simulation que l'évapotranspiration des arbres d'alignement peut réduire la température de l'air urbain de 1°C pendant la journée à Mexico. Cependant, le nombre d'arbres nécessaires pour obtenir cette réduction dépend des espèces d'arbres, car par hectare 24 arbres de copalme d'Amérique produisent le même effet que 63 arbres matures d'Eucalyptus.

Pour une meilleure évapotranspiration, il faut prévoir une texture au sol végétale, sur pelouse ou à défaut sur plan d'eau.

Shahidan et al. (2012) rapportent que si une baisse de température de l'air de 2°C était observable sous l'ombre d'un couvert d'arbre, elle atteint 4°C si cet ombrage est associé à un sol humide perméable (surface engazonnée). Taha (1997a) accentue la différence pour les basses latitudes où elle peut atteindre 8°C à une hauteur de 50 centimètres pour un arbre planté sur de l'herbe que sur un sol nu.

Ces mêmes conclusions ont été trouvées par Shashua-Bar. L et al. (2011) où une nette amélioration du confort thermique humain est observée pour des arbres et tenture surmontant une pelouse (**cf.fig.II.10**).

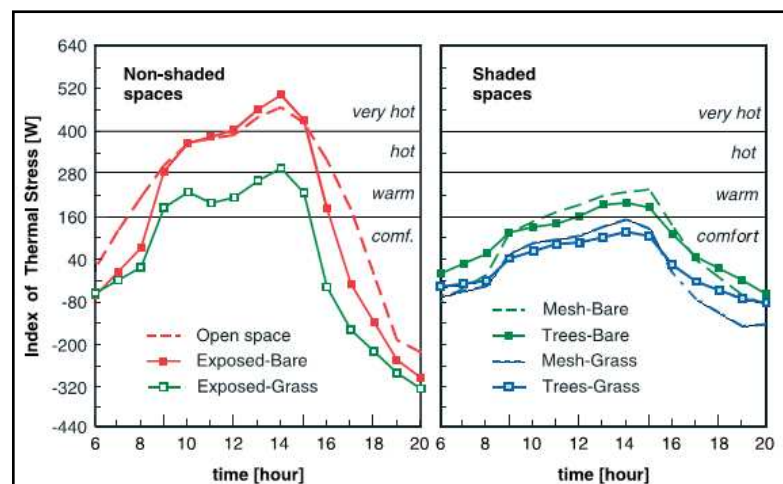


Fig. II.10 : Effet combiné de l'ombre (tenture ou arbre) sur pelouse sur le confort humain (Shashua-Bar. L et al., 2011).

La pelouse permet aux arbres de bénéficier du phénomène de rosée et d'éviter le stress thermique dû aux températures élevées des surfaces minérales. Plantés sur ces dernières, ils auront des températures de feuillages plus importantes que ceux qui sont plantés sur pelouse causant une perte d'eau élevée des feuilles ; au delà de 25 à 30°C

elles provoquent une fermeture des stomates prolongés et donc diminution de la transpiration.

En présence d'un excès d'eau, l'évaporation provenant de la végétation et des sols humides est très forte, cependant si l'irrigation est interrompue, cet effet finira par disparaître (Oke, 1987) de même si les vitesses de vent sont importantes (Dimoudi et Nikoloupoulou, 2003).

II -3- 2- Arbres et rayonnement solaire

L'ombre créée principalement par le feuillage et les branches indique une réduction du flux énergétique de la lumière visible et d'infrarouge solaire, réduisant ainsi la température radiante moyenne de l'environnement.

Cette réduction est en effet importante quand on considère que la combinaison de la charge thermique de l'air, le soleil et le sol peut devenir aussi grande qu'elle excède 10 fois la production métabolique de la chaleur d'un homme ((Kotzenn, 2003).

L'ombre créée par un arbre est sujette à nombre de variables telles que:

✚ L'albédo de surface de la feuille : les valeurs moyennes de l'albédo pour la végétation varient entre 0.20 et 0.30. Pour les espèces végétales qui se trouvent dans des climats secs et chauds, la valeur moyenne de l'albédo est généralement la plus élevée.

La valeur de ce paramètre varie en fonction de la saison en raison de la couleur des feuilles (lorsque les feuilles deviennent plus rouges, la valeur de l'albédo décroît).

✚ La transmissivité du rayonnement solaire : c'est l'effet de la végétation sur la transmission de la lumière du soleil. Sa valeur détermine l'effet de l'ombre sur les surfaces du bâtiment et sur le sol d'où l'importance de la densité foliaire (LAI) du houppier (dense ou clairsemé), changeant également de saison à saison. (cf. Fig. II.11)

✚ Les arbres dans des endroits abrités maintiennent leurs feuilles pour plus longtemps, qui peuvent être ou ne pas être souhaitables selon le climat et les conditions solaires d'accès (Hernandez, and Kenny, 2008).



Fig . II.11: Progression de la foliation Durant les différentes saisons.
(Guyot.M.A (1998)

✚ Le cycle de croissance (à feuilles persistantes ou plantes à feuilles caduques) ; pour garantir un refroidissement maximum ou de la chaleur selon le besoin, on doit choisir une plante avec un feuillage dense pendant l'été et une basse capacité d'ombrage en hiver. Il ne faut pas oublier que, même dépourvus de leurs feuilles, les arbres réduisent l'insolation effective de 20 à 40%.

Les arbres à feuilles persistantes seront utilisés dans les espaces qui sont à l'ombre à longueur d'année (Yezioro et al, 2006) ou comme écran aux vents d'hiver.

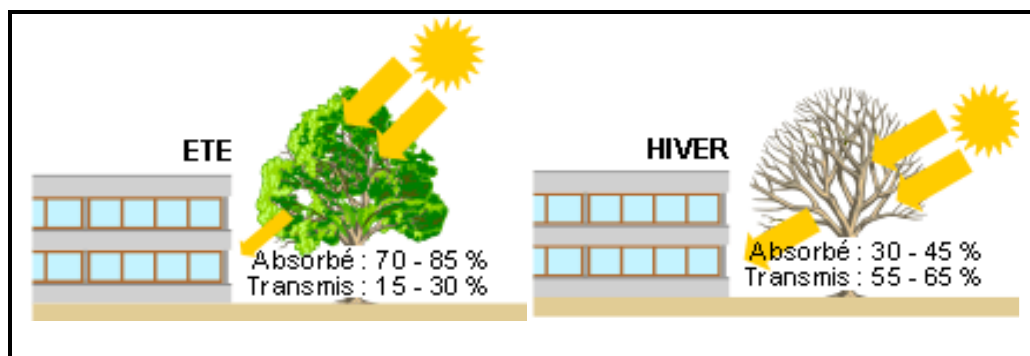


Fig. II.12: Absorption et transmission des feuilles d'arbres (Reiter.S, 2007).

✚ La maturité. En général un délai de 5 ans est nécessaire à la croissance d'un jeune arbre pour produire un effet d'ombre satisfaisant (Brown et Gillespie, 1990 ; picot, 2004).

✚ La dimension et la forme de la plante (la hauteur maximum et sa structure) dont la couronne et les branches changent d'une espèce d'arbre à une autre, d'arbre à arbre dans l'espèce), (**cf.annexe B**).

La taille et la forme de la couronne des arbres et arbustes couplé aux angles et azimuts solaires influencent fortement la forme et la quantité de l'ombre projetée (**cf.fig. II.13, 14**). Ceci déterminera l'emplacement correct des arbres pour masquer les surfaces horizontales et/ou verticales à protéger (Meerow et Black, 1991 ; Calzada, 1998) et départagera le choix de l'essence, le type de plante et sa taille selon l'emplacement à ombrager (Meerow et Black, 1991 ; Calzada et al., 1998).

Les figure **II.13** et **II.14** indiquent que les larges couronnes fournissent sensiblement plus d'ombre toute la journée mais aussi pendant les parties les plus chaudes de la journée où elle est la plus nécessaire. Ainsi les arbres aux larges couronnes sont plus performants pour les climats chauds et arides vu la grande surface qu'ils masquent (B.Kotzenn,2003).

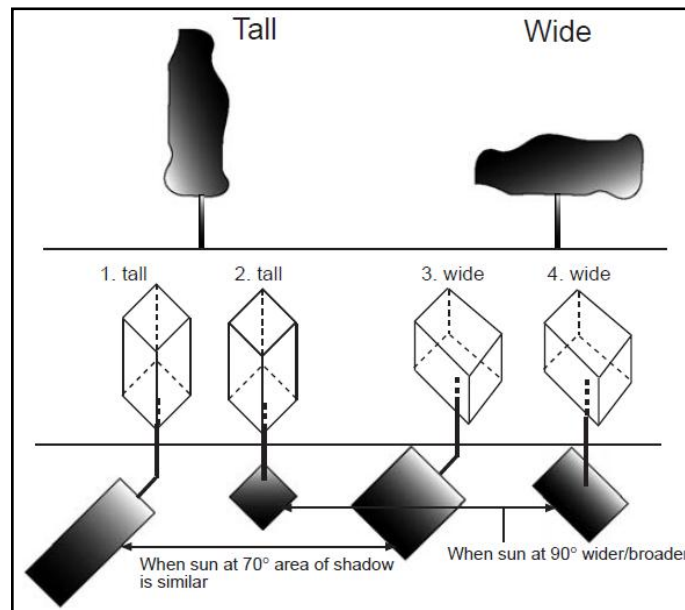


Fig. II.13: Comparaison de l'ombre projetée par rapport au diamètre de la couronne (B.Kotzenn, 2003).

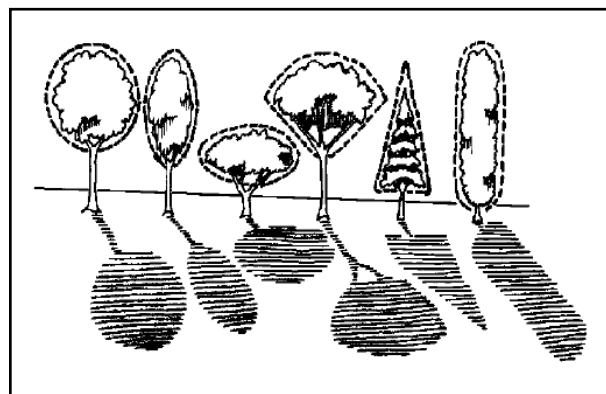


Fig. II.14: Formes des ombres projetées selon les différentes formes d'espèces d'arbre. (Meerow et al., 1991)

L. Sha shua-Bar et al. (2006) rapportent que l'effet de refroidissement de l'arbre dépend principalement du niveau de couverture par sa couronne et peu sur d'autres caractéristiques.

- Angles solaires : L'intensité de l'ombre varie pendant la journée et les saisons en fonction de la course solaire (**cf. Fig. II.15**).

Le soleil passe au début et vers la fin de la journée par les basses altitudes solaires ce qui donnera des ombres longues. C'est pourquoi les arbres donnent leur meilleurs rendement pour les orientations Est et Ouest, plus courtes pour les orientations Sud-est et Sud-ouest ; cependant au milieu de la journée le soleil est haut et l'arbre projette son ombre sur lui-même (Olgay et Olgay, 1957) ce qui incite à les combiner avec des

dispositifs d'ombrage horizontaux afin de maximiser l'ombrage au sol des espaces extérieurs et des façades sud des bâtiments.

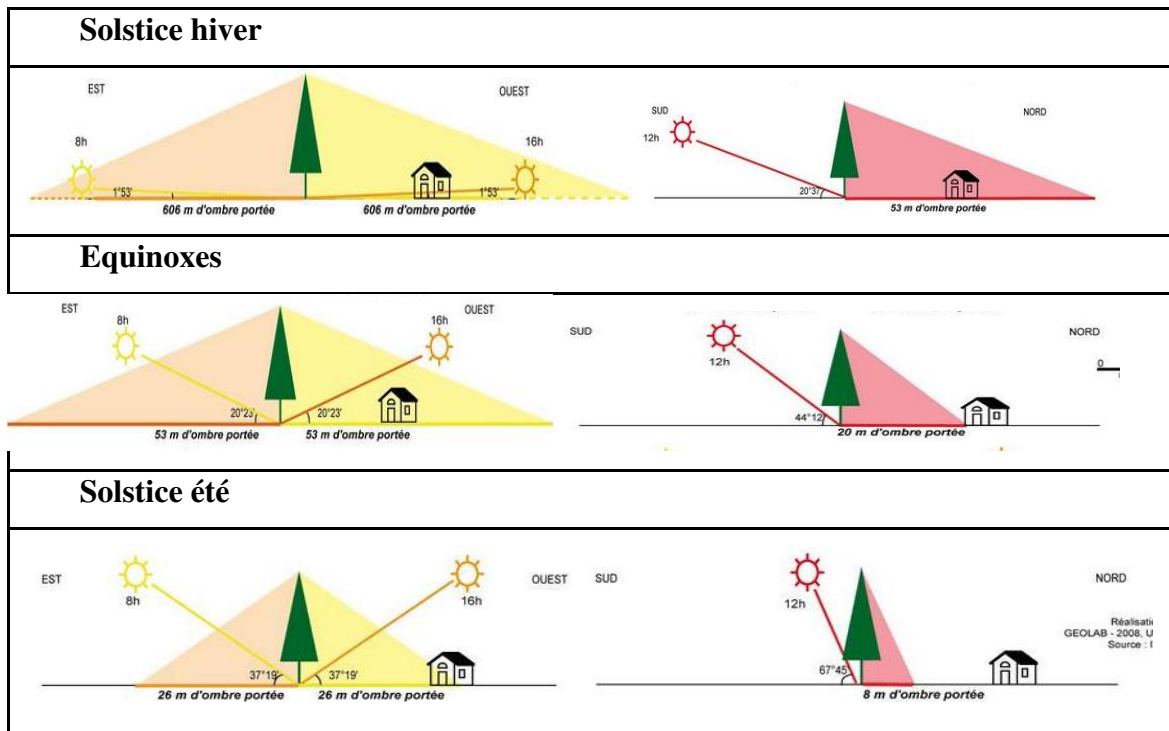


Fig. II.15 : variations de la longueur de l'ombre d'un arbre selon la course solaire journalière et saisonnière (Labrue .C, 2010).

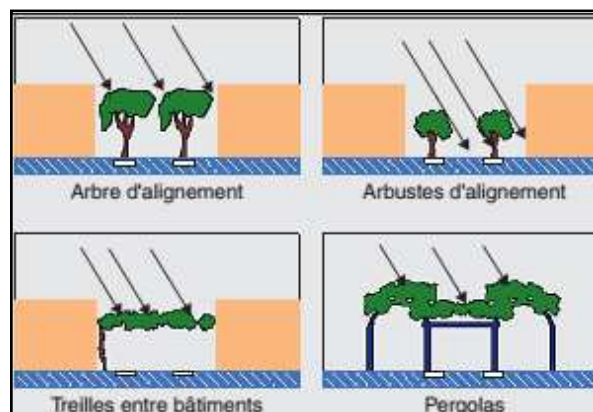


Fig. II.16: Contrôle de l'ensoleillement par les végétaux (Bencherif et Chaouche, 2013)

II -3- 3- Détails optimisant l'amélioration du microclimat par les arbres :

Pour optimiser la contribution des arbres à l'amélioration du microclimat dans les espaces extérieurs urbains ainsi qu'aux abords des bâtiments et par conséquent le

confort thermique extérieur et intérieur, et pour éviter la mort prématurée des plantes quelques détails principaux doivent être respectés:

✚ Choisir les espèces d'essences locales d'arbres, arbustes et pelouses car elles ont généralement une résistance plus forte aux parasites ainsi qu'aux contraintes climatiques locales nécessitant donc peu de soins particuliers comparativement aux espèces étrangères qui peuvent provoquer la déstabilisation du paysage par les maladies importées en même temps que les plantes (M.A. Guyot, 1998)

✚ Le rapport végétation/espace bâti ; un rapport de 60/40 et plus est recommandé (Tareb, 2000) ; plus il est important meilleur est le refroidissement.

Sanusi et al. (2016) comparent la température de l'air dans des journées chaudes d'été dans des rues similaires à Melbourne (Australie), mais avec une couverture d'arbres de platane inférieure à 20% et supérieure à 80%. Les conditions de confort sont liées aux pourcentages importants. Cependant sous un même pourcentage de couverture, ils ont observé une réduction plus importante de température de l'air soit 2.1°C dans les rues d'orientation Est-Ouest comparée à celles d'orientations Nord-Sud, 0.9°C seulement.

Pour les rues N-S, la température de l'air, la température moyenne radiante et le rayonnement solaire étaient plus élevés sur le trottoir de l'est au début de la matinée et les plus grandes valeurs sont attribuées aux trottoirs ouest l'après-midi.

Le pourcentage élevé de couverture réduit la vitesse du vent mais pas assez pour anéantir les autres avantages pour le microclimat.

✚ La densité des plantations : car dans les endroits où les arbres sont plantés en groupes, les effets sont plus prononcés (Streiling et Matzarakis, 2003).

Bien que les gens sentent que la température de l'air est plus basse sous des arbres isolés des jours ensoleillés, il est maintenant bien su que la température de l'air sous un arbre isolé est presque exactement la même que la température de l'air à découvert (Brown et Gillespie, 1990).

S. Streiling et A. Matzarakis (2003) ont mesuré la température de l'air et l'humidité relative sous un arbre isolé et un groupement d'arbre, ils ont trouvé une différence de température de l'air de 0,9 à 1°C entre le groupement d'arbre et un espace découvert de référence, cependant pour un arbre isolé la différence était seulement 0,1°C. Par contre les différences dans l'humidité relative moyenne étaient insignifiantes, elles étaient respectivement de 5% à 7% entre les secteurs avec arbres et sans arbres.

Des petites différences de 1.1% et de 0.9% étaient enregistrées sous la couronne d'un arbre isolé et le groupement d'arbre. Ces mêmes résultats ont été prouvés

antérieurement (1975) par une étude dans la zone du centre d'affaire de Syracuse (Usa) par Herrington et vittum citées par Heisler (1977) et par Calzada et al. (1998) dans une étude dans le centre de Barcelone.

Leurs résultats concernant l'influence des arbres sur le paramètre thermique T_{mrt} et la PET étaient d'un intérêt spécial. Des différences maximales de 30.8°C et de 34°C dans la T_{mrt} ont été trouvées entre les endroits fortement et légèrement influencés par les arbres. Les différences moyennes maximales sont de l'ordre de 19.3°C et 21.0°C , respectivement.

Les différences maximales observées pour la PET sont de l'ordre de 17.6°C et 16.6°C , tandis que par rapport aux valeurs moyennes il y avait des différences maximum de 7.5°C et de 9.9°C , respectivement. Le sentiment de fraîcheur exprimé par les personnes est donc un résultat d'une réduction du rayonnement reçu ; qu'il soit direct diffus ou réfléchi, aussi bien que des radiations en grandes longueurs d'ondes provenant notamment des sols artificiels.

De ce fait un petit groupe d'arbres aussi bien qu'un arbre isolé a des effets positifs sur le confort thermique.

Sugawara et al. (2016) décrivent les bienfaits de refroidissement d'un grand parc dans l'environnement urbain chaud de Tokyo, au Japon. Dans des conditions de vent calme, le refroidissement dû à un grand parc s'étend généralement à 200 m sous le vent dans les zones résidentielles environnantes et offre un avantage de refroidissement équivalent à 39 W m^{-2} . Jaganmohan et al. (2016) démontrent que l'effet de refroidissement est davantage influencé par la taille de la zone boisée que sa forme. De nombreux petits espaces verts urbains arborés n'offriront pas le même degré de refroidissement que des plus grands même peu nombreux.

✚ Pour que les arbres puissent fournir de la fraîcheur, leur bonne croissance est essentielle et peut dépendre de la qualité des sols, de la disponibilité de la ressource hydrique et de l'espace suffisant pour un déploiement racinaire optimal (H. Akbari et al, 2001). Un arbre occupant un espace restreint dans le sol n'atteindra pas sa taille maximale et sa durée de vie en sera écourtée (McPherson, 1994).

✚ Leur distance par rapport aux constructions doit être comprise entre 2.5 à 6 m avec un espacement tenant compte de la dimension finale de la canopée de chaque type d'essence. Cette distance permet à la canopée de se développer et de s'éloigner des surfaces minérales verticales tout en optimisant l'ombre portée.

Il convient également d'éviter les espèces émettrices de composés organiques volatils, COV, (H. Akbari et al, 2001 ; Calfapietra et al., 2013; Nowak et al., 2006). Par exemple, isoprènes, monoterpènes et hydrocarbures entrant dans la composition du smog ainsi que les espèces à fort pouvoir allergisant (**cf. Tab .II.1**).

Tab .II.1 : Arbres potentiellement allergisants (*Source : R.N.S.A, 2009*)

Espèce d'arbre	Potentiel allergisant
Bouleau, Chêne	Fort
Aulne, Frêne	Moyen
Noyer, Peuplier, Saule, Orme, Erable	Faible

La pollution atmosphérique et notamment les teneurs élevées en ozone potentialisent l'action des allergènes. En effet, les plantes des milieux urbains, plus stressées, pollinisent davantage ce qui engendre la fixation de certaines substances polluantes aux particules de pollen et augmente le potentiel allergisant.

En plus de ces émissions, il faut considérer celles de CO₂ et du méthane liées à la décomposition de la biomasse végétale (Cao et Caldeira, 2010).

Enfin, il est nécessaire de privilégier les espèces les moins invasives et non allergisantes dans l'aménagement des espaces verts ou la plantation d'alignement d'arbres en ville. Parallèlement, selon leur densité de plantation et leur morphologie (la forme et la hauteur), les arbres peuvent altérer l'écoulement de l'air, ce qui freine la dispersion des polluants et entraînerait même une augmentation des polluants, qui se concentrent donc à certains endroits, ce qui est le cas dans les rues encaissées (Nowak, 2006).

II -3- 4- Pelouse et rayonnement solaire

La pelouse soumise au rayonnement solaire connaît des échauffements modestes (Chudnovsky.A et al ,2004 ; Izard, 2006) et comme les arbres elles ont tendance à équilibrer leur température avec celle de l'air ; Par manque d'inertie et contrairement aux surfaces minérales, ces échauffements disparaissent dès que le rayonnement solaire cesse ainsi une pelouse à l'ombre reste toujours une surface fraîche (**cf.Fig. II. 17, Tab.II-2**). Ces écarts sont plus importants pour une pelouse humide d'après une étude menée par J.L.Izard (2006).

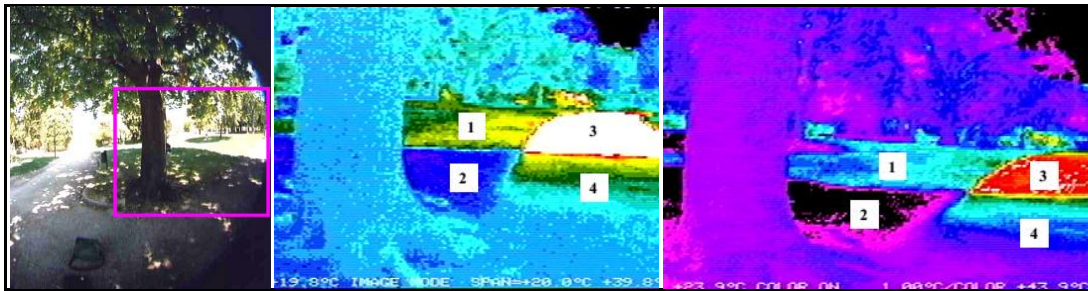


Fig. II.17 : Image thermique d'un pavage minéral et pelouse d'un parc urbain.
 (1.pelouse au soleil ; 2.pelouse à l'ombre ; 3.allée au soleil ; 4.allée à l'ombre).
 (Izard J.L. (2006))

Tab.II-2 : Températures surfaciques à l'ombre et au soleil d'un pavage minéral et la pelouse sèche et humide d'un parc urbain (Izard J.L, 2006).

Revêtement du sol	Ts °C (ombre)		Ts °C (soleil)	
	max	min	max	min
Allée en asphalte	25	24,5	43	40.1
Pelouse Sèche	24	23	28	31
Pelouse humide	22		28	
Allée en asphalte	Ts à la limite ombre/soleil °C			
	max		min	
	39		30	

Napoli et al. (2016) a mesuré les réductions de la température de surface à l'ombre de 10 espèces d'arbres différentes et dans des conditions ensoleillées. Ils ont mesuré à la fois les surfaces d'asphalte et de pelouse. Sur l'asphalte, la température des surfaces à l'ombre était négativement liée à l'indice de la surface foliaire des arbres (allant de 13,8 à 22,8 ° C), alors que sur la pelouse, la relation était plus faible (allant de 6,9 à 9,4 ° C) probablement en raison de l'effet de l'évapotranspiration de l'herbe.

II -3- 5 -Végétalisation du pourtour des bâtiments

Pour une fraîcheur optimale, l'aménagement du pourtour d'un bâtiment doit protéger celui-ci du rayonnement solaire. En effet, la texture et la nature des sols entourant le bâtiment déterminent en partie la température intérieure et extérieure. La végétation permet de garder un sol plus frais et d'éviter le rayonnement solaire direct,

réfléchi et diffus pouvant affecter la fraîcheur du bâtiment (**cf.Fig. II.18**), (Akbari et al. 2001, Givoni, 1994).



Fig. II.18 : Végétalisation du pourtour du Bâtiment
([http //: www.monclimatmasante.qc.ca](http://www.monclimatmasante.qc.ca))

Le rayonnement réfléchi par le sol vers les fenêtres et les murs représente une part non négligeable du gain de chaleur d'un bâtiment.

Pour contrôler ce rayonnement réfléchi, l'utilisation de la végétation absorbera le rayonnement solaire et dissipera la chaleur par le phénomène d'évapotranspiration.

Afin de maximiser l'ombrage sur le bâtiment, L'orientation stratégique des arbres plantés devant les fenêtres et du côté ensoleillé des bâtiments permet de maximiser les économies d'énergie. La façon la plus efficace de procéder consiste à planter une végétation caduque devant les façades Sud, Est et Ouest des bâtiments, de manière à stopper à la fois les rayons solaires le matin et l'après-midi, et pour laisser passer les rayons du soleil en hiver. Une végétation persistante sera au nord pour protéger du froid et du vent.

Les chercheurs Akbari et al. (1997) ont évalué pendant quelques mois la température de surface maximale des murs et des toits ombragés par les arbres sur deux bâtiments à Sacramento en Californie. La température de surface maximale mesurée était de 11 à 25 °C.

Il est aussi possible d'aménager des treillis, des pergolas qui, juxtaposés aux bâtiments, assurent une température intérieure plus fraîche. (Oliva et Courgey , 2006).

Le choix des plantes avec plus ou moins du feuillage dense peut contribuer à changer le flux d'énergie atteignant les bâtiments voisins et la température de l'air environnante, desquels dépend le comportement thermique de l'édifice ombragé qui atteint son zénith 2 ou 3 heures après le rayonnement solaire maximum (Fabio, 2000). Ceci entraîne un changement de la température intérieure et induit une utilisation

modérée de la climatisation et par conséquent réduction de la consommation énergétique et le rejet des gaz à effet de serre.

Plusieurs auteurs comme indiqué sur la **figure II.19** rapportent que les surfaces ombrées par la canopée verte sont refroidies de 5-20 K plus que les surfaces exposées. L'ombre d'un seul grand arbre peut abaisser la température intérieure dans un immeuble donné dans les mêmes proportions que le feraient 15 climatiseurs de 4000 BTU (British thermal units), soit 4220 kJ, dans un immeuble analogue mais non ombré.

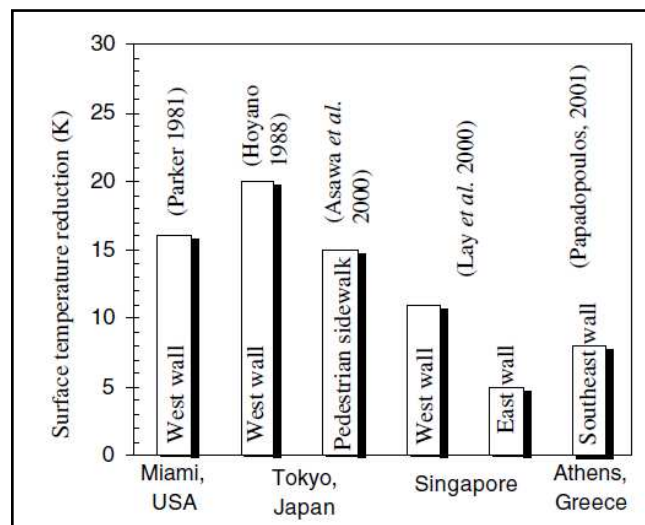


Fig.II.19 : réduction des températures des surfaces de bâtiment par l'ombrage des arbres. (Cités par Robitu.M et al.,2006)

Selon Kuchelmeisteret et Braatz (1993), les économies d'énergie réalisées en plantant des arbres autour des maisons vont de 10 à 50 % pour le refroidissement et de 4 à 22 % pour le réchauffement.

McPherson et al., (1994) par simulation ont étudié l'effet de la végétation sur le chauffage et le refroidissement des locaux en analysant le rayonnement et la réduction du vent. Ils se sont concentrés sur cinq villes aux Etats - Unis, représentatives de cinq climats différents. Les résultats ont montré que, dans les climats froids, l'ombre dense, comme celui des conifères, augmente le coût de chauffage jusqu'à 21%, mais l'augmentation est moins importante pour les espèces caduques.

Cependant, dans les villes avec les climats tempérés et chauds, l'ombre dense sur toutes les surfaces réduit les coûts annuels de refroidissement de l'espace par 53- 61% et les piques de charges de refroidissement de 32- 49%.

De plus, la réduction des vents ont été jugées plus bénéfiques dans les climats froids que dans les climats plus tempérés, ils pourraient être contre-productive si la végétation n'a pas été placée stratégiquement. Par exemple, à Salt Lake City, une réduction du vent de 50% réduit les coûts de chauffage annuels de 8% alors qu'elle a augmenté les coûts annuels de refroidissement de 11% en raison de l'obstruction des brises d'été.

Donc les effets de la végétation pourraient être positifs ou négatifs. C'est pourquoi, il est nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des espèces végétales, ainsi que du climat local.

II - 3- 6- Végétalisation des surfaces des bâtiments

En absorbant le rayonnement solaire incident, les enveloppes végétales des bâtiments agissent sur les bâtiments comme une barrière solaire, ceci induit à une réduction des températures de surface comparées aux surfaces minérales.

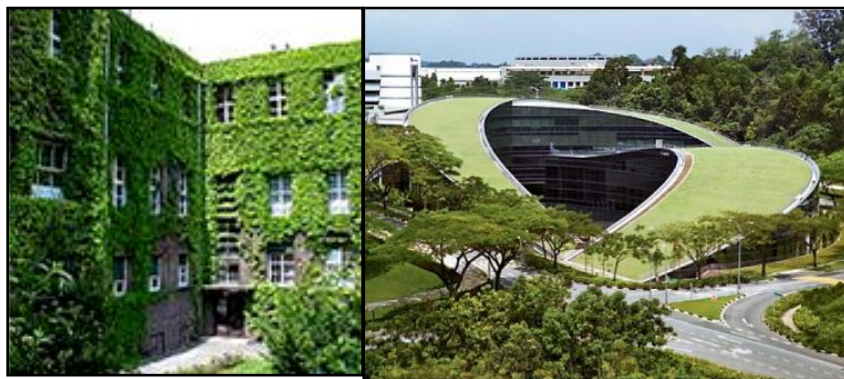


Fig.II.20 : Façades et toiture végétales (*Google image.com*)

Pendant une journée ensoleillée de 26 °C, un toit foncé peut atteindre jusqu'à 80 °C, un toit blanc, 45 °C et un toit végétal, 29 °C (Fischetti, 2008).

Kingsbury et Dunnett (2008) avancent que la température maximale des murs végétaux est de 30 °C, alors que les murs classiques peuvent atteindre 60 °C en fonction du type de revêtement.

Ce faisant, elles diminueraient les variations saisonnières de température à l'intérieur des bâtiments, générant une certaine économie d'énergie, sans toutefois pouvoir atteindre l'efficacité d'une couche d'isolant (Jaffal et al., 2012 ; Malys, 2016).

En été par exemple, la réduction de la consommation d'énergie qu'elles engendrent pour la climatisation des bâtiments peut varier considérablement de 5 à 68 % pour les

façades végétales (Malys, 2016) et de 6- 49% pour un toit végétal (Santamouris et al., 2007).

Les simulations numériques présentées par Martens et al. (2008) et Malys et al. (2016) montrent que l'effet du toit vert sur l'ensemble du bâtiment est plutôt faible dans des immeubles multi- étages et qu'il n'est cependant ressenti qu'au dernier étage.

A. Szucs (2013) rapporte que l'impact de ces façades végétales sur la température de l'air extérieure est faible, à moins que tous les murs soient couverts de végétation.

Elles peuvent néanmoins améliorer le confort thermique du piéton, non par un effet sur la température de l'air mais plutôt par un effet radiatif : la végétation s'échauffant beaucoup moins qu'un mur au soleil, elle reste pratiquement à la température de l'air et induit donc une charge radiative plus faible sur le piéton.

Les toitures végétales ont également un impact limité sur la température de l'air ; comme elles concernent des couches d'atmosphère plus élevées, elles n'ont en outre pas une conséquence sur le confort du piéton.

Il faut savoir que l'irrigation de ces façades et toitures végétales consomme beaucoup d'eau, ce qui, en plus de lourdes contraintes techniques liées à l'étanchéité, peut poser des problèmes dans les régions où la ressource en eau est limitée.

II- 3-7- L'arbre et le vent

Implantée en fonction des contraintes climatiques et topographique, une grande variété de végétaux de type arbres, arbustes, conifères et feuilles peut être utilisée pour réaliser les écrans végétaux réduisant ainsi la vitesse du vent en offrant une résistance au déplacement d'air due à leur porosité. (cf. section II-4), comme elle peut être utilisée pour canaliser le vent vers les espaces extérieurs ou intérieurs.

II -4- Les brises vents

Des paravents peuvent être utilisés pour protéger les piétons dans l'espace urbain des vents intenses et de la turbulence et peuvent être à la fois des structures entières (immeubles, murs, etc.) ou partielles (végétation, clôtures, etc.).

Les effets aérodynamiques des brise-vent dépendent tout d'abord de leurs caractéristiques géométriques (hauteur, longueur, porosité, leur structure,).

Pour une hauteur donnée, le maximum de protection est obtenu lorsque la longueur de l'écran est de 11 à 12 fois sa hauteur (Watson et Camous, 1986).

La perméabilité ou la densité de l'écran a un effet sur les dimensions de la zone protégée, les écrans massifs et denses provoquent une forte réduction de la vitesse du vent mais seulement sur une courte distance immédiatement après l'écran.

Les écrans protecteurs les plus intéressants sont ceux qui présentent 25 à 60% de porosité. A 50% de porosité, ils fournissent en général une bonne protection dans la zone comprise entre la distance 5H et 20H la vitesse de l'air est alors réduite de 30% (Watson et Camous, 1986).

Ainsi si le choix des protections est porté sur le végétal, il est nécessaire de combiner différents types de végétation par exemple en utilisant des arbres pour protéger en hauteur et des arbustes/buissons pour la protection près du sol (cf. **Fig.II.21**)

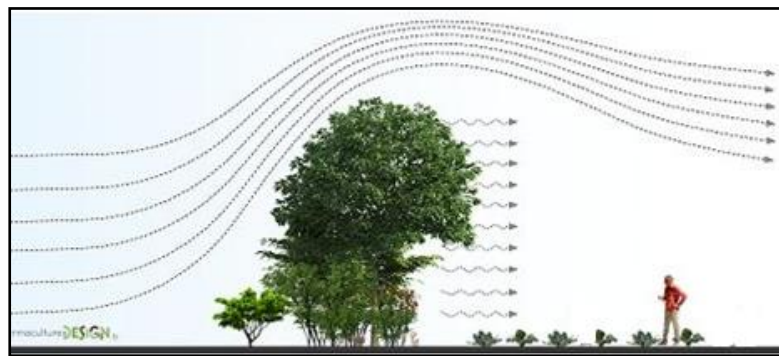


Fig.II.21 : haie brise-vent semi perméable.

(<http://www.permaculturedesign.fr>)

II- 5- Effet combiné de l'eau, le végétal et la ventilation urbaine

Durant l'EXPO 1992 de Séville dont l'un des objectifs principaux des concepteurs était de fournir un environnement extérieur confortable dans lequel les 290.000 visiteurs estimés par jour peuvent se détendre en visitant les cent pavillons internationaux répartis sur 215 hectares dont les trois quarts sont laissés en tant qu'espaces extérieurs.

Un programme-cadre a été conçu par une équipe d'architectes, de planificateurs et les autorités. Ces derniers ont établi des critères pour réaliser un cadre bioclimatique et écologique. Le principe fondamental était de fournir un refroidissement externe passif par l'utilisation de l'eau et l'emploi de la végétation de différentes espèces et tailles, afin de maximiser les filtrations du rayonnement solaire et de l'air chaud à différents niveaux. Des couloirs de vents dominants ont été créés par des écrans végétaux augmentant le refroidissement. Un rapport espace végétal /espace construit de 60 / 40 a

été respecté. L'eau a été employée dans tous les emplacements ; en fontaines, murs d'eau, brumiseurs, cascades et bassins (cf. Fig. II- 22).



Fig. II-22 : Parmi les stratégies de rafraîchissement utilisées dans l'Expo de Séville
Source: Energy Research Group, [http:// www. erg.ucd.ie](http://www.erg.ucd.ie).

Des résultats extraordinaires de l'effet combiné des systèmes de rafraîchissement sont illustrés sur les deux graphes suivants :

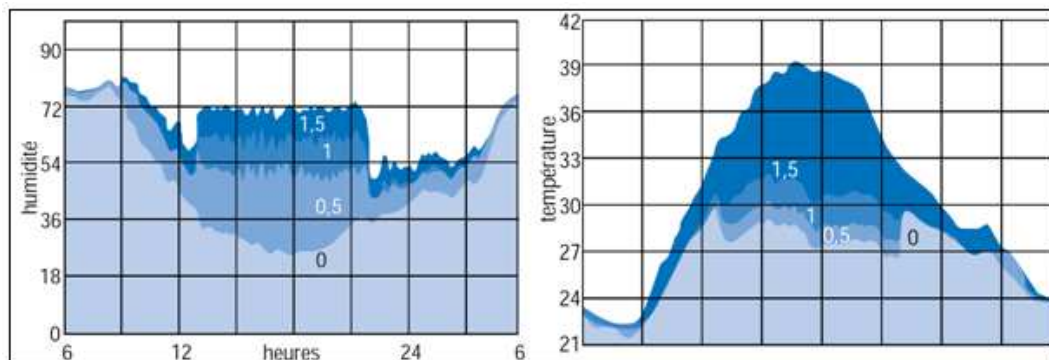


Fig. II-23: Effets climatiques des systèmes de rafraîchissement par humidification utilisés à Séville, au pavillon de la CE. Température et humidité à différents niveaux (0.5, 1, 1.5 m), (Izard. J.L ,1993).

II-6- Le Bâtiment

Les contributions potentielles de l'architecture à l'amélioration du microclimat de l'espace urbain sont la réduction des émissions des GES dans le bâtiment par l'intégration de stratégies architecturales passives et l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions.

L'orientation, la forme, la compacité, l'enveloppe, les équipements et le rapport du bâtiment avec l'extérieur sont des caractéristiques qui influencent les gains et les déperditions thermiques. Ils agissent également sur la capacité du bâtiment de créer des

espaces confortables sans avoir recours aux systèmes mécaniques et électriques par le biais des trois stratégies passives : l'éclairage naturel, le chauffage solaire et le refroidissement passif.

✚ **L'orientation** optimale pour une bonne stratégie solaire est celle de la forme rectangulaire allongée dans l'axe est-ouest (face au sud), car elle permet aux façades de recevoir plus d'énergie en hiver qu'en été.

Selon (Robertson, Athienitis, 2007), les écarts jusqu'à 30° du sud réduisent les gains solaires de 12 %, ce qui demeure acceptable.

Les bâtiments orientés vers l'ouest peuvent être potentiellement soumis à une surchauffe durant l'été et à un gain de chaleur réduit pendant l'hiver, ceci exige inévitablement une charge de refroidissement plus élevée.

✚ **La compacité** : est un paramètre qui possède une influence directe sur la forme architecturale et urbaine. Il définit le rapport entre les surfaces d'enveloppes en échange thermique avec l'extérieur et le volume chauffé.

Toutefois, elle doit être considérée avec prudence, puisque un faible ratio agit sur d'autres postes de consommation, car il induit en un faible apport en éclairage naturel et une faible ventilation naturelle.

En réponse à ce constat, C.Ratti et al. (2005), définissent un nouvel indicateur qui détermine le degré d'exposition des bâtiments à l'environnement extérieur : le ratio (zones passives / zones non passives).

Le volume (zone) passif est la partie du bâtiment située à moins de 6 mètres d'une fenêtre (ou deux fois la hauteur sous plafond). Ce volume bénéficie donc d'un éclairage et d'une ventilation naturelle (Ratti, 2005). Il s'agit donc de la largeur du bâtiment.

✚ **L'enveloppe** : L'inertie thermique d'un matériau mesure sa capacité à accumuler de la chaleur et à en sa restitution après un certain temps (fin de journée) : c'est le temps de déphasage. (Liébard et De Herde, 2005). Les villes qui sont marquées par une variation journalière élevée de la température devraient avoir la masse thermique élevée pour réduire les demandes énergétiques annuelles. "*Un déphasage de 3-4 heures est approprié. Davantage d'isolation réduit considérablement des demandes énergétiques par rapport aux enveloppes minces ou massives non-isolées.*" (Aggarwal, 2006).

✚ **Les ouvertures** : La dimension, la répartition et l'orientation des ouvertures du bâtiment sont aussi capitales au fonctionnement des trois stratégies.

Il est important pour les concepteurs de savoir que les gains de chaleur par les fenêtres, par unité de surface, est beaucoup plus élevé qu'à travers les murs ou les toits (Givoni, 1998).

Dans les régions chaudes et sèches de grandes fenêtres peuvent augmenter les gains solaires et l'inconfort dû à l'éblouissement. Ceci renforce l'idée que les petites fenêtres sont plus appropriées dans un tel climat.

Mais avec des dispositifs spéciaux larges fenêtres peuvent fournir des avantages optiques et thermiques :

✓ **Le Vitrage** :

Les vitrages sont les points faibles de l'isolation thermique d'un bâtiment en été comme en hiver. Il est cependant possible d'améliorer la performance de l'isolation thermique en faisant notamment les choix suivants :

- des vitrages anti-émissifs intelligents qui réduisent l'apport solaire à l'intérieur du bâtiment. Ces vitrages s'adaptent en fonction des saisons et l'angle d'inclinaison des rayons incidents : ils laissent passer la lumière en hiver quand le soleil est plus bas et limitent le rayonnement solaire en été lorsqu'il est plus haut;
- des vitrages doubles ou triples avec lame d'air. L'air est un isolant qui permet de minimiser les échanges de chaleur par conduction et convection. Les vitrages doubles ou triples renferment une lame d'air en augmente la capacité d'isolation.
- des vitrages à faible gain solaire existent également et pourraient régler le problème de la surchauffe en été. Toutefois, leur utilisation entraînerait une perte de gain solaire en hiver et donc une hausse de la demande énergétique.

✓ **Dispositifs d'ombrage** :

La réduction des gains solaires au niveau des fenêtres et même de l'enveloppe peut être réalisée par des dispositifs d'ombrage les avancées de toiture en porte à faux constituent un moyen très efficaces. Ces avancées peuvent être calculées avec précision pour des latitudes et des orientations spécifiques.

Une méthode de calcul très simplifiée pour les concepteurs est présentée par la **figure II.24** et le **tab II.3** (Watson et Camous, 1986).

On peut calculer très rapidement les dimensions d'une avancée de toiture en insérant le facteur d'ombrage K tiré du tableau **tab II.3** de la formule :

$$L = H / K \dots \dots \dots \text{Eq.II.1}$$

Où **L** est la longueur de l'écran, **H** la hauteur de la surface à ombrager qui peut être la hauteur de la fenêtre entière ou partielle. **K** facteur d'ombrage.

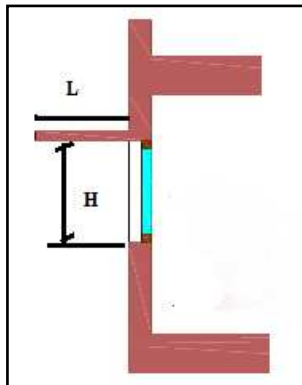


Fig. II.24 : Termes du facteur d'ombrage K. (Auteur).

Tab II.3 Facteurs d'ombrage K. (Watson et camous, 1986).

Orientation	Latitude en degrés		
	30	35	40
Est	0.8	0.8	0.8
Sud-Est	1.6	1.4	1.3
Sud	5.4	3.6	2.6
Sud-Ouest	1.6	1.4	1.3
Ouest	0.8	0.8	0.8

✓ Les volets

Lorsque des volets sont ajoutés à de grandes fenêtres, leur effet d'isolant thermique peut être ajusté aux besoins à la fois diurnes et annuels variables.

En été, les volets peuvent être fermés pendant les heures chaudes. Durant les nuits d'hiver, la fermeture de ces isolants (volets) piège la chaleur à l'intérieur et réduit la vitesse de refroidissement (Givoni 1998).

De manière plus exacte, l'implémentation de dispositifs d'ombrage contrôlés par les occupants serait la manière la plus efficace d'adapter les immeubles résidentiels à la hausse des températures estivales. C'est du moins l'une des conclusions de l'étude menée à Oxford par Gupta et Gregg (2012).

Les chercheurs ont testé l'efficacité de plusieurs mesures d'adaptation à la hausse des températures estivales : matériaux réfléchissants, murs et toitures végétalisés, double-peau, augmentation de l'isolation et de l'étanchéité de l'enveloppe, ventilation naturelle, hybride, mécanique, etc. Ces résultats ont été obtenus à partir de simulations thermiques dynamiques effectuées sur 4 bâtiments représentatifs des banlieues anglaises.

✚ La ventilation naturelle

La ventilation naturelle notamment transversale s'effectue en ouvrant les fenêtres ou les portes situées sur des murs opposés, ce qui permet aux courants d'air de circuler dans les pièces. Plus la différence de température entre l'air extérieur et intérieur est grande, plus la capacité de climatisation est optimisée.

Elle est optimale dans des bâtiments de faible largeur car ceux-ci facilitent la ventilation transversale.

L'effet de l'orientation du bâtiment est remarquable sur la ventilation extérieure et intérieure. L'incidence oblique du vent permet d'améliorer les vitesses internes de l'air car cette disposition permet une meilleure infiltration du vent dans les rues et induisent de ce fait des champs de pression plus forts.

Un bâtiment placé dans un angle de 45° par rapport au vent dominant permettra des surpressions et des dépressions optimales favorisant la ventilation. (Liébard et De Herde, 2005).

II- 7- La forme urbaine

Le contexte urbain d'un bâtiment détermine sa capacité de capter l'énergie solaire pour se chauffer, la lumière du jour pour s'éclairer et le vent pour se rafraîchir.

Dans leurs études, Nick Baker et Koen Steemers identifient cinq facteurs ayant un impact sur la consommation énergétique des bâtiments : le climat, le bâtiment, les équipements, les occupants, et le contexte urbain.

Tandis que l'influence de la conception du bâtiment, celle des équipements et celle des occupants sont quantifiées, la contribution du contexte urbain reste encore à déterminer (cf. **Fig. II-25**). La contribution des trois premiers peut faire varier jusqu'à dix fois la consommation. En pratique, la consommation finale peut être 20 fois supérieure à la consommation réelle. Cela signifierait donc que la contribution du contexte urbain est de 2 c-à-d le contexte urbain peu influencer jusqu'à deux fois sur cette consommation (Ratti, 2005).

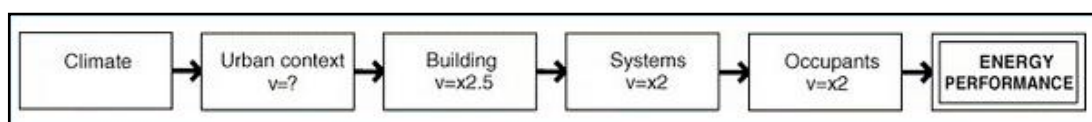


Fig. II-25 : Les facteurs qui influencent la consommation énergétique des bâtiments (Ratti, 2005).

De même, Les effets direct et indirect des arbres sur les économies d'énergie sont fortement liés à la hauteur du bâtiment. La figure **II.26** montre l'effet du rapport hauteur arbre / hauteur façade sur les économies d'énergie maximales qui peuvent être atteintes. Plus ce rapport est grand meilleure et l'économie d'énergie.

L'effet de l'arbre en été est donc fortement lié à la géométrie urbaine de l'espace plus l'espace ouvert est profond, plus l'effet de refroidissement par les arbres est petit. (Shashuabar et al., 2006).

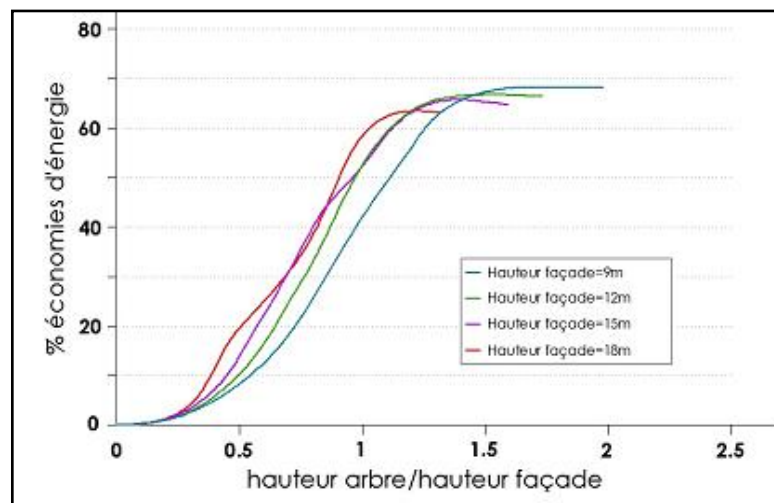


Fig.II.26 : Economies d'énergie de refroidissement en fonction du rapport hauteur arbre / hauteur façade (Sanchez de la Flor, 2002).

La recherche révèle aussi que l'influence de l'ombre des bâtiments seuls dans l'amélioration du microclimat et le confort thermique des piétons est bien plus significative que les arbres seuls car leurs ombres projetées sur les façades et les surfaces horizontales peuvent diminuer d'une façon considérable les effets du rayonnement solaire sur le confort des espaces extérieurs (Gulyas et al., 2006).

Un ajustement donc soigneux et raisonné des formes urbaines pourrait améliorer le confort dans les espaces urbains comme dans les bâtiments, ainsi que la consommation énergétique sans contrer les bienfaits des autres stratégies.

Conclusion

Par ce petit inventaire, combien succinct voire incomplet, nous avons passé en revue les différentes stratégies que peuvent utiliser les architectes et les urbanistes pour

atténuer les effets néfastes du réchauffement urbain sur le confort thermique du piéton et de l'habitant.

L'ambiance thermique peut contrer d'une manière significative la fréquentation des espaces extérieurs tels que les places et diminuer les performances thermiques des bâtiments. La finalité du traitement de ces espaces extérieurs est bien de créer un microclimat confortable pour leurs usagers de l'espace urbain ainsi qu'aux bâtiments.

Dans cet objectif, le concepteur peut jouer au maximum sur tout ce qui améliore les bilans radiatif, convectif et évaporatif.

Le refroidissement par évaporation est l'un des manières les plus efficaces du refroidissement passif pour les bâtiments et les espaces urbains dans les régions chaudes. L'efficacité du processus d'évaporation dépend des températures de l'air et de la disponibilité de l'eau, de l'humidité de l'air, mais aussi de la circulation de l'air au niveau des surfaces d'eau et des végétaux.

L'effet de réduction de la température dû au végétal et à l'eau peut être examiné seulement sur une échelle locale et à une distance relative, parce que les échanges d'air réduisent l'influence sur une plus grande échelle. Néanmoins les recherches ont révélé que l'augmentation des espaces verts et des surfaces d'eau dans une ville par leur processus d'évapotranspiration contribue de manière significative à améliorer la température globale d'été.

La présence des arbres, après maturité, réduit le rayonnement absorbé par le corps humain et les bâtiments, et provoque des échanges convectifs.

Les arbres à feuilles caduques sont particulièrement intéressants sur le plan du contrôle solaire puisqu'ils permettent de profiter de l'ensoleillement et l'éclairage naturel en hiver tout en créant un ombrage en été.

L'introduction de la végétation devrait être soigneusement combinée avec d'autres variables telles que sa forme et sa taille, la géométrie de l'espace, l'albédo des surfaces minérales, son pourcentage de couverture de l'espace ainsi que le choix des espèces non allergènes.

La ventilation urbaine est affectée d'avantage par la configuration urbaine que par la végétation. La hauteur et la densité des brises-vent ainsi que leur combinaison ont un impact apparent sur le flux d'air près du sol à double effets contraires sur le confort de l'homme dans son espace vital.

L'emploi des matériaux froids peut atténuer les températures de l'air et des surfaces mais leur contribution à l'augmentation de la Température moyenne radiante pose problème pour le confort piéton.

La conception bioclimatique des bâtiments garantit une consommation énergétique réduite à longueur d'année.

L'utilisation simultanée de toutes ces stratégies génère de meilleurs gains de fraîcheur.

Cependant l'action de la configuration urbaine sur l'ensoleillement et les mouvements d'air peu contrecarrer leurs bienfaits.

Le chapitre suivant se concentrera sur la définition de la géométrie urbaine, la définition de ses différents indicateurs, et l'évaluation de son effet combiné avec les stratégies d'amélioration du microclimat et le confort du piéton et l'habitant.

.

Chapitre III:

La géométrie urbaine

« ...l'homme peut encore agir puissamment sur le climat local par le seul fait d'une implantation de bâtiment d'une épaisseur, d'une largeur et d'une hauteur déterminée. La répartition des bâtiments et leur volume sont à considérer en fonction du soleil, de ses variations et de ses positions respectives aux diverses saisons, ainsi qu'en fonction du vent et de son rôle dans la détermination du climat régional et local.»
Auzelle. R,1950.

Introduction

Par la lecture de son plan de masse, la ville se présente comme une composition d'éléments physiques pleins, les bâtiments, et des vides qui ne sont autres que les espaces publics urbains, appelés aussi par, le mouvement moderne, espaces ouverts (Giedion, 1941). Ils incluent tous les espaces creux : la rue, la ruelle, l'avenue, le passage, le square, la place, la placette, les espaces verts, les zones de recul devant les bâtiments,... etc.

Ces vides où se crée la sociabilité sont l'impulsion de la ville. Leur bonne conception garantit leur fréquentabilité et améliore la santé physique et psychologique des citoyens. Les longues heures passées à l'intérieur limitent le contact avec la nature et le soleil, et une longue absence de relaxation physique et psychologique peut entraîner des effets de détérioration de la santé comme la myopie, l'obésité, la dépression et l'incapacité à se concentrer (Rose et al., 2008 ; Fan, M et al., 2013; Parsons, R, 1991; Hartig, T.et al., 1991).

Plusieurs recherches ont démontré que les paramètres microclimatiques sont de prime importance pour leur succès et jusqu'à un certain point déterminent l'usage que l'on en fait (Boussoualim et al., 2002 ; Nikolopoulou et al., 2004 Gehl, 1971 ; Bergström ,2004).

C'est au niveau de la morphologie urbaine que les enjeux microclimatiques sont les plus importants. En effet à cette échelle, la géométrie des bâtiments et leur mode d'occupation du sol interviennent sur les écoulements d'air et l'ensoleillement. Elle s'est avérée avoir un grand rapport avec la formation de l'ICU (Steadman 1979 ; Putra, 2004) et la consommation énergétique (Salat, 2010).

Ainsi tout choix de densité et de profil urbain et d'organisation au sol agit sur la chaleur stockée dans les bâtiments et le sol et par conséquent sur le bilan thermique global.

Dans ce chapitre, on essayera de déterminer les indicateurs de la géométrie urbaine en se focalisant sur le concept place pour limiter le champ de notre recherche ; définir les caractéristiques géométriques de cette configuration urbaine , comprendre sa contribution dans la définition du microclimat urbain, et définir les critères auxquels elle devrait répondre pour participer à la régulation thermique du microclimat urbain, le confort piéton ainsi que l'ambiance thermique des intérieurs des bâtiments qui l'entourent.

III-1- Définition du concept place :

"La place est sûrement le premier type d'espace urbain inventé par l'homme. Elle résulte du groupement de maison autour d'un espace libre. Cette configuration permettait un maximum de contrôle public dans l'espace intérieur, et constituait aussi un bon dispositif de défense à l'extérieur, parce qu'elle minimisait la surface de front à protéger." (Krier, 1975).

Cette forme de regroupement autour d'une cour fut choisie comme type de construction pour de nombreux lieux de cultes (agora, forum, cloître, cour de mosquée).

"L'invention de la maison à patio fait référence à cette disposition spatiale (l'atrium) : dans ce cas les pièces ont été disposées autour d'une cour comme des maisons isolées autour d'une place." (Krier,1975).

La place est un espace public particulier : essentiellement, mais pas exclusivement, minérale, car la place est traditionnellement dépourvue de végétaux à l'exception d'arbres sur tronc assurant la protection contre le soleil et les intempéries (Nicholas, 2014).



Fig. III-1: La place centrale à sienne (Italie) sans végétation.

[http:// : www.cartage.org](http://www.cartage.org)



Fig. III-2 : La place d'Armes à Blida (Algérie) avec végétation.

[http:// : www.delcampe.net](http://www.delcampe.net)

Dés ses origines, l'histoire des places est double :

- **Fonctionnelle** : car support des fonctions essentielles de la cité qui sont l'échange et la rencontre. La place est ainsi un lieu de circulation dédié au stationnement des piétons, propice aux rendez-vous, aux petits et grands rassemblements, à la discussion, au jeu, au lèche-vitrine ou à la restauration sur terrasse. Elle est donc indissociable des usages de sociabilité et de citoyenneté.

- **Formelle** : car c'est un vide dont la forme est un élément du paysage urbain que les dictionnaires définissent comme " *un lieu public découvert et bordé de maison ou de monument*" ou comme "*un large espace découvert auquel aboutissent plusieurs rues dans la ville.*" (Larousse 3, 1970).

Cette ambiguïté dans la définition permet d'attribuer ce nom à un nombre d'espaces vides : les ronds-points, les carrefours, les parkings de stationnement devant les édifices, les esplanades..... Mais selon C. Sitte (1980) : "*Le seul fait qu'un espace ne soit pas bâti n'en fait pas pour autant une place urbaine (...) bien d'autres conditions sont requises qui concernent l'ornementation, la signification et le caractère.*"

Selon leur forme, ouverture, fonction ou position, la place peut avoir plusieurs typologies, Gauthiez (2003) a cité plusieurs types de places, nous ne retenons ici que celles concernées par cette recherche :

- **La place promenade** : place à vocation principale de promenade publique. La promenade est facilitée par une forte restriction de la circulation automobile, des aménagements d'accompagnement comme des portiques publics, des terrasses de cafés, des bancs publics et des arbres.

- **La placette** : petite place. Elle est généralement le fruit d'un élargissement ponctuel de la voirie, fortuit ou voulu, dû par exemple à la destruction d'un bâtiment.

- **La cour publique** (enclos) : placette à l'intérieur d'un îlot. Elle peut être le fruit d'un aménagement planifié portant sur l'ensemble de l'îlot. Accessible au public par un passage ou une ruelle ; espace libre public, à l'usage principalement des habitants de l'îlot et pouvant comprendre une aire de jeu. Elle joue ainsi le rôle d'espace semi privé dans les quartiers résidentiels. Elle est encore susceptible de devenir un espace de récréation à l'occasion de vacances et de fêtes de quartier (Korosec-serfaty, 1988).

III-2- Composition urbaine et place

La définition géométrique de cet espace dépend de la manière dont sont disposés les bâtiments qui l'entourent : un espace extérieur ne pourra en effet être vécu comme un espace urbain que s'il possède des caractéristiques géométriques et esthétiques extrêmement lisibles (Krier, 1975).

III-2- 1- La fermeture des places.

Connecté au reste de la ville par des accès de rues qui y débouchent et pourtant visuellement fermées par une certaine disposition du bâti autour de celles-ci.

« *Un espace public ne devient une place que s'il est effectivement fermé. Il est vrai qu'aujourd'hui on appelle ainsi un simple espace vide bordé de quatre rues et destiné pour ne pas être bâti.* " (Sitte, 1980) . La fermeture de la place est assurée par le bâti entourant celle-ci grâce à ses façades. La fermeture ne peut jamais être totale, car la place est normalement connectée au reste de la ville par l'arrivée de rues qui percent le front bâti. En effet, les façades du bâti qui borde la place constituent un système de parois (plus ou moins trouées) pour la place (cf. **Fig. III.3**).

Le rapport entre les pleins (le bâti) et les vides (les ouvertures) le long du périmètre de la place, nous donne une idée de la porosité de ce périmètre.

La disposition des rues est importante. Selon les règles anciennes, une rue doit aboutir aux angles de la place, éventuellement cachée par le décrochement d'un bâtiment, contrairement aux règles modernes où il faut mettre deux rues perpendiculaires à chaque angle. La place du Marché Neuf à Vienne (cf. **Fig. III.3**) est ainsi perçue comme un espace essentiellement fermé, en dépit des nombreuses rues qu'y débouchent.

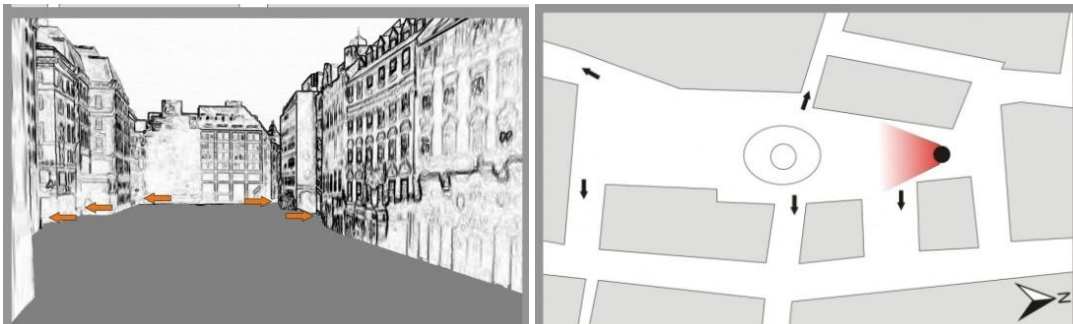


Fig. III.3: Place du Marché Neuf à Vienne. Illusion de fermeture .
<http://unt.unice.fr/uoh/espaces-publics-places>

Un autre moyen d'accentuer la fermeture visuelle de la place consiste en la création d'une porte voûtée à grande ouverture surmontée d'un ou plusieurs étages, fermeture impeccable au regard et facilité de circulation par ses larges ouvertures (cf. **Fig. III.4**).

Les colonnades (Place St-Pierre de Rome) et les loggias constituent d'autres solutions formelles utilisées depuis l'antiquité et jusqu'à l'âge baroque (cf. **Fig. III.5**).

La place baroque et néo-classique peut même concevoir un côté intégralement ouvert sur le grand paysage. Aujourd'hui on va plus vers le dégagement des places comme pour les monuments entraînant la perte de son effet spatial produit dans l'Antiquité.



Fig. III-4 : place de l'amphithéâtre, Lucques (Italie).
<http://www.worldheritagevoyages.com>



Fig. III-5 : Place saint Pierre, Rome (Gymbel.J, 1996).

III-2- 2- Forme d'une place

Pour décrire une place, on fait référence souvent à sa forme carrée, rectangle, ronde, régulière, ou irrégulière. Pour C.Sitte (1980) " même les places médiévales irrégulières et contrairement à ce que l'on pense s'identifient toutes dans la réalité à des figures géométriques connues (carré, rectangle et cercle)". Ces trois formes traitées par

brisure, répétition, combinaison, superposition et altération donnent une infinité de tracés géométriques des places (Krier, 1975).

Du point de vue composition urbaine et selon toujours Sitte, les places carrées sont de mauvaise apparence, les places rectangulaires dont la longueur est de quatre fois supérieure et plus à sa largeur voient leur apparence se dégrader, quant aux places triangulaires, elles sont d'un effet très médiocre et cassent toute illusion d'optique en donnant l'impression que les bâtiments qui l'entourent semblent se heurter brutalement (Tadjari, 1999).

Pour M.J. Bernard et H. Listowski (1984) : *"Du point de vue forme, la place est une boîte, boîte à chaussures, boîte à chapeau, boîte ronde, ovale, rectangulaire ou carrée ; une boîte plus ou moins trouée ou pleine, ouverte ou fermée mais elle a toujours, comme toutes les boîtes, un fond, plusieurs cotés et un couvercle."*

Le fond qui n'est autre que le sol qui peut être plat, incliné ou en gradin. Les parois peuvent être pleines, en claustras ou complètement ouvertes sur des paysages divers. Le plafond est particulier, transparent "...cadre l'ensemble et apporte par la lumière qu'il transmet suivant l'heure, les saisons et le climat, une quatrième dimension au paysage, modifié par les jeux d'ombres et du soleil, du vent, de la pluie, ...etc." (Bernard et Listowski, 1984).

Les facteurs les plus importants sont donc la nature du plancher, les parois, et surtout de leur relation. Cette relation est exprimée à travers les dimensions et les proportions des places.

III-2- 3- Dimensions et proportions des places

Comme pour les formes, il existe des places de tailles différentes, les plus petites sont d'environ 500 m² celles de grandes dimensions sont supérieures à l'hectare.

J.Gehl (2010) note que les places publiques les plus remarquables en Europe sont presque toutes plus petites que 10.000 mètres carrés (100 m × 100 m) et que la plupart sont plus petites que 8.000 mètres carrés.

La forme de la place doit être appréciée également par rapport à la dimension verticale. Régulière ou irrégulière, une petite place entourée par des bâtiments de six ou sept étages prendra la forme d'un canyon tandis que dans l'énorme place la même hauteur de bâtiments parvient à peine à affirmer une dimension verticale autour de l'espace public.

Selon F. Gibberd (1972), "Il est impossible de donner une valeur plastique à un espace –volume quand la surface au sol est trop grande pour qu'il puisse exister un rapport entre le sol et les murs des bâtiments qui l'entourent. Dans la pratique, on limite la hauteur des bâtiments, mais non la surface au sol et on s'aperçoit que d'innombrables espaces urbains sont des échecs parce qu'ils sont si grands que les bâtiments semblent se dresser au bord de l'espace. Les murs et le sol de l'espace se dissocient et l'effet d'enceinte spatiale ne se produit pas."

Cet effet d'enceinte spatiale, sensation d'enclosure, procure à la place la convivialité d'une "salle de séjour" en pleine air. "des dimensions très inégales entre largeur et longueur ou entre ces deux dimensions et la hauteur des parois fait perdre à la place, qui devient ainsi trop ouverte ou trop fermée, sa signification d'espace public clos et procure à l'usager le sentiment de perte" (Maouïa, 2000).

Si la largeur d'un espace public est telle que le cône de vision englobe moins de murs de la place que l'ouverture au ciel, alors le degré d'enceinte spatiale est faible. un rapport de hauteur à largeur de 1: 6 est le minimum absolu requis pour une définition spatiale urbaine appropriée. Un rapport moyen approprié est de 1: 3. En règle générale, plus le rapport est serré, plus le sens du lieu est important (<http://www.cornelius.org>, 2015).

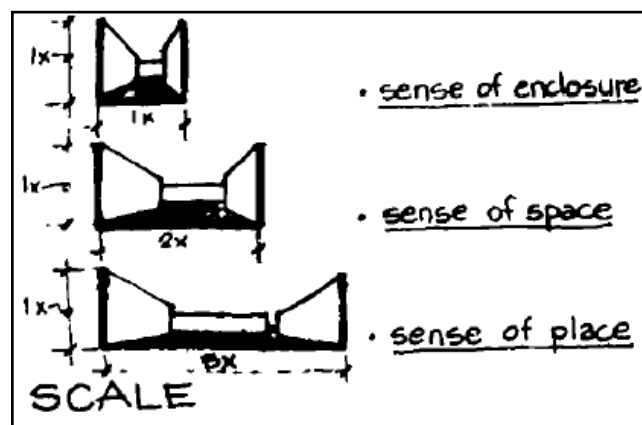


Fig. III-6 : Proportion d'une enceinte urbain (Iselin D.C, 1989).

Il y a un certain accord sur l'étendue optimale des places, basées sur la distance maximale à laquelle un visage peut être identifié, approximativement 24-100 m (Alexandre et al., 1977).

Il faut également tenir compte des informations concernant le mode de vision de la silhouette humaine. A ce titre, on peut se rappeler la distance de 135 m qui constitue la limite de la différenciation d'une action quelconque (Nasar, 1993 ; Alexandre et

al.,1977). Sitte nous indique que les dimensions moyennes des grandes places dans les villes anciennes sont dans cet intervalle :140 m de long et 60 m de large et que la dimension minimale (W) de la place doit être égale à la hauteur (H) du bâtiment principal ($H/W = 1$) et sa dimension maximale (L) ne doit pas excéder deux fois cette hauteur ($H/L = 0.5$) si elle n'est pas justifiée par la forme, la fonction et le type des bâtiments.

Vitruve définit les proportions de la place comme suit: la largeur $W = 2/3 L$. "*par ce moyen la forme en sera longue et cette disposition sera bien plus commode pour y donner des spectacles.*" (Perrault, 1684). Selon J.N Clement (2004) avance une distance maximale de deux à trois fois la hauteur si l'observateur veut voir plusieurs bâtiments à la fois .

Les zones d'activité intense ainsi que celles appartenant au "noyau" de l'espace urbain sont toujours plus attractives que le reste du site. Pour assurer l'existence d'un "noyau", le rapport H/W mesuré entre les façades environnantes et la largeur de l'espace, devrait être maintenu en dessous de ~1:2. (Compagnon et Goyette-Pernot, 2004).

Les schémas qui suivent sont des exemples de quelques types qu'on rencontre le plus fréquemment dans nos villes :

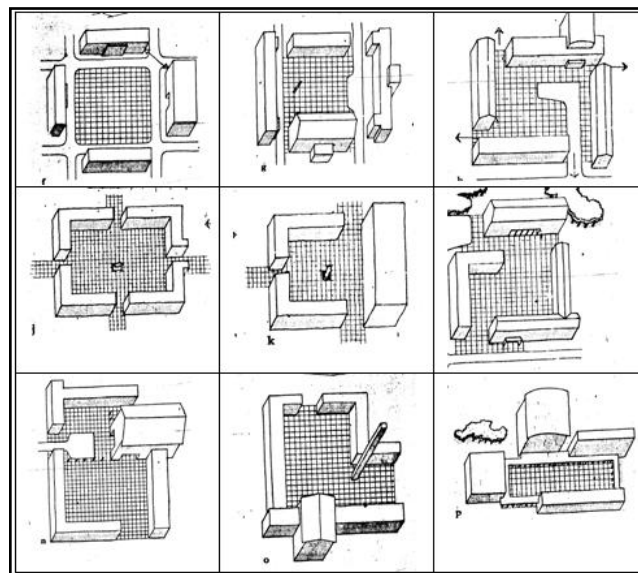


Fig. III-7 : Les tracés des places les plus fréquents dans la ville contemporaine.
Source : Gibberd, F. (1972)

Mais jusqu'à quel degré toutes ces approches concernant les proportions d'un espace urbain réussi du point de vue composition urbaine coïncident- elles avec sa réussite du point de vue confort thermique sujet de cette recherche?

III-3- Microclimat et Place

Dans les recherches sur le climat des villes, la place est considérée comme un creux ou simplement un vide créé par les bâtiments en interaction avec les paramètres climatiques. Cette interaction est génératrice de microclimat (Olgyay, 1963 ; Oke, 1987 ; Givoni, 1998).

La géométrie et les propriétés thermiques des surfaces urbaines se sont avérées être les deux principaux paramètres influençant le microclimat (Oke, 1988; Eliasson, 1990; 1991; Böhm, 1998; Arnfield, 2003) et donc les sensations de confort thermique (Tania et al, 2015).

La géométrie urbaine s'avère plus importante à l'échelle micro que le comportement thermique des matériaux et les effets de l'albédo. Plusieurs chercheurs, pour n'en citer que : Todhunter, 1999 ; Steemers et al., 1998 ; Scudo, 2004 ; Emmanuel et al., 2007 ; Talghani, 2014 ; concluent que l'ombre est plus importante que l'augmentation du rayonnement absorbé dû à la réflectance urbaine et que l'ombre des bâtiments est plus appropriée que l'ombre des végétaux (Gulyas, 2006 ; Picot, 2004 ; Shahab Kariminia, 2015 ; Chatzimitriou et Yannas, 2016).

La géométrie urbaine détermine en effet l'environnement thermique en contrôlant la répartition des zones ombragées et ensoleillées déterminées par l'orientation et la hauteur des bâtiments (Al-Masri et Abu-Hijleh, 2012 ; Almhafdy, 2013) ainsi que les flux d'air générés par la porosité de l'espace au vent (Aggrwal, 2006). Le rayonnement solaire possède une influence plus importante sur la température physiologique équivalente (PET) que la vitesse du vent. Il faut donc contrôler les rayonnements (Makaremi et al, 2012).

Elle a un impact aussi sur la consommation énergétique totale de plus de 30% dans le commercial et 19% dans le résidentiel (Stromann et Sattrup, 2011).

III-3-1- La géométrie urbaine

Ou bien encore morphologie urbaine, forme urbaine, structure urbaine sont des termes dont la définition varie souvent d'un auteur à l'autre, et dont la notion est relativement voisine. Par ces termes, nous faisons référence ici à la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments ainsi que les espaces qu'il crée (De Souza, 2005). Elle est d'une importance primordiale pour le microclimat extérieur (Ahmed et al, Bourbia et Awbi, 2004b).

Les principaux paramètres physiques externes qui interviennent dans le confort thermique sont la température de l'air, l'humidité, le rayonnement solaire et infrarouge et les mouvements d'air. Tous ces éléments sont influencés par la forme de la structure urbaine (Stemmers, 2006).

La comprendre permet aux concepteurs et planificateurs de mesurer les conséquences de leurs dessins et plans sur le site d'implantation ainsi que le confort des utilisateurs et opter ainsi pour des choix stratégiques quant à la conception urbaine et architecturale (Ochao de la torre, 1998).

III-3-1- 1- Descripteurs géométriques d'un espace urbain

En dépit de l'hétérogénéité de la canopée urbaine dans presque n'importe quelle ville, il est utile de décrire le tissu des bâtiments et des espaces ouverts en termes de mesures quantifiables qui expriment sa densité ou d'autres propriétés physiques qui influencent le climat à l'échelle micro. E.Erell et al. (2011) ont défini trois principaux descripteurs de la géométrie urbaine :

a -le canyon urbain :

Un des modèles le plus largement répandus pour décrire la géométrie à l'échelle micro (cf. Fig.III.8). Il se rapporte à un espace linéaire comme une rue de largeur W (width en anglais) bordée de deux cotés par des murs des bâtiments adjacents de hauteur H de longueur semi-infinie en négligeant les jonctions (Oke,1987 ; Syrios et al, 2008).

Les places avec des rues le long des façades, c-à-d sans effet de coins (cf. Fig.III.9) ont un comportement semblable à ces rues à cause de la pénétration du rayonnement solaire sur les côtés (Scudo et al., 2004).

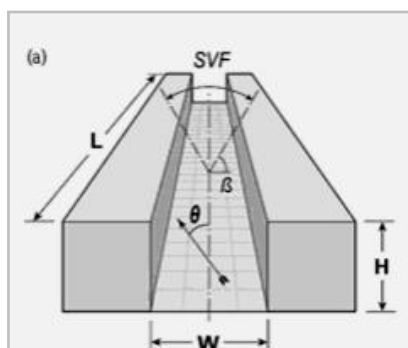


Fig.III.8 : Un canyon symétrique et ses descripteurs (Erell et al., 2011).



Fig.III.9 : Le rapport d'aspect d'une place. (Lenzholzer et Koh, 2010)

La géométrie du canyon urbain est à son tour décrite par :

a-1- Le rapport d'aspect :

L'un des paramètres clés dans la détermination de la géométrie du canyon. Défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments qui entoure l'espace sur sa largeur. La valeur de ce rapport définit trois typologies de canyon (Ahmad et al., 2005).

- **Homogène** : sans grandes ouvertures sur les murs, avec un rapport d'aspect d'environ 1. Le ciel et les façades sont vues angulairement de manière équivalente : on peut donc avoir en même temps un ensoleillement direct et un éclairage par les façades. Il est à noter que le refroidissement de ce dernier se produit plus difficilement, à cause de la présence de la surface verticale qui lui masque une partie du ciel.

- **Peu profond** : tout espace libre avec un rapport d'aspect inférieur à 0,5. Il est exposé à un rayonnement très important du soleil et du ciel. Avec des faibles vitesses de l'air, la température de surface au sol dépend essentiellement de l'albédo qui règle la quantité d'énergie absorbée.

- **Profond** : si le rapport d'aspect est supérieur ou égal à 2. Comme son nom l'indique, c'est un espace étroit où le rayonnement ne parvient pas à pénétrer sauf s'il se présente dans le plan axial du canyon, ce qui dépend de l'orientation de ce dernier. Le rayonnement solaire est alors piégé et peut provoquer des échauffements instantanés importants mais la durée de ce phénomène est faible à l'échelle de la journée suivant l'orientation de la rue (Benadji, 1999). Le sol s'échauffe peu et l'air y est en général très calme ce qui rend la possibilité de leur ventilation très limitée en cas de surchauffe.

Plus le rapport H/W est élevé, soit il s'éloigne du 0 (**cf.Fig.III.10**), plus on remarquera le phénomène de l'îlot de chaleur nocturne (Arnfield, 2003; Oke et al., 1991).

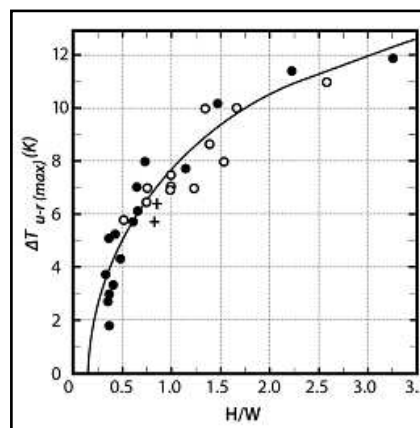


Fig.III.10 : Relation de l'intensité de l'ICU nocturne et le rapport H/W.
(Oke, TR, 1987)

Cependant on peut obtenir une température diurne inférieure à celle de la campagne avoisinante. Ce phénomène est appelé *îlot de fraîcheur* (cool island).

Le profil de température est à l'opposé au cours de la journée. Shashua-Bar et al. (2004, 2006) ont révélé qu'un plus grand espacement entre les bâtiments pourrait conduire à une augmentation de la température de l'air pendant la journée de 4,7 K par rapport à la référence météorologique.

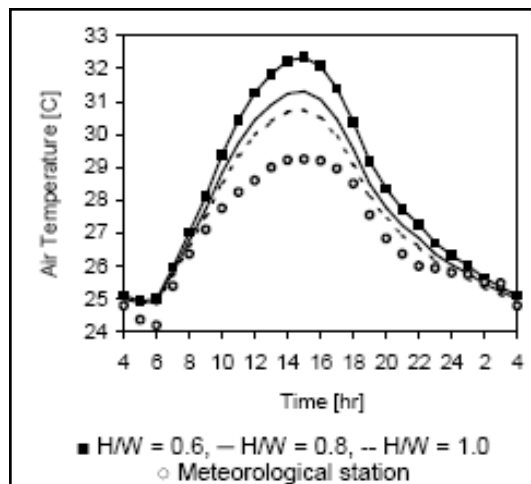


Fig.III.11 : Effet du rapport H/W sur les températures de l'air
(Shashua-Bar.L et al., 2006)

Bourbia et Awbi (2004a) ont observé dans le climat chaud et aride d'El Oued (33° N, Algérie) une différence de température de l'air de 4 °C entre les larges canyons (H / W = 0,5) et les canyons étroits (H / W = 2).

Bourbia et Boucheriba (2010) ont mesuré la température de surface et de l'air dans sept sites avec différents rapports d'aspect (de 1 à 4,8) à Constantine (36°15 N, Algérie) à climat semi-aride. Elles ont trouvé que les canyons profonds étaient de (3- 6 ° C) et de 12 °C inférieures respectivement en température de l'air et de surface par rapport aux canyons peu profonds.

La longueur de la rue L représente la distance entre deux intersections principales. Elle aussi classe les cagnons en court cagnon (L/H = 3), moyen (L/H = 5) et long (L/H = 7) (K. Ahmad ,2005).

a-2- Orientation du canyon

Par rapport à la course solaire, définie principalement la durée d'ensoleillement. Elle est déterminée par la direction de l'élongation du canyon. Mesurée en degrés ; elle

définit l'angle de deviation (Θ) de de l'axe du canyon de l'orientation nord dans le sens des aiguilles d'une montre. Elle est décrite selon les directions cardinales Nord-Sud (N-S) ou Est-Ouest (E-O) ou diagonales Nord-ouest –Sud-est (NO-SE) ou Nord-est - Sud-ouest (NE-SO).

Selon la plus part des études, le rapport H/W et l'orientation sont les principaux paramètres géométriques responsables des changements microclimatiques dans ces creux urbains. Ils affectent donc les environnements extérieurs et intérieurs, l'accès solaire à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, la perméabilité pour la ventilation urbaine, ainsi que le potentiel de refroidissement de l'ensemble du système urbain (Ali-Toudert et Mayer, 2006 ; Arnfield et Mills, 1994 ; Todhunter, 1990).

L'orientation du canyon est très significative pour la quantité d'énergie solaire incidente sur les parois verticales contrairement au rapport d'aspect H/W qui influence la disponibilité de l'énergie solaire sur le sol. Fondamentalement, le sol reçoit plus de rayonnement solaire par comparaison aux surfaces verticales (Arnfield, 1990).

Dans sa recherche par simulation qui a concerné des rapports d'aspect de 0.25 - 4 et d'orientation N-S et E-O pour toutes les latitudes et les saisons, J. Arnfield (1990) a conclu que l'impact de l'orientation est plus significatif pour les latitudes comprises entre 20° - 40° pour différentes saisons notamment en été qu'en hiver.

Swaid et Hoffman (1990) ont constaté que dans les régions chaudes, les villes avec des rues nord-sud ont des intensités d'îlot de chaleur urbaines plus faibles (0.8° C) que les villes avec des rues Est-ouest. Leur analyse de sensibilité a montré comment l'augmentation des rapports d'aspect se traduit par un «îlot de fraîcheur» diurne plus fort en raison de l'ombre accrue et un îlot de chaleur nocturne plus faible dû à une température maximale sensiblement réduite.

Une étude combinant orientation et ratio H/W sur la ville d'Athènes (38°N) où le programme Ecotec a été employé par F. Bougiatioti afin d'analyser l'ombrage et l'insolation pour les surfaces horizontales (le sol) et verticales (façades de bâtiment) pour différentes configurations d'espaces ouverts (H/W = 0.1, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 3) selon les quatre orientations principales et pour la journée typique du 21 Juin (cf. Fig. III.12).

Les résultats de l'étude, confirmées par d'autres recherches, sont récapitulés dans les deux tableaux suivants* :

* Noter pour les tableaux (III.1 et III.2) : Dans les cas, qui sont dénotées avec (x), la surchauffe des matériaux peut ne pas être comme critique parce que les surfaces sont en partie ombragées (de 10-30%).

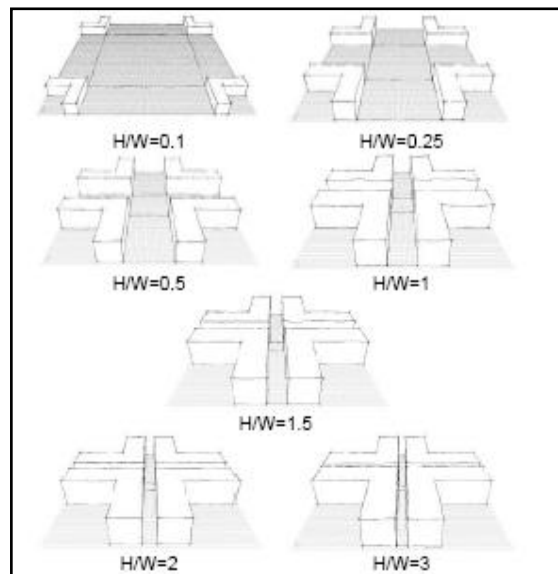


Fig.III.12 : Différents ratios H/W configurés dans l'étude sur Athènes.
(*Bougiatioti. F, 2006*)

Tab.III.1: Résultats du scénario du " cas extrême de surchauffe" pour les surfaces horizontales pour différents ratios (H/W) et différentes orientations.
(*Bougiatioti. F, 2006*).

	0	.1	.25	.5	1	1.5	2	3
N-S	x	x	x	x	(x)			
E-W	x	x	x	x	x	x	(x)	
NE-SW	x	x	x	x	x	(x)		
NW-SE	x	x	x	x	(x)			

De l'étude du tableau **Tab.III.1** pour les surfaces horizontales, on peut conclure que:

- Pour toutes les orientations la surchauffe en été est liée aux ratios H/W de 0 à 0.5 (ou à 1). Ali-Toudert et Mayer (2006) ont trouvé le même résultat pour un H/W = 0.5 à Ghardia (32.40° N). Pour cet intervalle (Harbich et al., 2013) recommandent de l'ombre sur les zones piétonnes et sur les façades pour atténuer la contrainte thermique.
- le confort thermique est indépendant de l'orientation pour un rapport H/W= 3. Ali-Toudert et Mayer (2006) ont trouvé le même résultat pour un rapport H/W= 4 exception pour le pic noté à 13 heures. Ceci souligne les différences induites par la situation géographique des villes.
- Pour les configurations avec une orientation NE-SO, la surchauffe inclut également des cas plus étroits, avec ratio de 1 (ou de 1.5). Un canyon orienté NE-SO est donc

thermiquement plus stressant qu'un canyon orienté NO – SE (Ali-Toudert, et al., 2005 ; Bourbia et Awbi, 2004b).

La surchauffe des surfaces horizontales dont l'axe principal est orienté E - O est probable en été même pour un ratio égal à 2, car les rues orientées E-W sont sujettes à une période prolongée de l'exposition au soleil pendant l'été par rapport aux rues orientées N-S (cf. **Fig.III.13**).

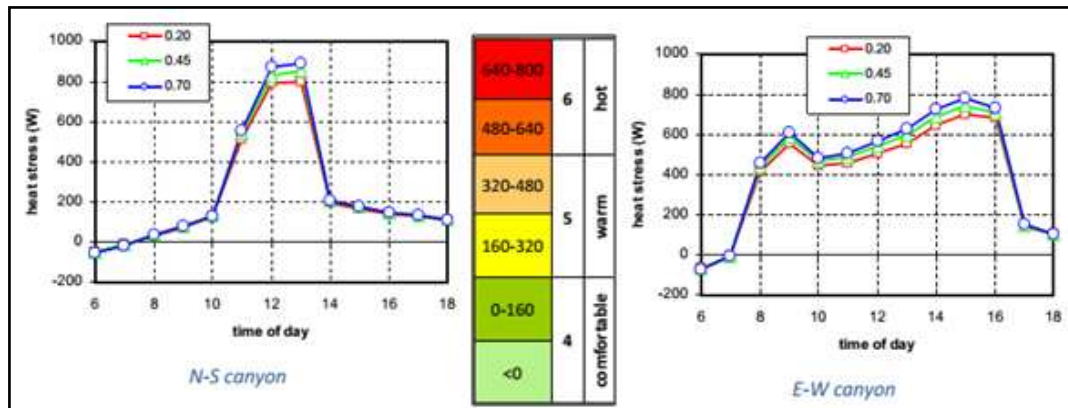


Fig.III.13 : Effet de l'orientation du canyon urbain sur le confort piéton pour des valeurs d'Albédo 0.2, 0.45 et 0.7. (Erell, E et al., 2013)

- Ali-Toudert et Mayer (2004) ont conclu que de meilleures conditions de confort pourraient être créées en faisant tourner le canyon à une orientation NE-SO ou NO-SE. car les effets d'ombrage des murs sont plus efficaces en été par rapport aux rues orientées E-O. De plus, en hiver plus d'accès solaire est fourni par une orientation NE-SO ou NO-SE par rapport à l'orientation N-S. Néanmoins, une orientation NE-SO permet une exposition solaire le matin alors que l'orientation NO-SE implique une exposition des murs dans l'après-midi, ce qui pourrait provoquer une surchauffe pour les espaces intérieurs.

Dans tous les cas des surfaces horizontales mentionnées ci-dessus, la surchauffe des matériaux à midi et l'après-midi des jours d'été peuvent contribuer à la dégradation des conditions microclimatiques et par suite du confort thermique dans les espaces urbains de la ville. Pour cette raison, elle devrait être prise en compte sérieusement par les architectes et les urbanistes (cf. **Chap.I**).

Pour les surfaces verticales, de l'étude du **tableau III.2** ci-dessous, on peut conclure que:

Tab.111.2 : Résultats du scénario du « cas extrême de surchauffe » pour les surfaces verticales pour différents ratios (H/W) et différentes orientations. (Bougiatioti. F, 2006)

	0	.1	.25	.5	1	1.5	2	3
E	x	x	x	x	(x)			
W	x	x	x	x	(x)			
N								
S	x	x	x	x	x	x	x	x
NW	x	x	x	x	x	x	x	(x)
SE	x	x	x	x	x	x		
NE	x	x	x	x	x	(x)		
SW	x	x	x	x	x	x	(x)	

- Pour les surfaces verticales avec orientation Est et Ouest, incluant les configurations urbaines avec un ratio de 0 à 0.5 (ou à 1), les façades nord ne surchauffent jamais, en raison des quelques heures d'insolation et de l'altitude du soleil par contre ceux d'orientation Sud ne sont jamais ombragées durant l'été même pour un ratio H/W de 3.
- Les façades du Nord-ouest peuvent surchauffer avec des ratios s'étendant de 0 à 2 (ou à 3), tandis que pour celles du Sud-est l'effet du ratio est plus prononcé et la surchauffe peut se produire jusqu'à $H/W = 1.5$.

Les matériaux qui constituent les façades Nord-est peuvent atteindre leurs températures de surface maximum quand l'espace ouvert urbain ait un ratio allant de 0 à 1 (ou à 1.5). Pour les façades du Sud-ouest, ces cas incluent des cagnons plus étroits soit de 1.5 (ou de 2).

Dans tous les cas de façades des bâtiments mentionnés ci-dessus, la surchauffe des matériaux dans différentes périodes du jour, selon leur orientation, durant l'été, peut avoir un effet négatif sur le microclimat urbain, le confort thermique des piétons et des bâtiments bordant l'espace surtout s'ils sont mal isolés (**Voir infra**).

Augmenter la hauteur réduit aussi le stress thermique. Ali Toudert et Mayer (2007) en augmentant le rapport d'aspect de 1 à 2 ont enregistré une amélioration maximale de 24 K des valeurs de la PET.

Shahab Kariminia et al. (2015), à Ispahan, en Iran à hiver froid et été chaud, ont trouvé qu'un ratio H/W élevé était la stratégie privilégiée pour améliorer le confort thermique en été. Cependant, sa pertinence peut être partiellement inhibée par une orientation inappropriée. Augmenter le ratio d'aspect de 0.1 à 0.3 atténue le stress thermique pour toutes les orientations, cependant, l'amélioration observée était plus efficace pour les orientations N-S ou NO-SE qu'E-O notamment dans les heures critiques de la journée.

Kalman et al. (2013) ont augmenté le rapport d'aspect de 0.2 à 1.2 en ajoutant le nombre d'étages de 1 à 6. Ils ont obtenu une nette amélioration de la sensation thermique pour l'orientation N-S sauf pour le pic de midi (cf. Fig. III.14).

Cette étude a également quantifié la consommation énergétique pour les différents étages. Les données indiquées sur la figure III.15 pour chaque étage sont la moyenne de 4 appartements, qui affichent des variations entre eux-mêmes en raison de différentes orientations.

Plus le bâtiment est élevé plus la charge thermique diminue. La plus petite charge totale est observée pour le rez-de-chaussée, qui bénéficie de la masse thermique du sol gardant des températures relativement stables. Les plus grandes charges totales sont pour l'étage supérieur exposé au rayonnement élevé d'été et au vent froid d'hiver. Les étages intermédiaires ont tous des besoins énergétiques très similaires.

L'augmentation de la charge de refroidissement d'été du à l'ICU est compensée par la réduction du chauffage en hiver.

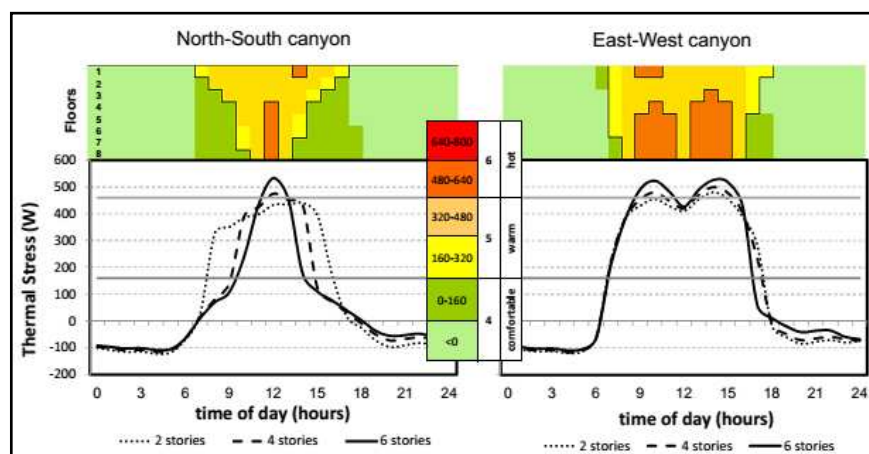


Fig.III.14 : Effet de l'augmentation de la hauteur sur la sensation thermique. (Kalman. Y et al., 2013)

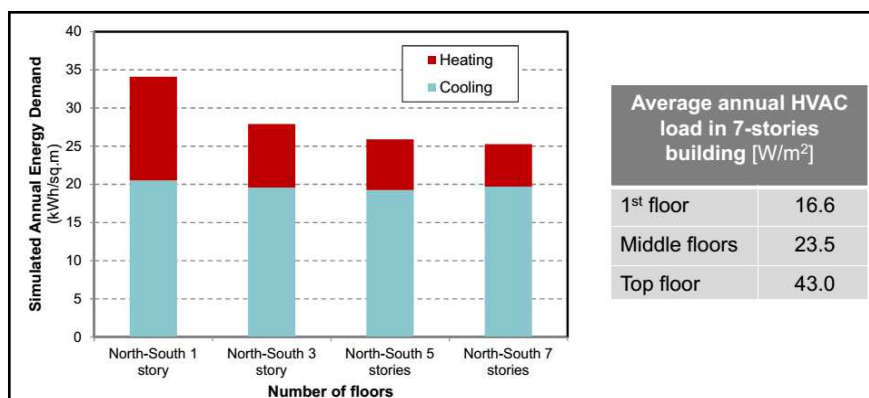


Fig.III.15 : La charge thermique annuelle diminue en augmentant le nombre d'étages (hauteur). (Kalman. Y et al., 2013)

Plusieurs recherches dans le monde ont essayées de définir la plage optimale de ce ratio. Dans la ville d'El-Oued (33°N) en Algérie, basse latitude, par simulation, Bourbia et Awbi (2004b) ont trouvé que la meilleure orientation des canyons est le nord-sud avec une marge de ratio comprise entre 1 et 2 en considérant les deux saisons chaude et froide.

Kitous et al.(2006) dans une étude sur les variations de la température de l'air diurne en fonction du profil des rues à Ghardaïa (32.40°N) ont trouvé que les fluctuations de la température de l'air restaient très faibles pour des prospects de rues compris entre 2.7 et 6.2. Ils ont conclu que si la compacité urbaine est efficace dans la réduction des températures de l'air, elle demeure néanmoins limitée à partir d'un certain seuil de prospect compris entre 1.7 et 2.

Ali-Toudert et Mayer (2004) concluent que les canyons profonds ($H/W \geq 2$) sont plus appropriés pour les régions chaudes car ils réduisent l'accès solaire en général. En revanche, les canyons homogènes et peu profonds ($H/W \leq 0.5$) conviennent aux zones froides nécessitant plus d'accès d'énergie solaire tout au long de l'année.

T.R.Oke (1988) a étudié l'intervalle de ce ratio pour une ville hypothétique de mi-latitude a suggéré une valeur comprise dans l'intervalle $0.4 < H/W < 0.6$ et une densité bâtie variant entre 0,2 et 0,4 permettaient d'offrir aux piétons un certain degré de protection contre le froid l'hiver et de dissiper la chaleur l'été. Ceci représente un compromis acceptable qui satisfait les critères pour un confort thermique exigeant un grand rapport et les critères pour dissiper la pollution exigeant un faible rapport.

Cet intervalle a été validée par J.Arnfield (1990) et il a rajouté que cet intervalle est souhaitable pour toutes les latitudes surtout pour les climats caractérisés par une fréquente nébulosité où le contrôle de l'accès solaire par la manipulation de la géométrie des rues est difficilement réalisée. En appliquant ces recommandations sur la chaude et humide côte de Palestine, Shaviv et al.(1998) indiquent que cette marge de ratio est affectée par l'orientation.

b - Sky view factor (SVF)

Le SVF définit la quantité de ciel visible depuis un point (De Souza *et al.*, 2003).

Il détermine les échanges de chaleur par rayonnement entre l'espace et le ciel.

Ce facteur ne dépend ni de la latitude, ni de l'orientation, ni même du moment de l'année, mais seulement de la géométrie. Le SVF vaut 1 au cas d'une surface horizontale dégagée où aucun obstacle n'empêche la vue (100% du ciel) alors qu'il

diminue quand la vue est obstruée (cf. Fig. III.16). Une surface verticale et sans obstruction voit 50% de la voûte céleste.

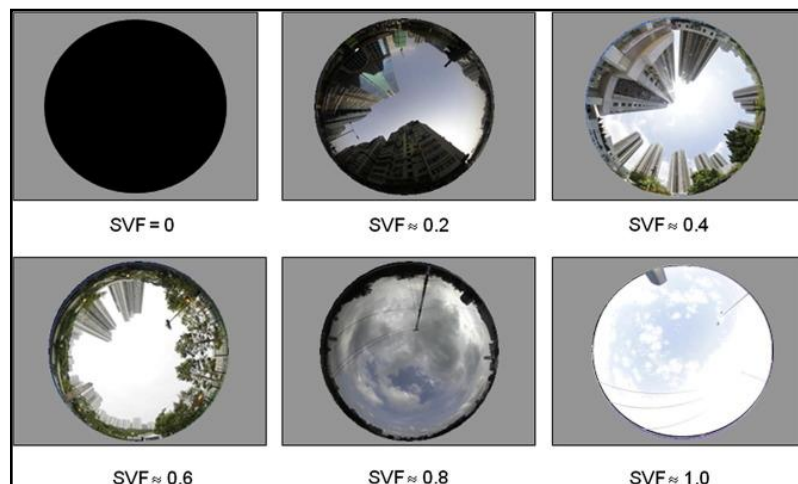


Fig. III.16 : Photos Fish-eye des différentes valeurs du SVF .
(Lai P.Ch et al., 2013)

Le SVF peut être directement lié au rapport H/W pour des canyons homogènes (cf. Fig. III. 17).

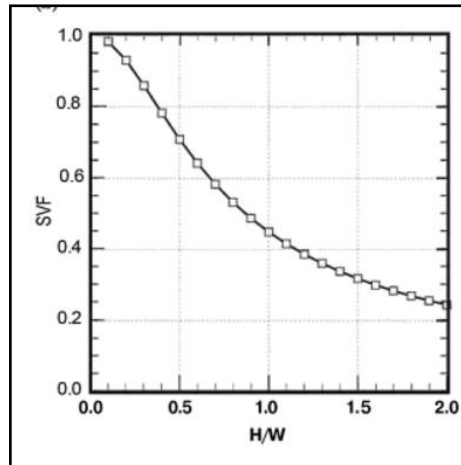


Fig. III. 17 : Le SVF en fonction du rapport d’aspect H/W.
(Erell. E et al., 2011)

Mesuré depuis l’axe central d’un canyon urbain symétrique , le SVF est estimé par la relation suivante :

$$SVF = \cos b \dots \dots \dots Eq. III.1$$

Où $b = \tan^{-1}(H/ 0.5W)$

Quand il s'agit d'un canyon asymétrique, il est donné par la formule

$$SVF = \frac{\cos \beta_1 + \cos \beta_2}{2} \dots \dots \dots \text{Eq.III.2}$$

où : $\beta_1 = \tan^{-1}(H_1/0.5W)$ et $\beta_2 = \tan^{-1}(H_2/0.5W)$.

et H_1 et H_2 sont les hauteurs moyennes sur les deux côtés du canyon.

Le SVF peut être estimé aussi pour d'autres types d'espace dont la géométrie est régulière mais diffère du canyon urbain linéaire comme les places et les enclos rectangulaires :

$$SVF \approx \cos \beta_w \cos \beta_L \dots \dots \dots \text{Eq.III.3}$$

où : $\beta_w = \tan^{-1}(H/0.5W)$ et $\beta_L = \tan^{-1}(H/0.5L)$.

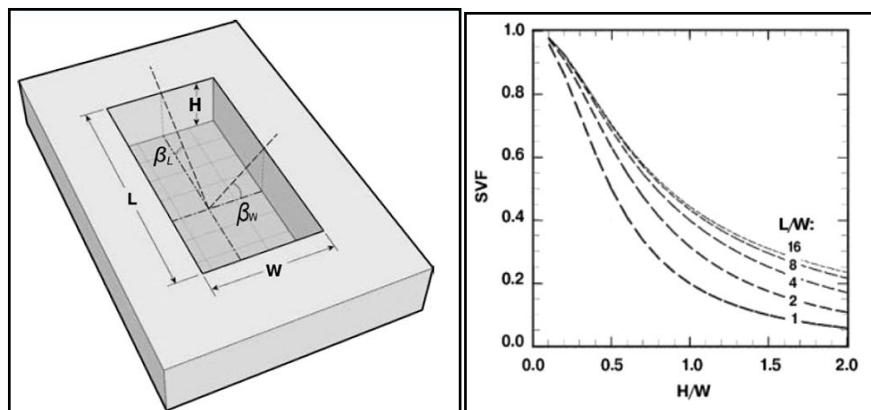


Fig.III. 18: Une vue schématique du type cours rectangulaire et ses descripteurs géométriques avec une approximation du SVF en fonction du L/W et H/W. (Erell. E et al.,2011)

En cas des géométries plus compliquées, photos Fish-eye où Logiciels tels que RayMan, Townscope, Envi-met.....peuvent l'estimer.

Il faut noter qu' un changement de SVF de moins d'un dixième est peu susceptible d'être de toute grande importance (Johnson et Watson, 1985).

Plusieurs recherches le considère comme la variable la plus significative dans la description de la géométrie urbaine en vue de la mise en évidence du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) (Oke, 1987 ; Unger, 2009) car largement lié au

refroidissement nocturne des surfaces urbaines. Il est utilisé aussi pour estimer le rayonnement diffu en cas d'un ciel couvert.

Le SVF est considéré en tant qu'un des facteurs morphologiques les plus importants qui ont des impacts essentiels sur le climat urbain.

Une forte corrélation entre l'intensité maximum de l'ICU, $\Delta T_{u-r}(\max)$, et le SVF a été trouvé (Oke, 1987).

$\Delta T_{u-r}(\max)$ conclu par Oke est fonction de la moyenne du SVF (ψ) au-dessus d'un grand secteur urbain:

$$T_{u-r}(\max) = 15.27 - 13.88 \psi \dots\dots\dots \text{Eq. III.4}$$

M.J. Alcofarado et al. (2000) dans leur étude sur les variations locales de la température de l'air dans le centre ville de Lisbonne relativement dense sur une période de mesure qui s'est étalée d'août 1998 à juillet 1999, où deux thermo-hygrographes ont été installés l'un dans une rue canyon et l'autre dans une cour urbaine de l'ancien tissu du centre ville, ont observé une différence moyenne nocturne de 4°C de la périphérie vers le centre. Cependant durant le jour en été, ce même centre se comporte tantôt comme un puits de fraîcheur conséquence des brises d'été, tantôt comme puits de chaleur causé par les différences géométriques urbaines.

I. Eliasson (1991) mène à l'échelle de la rue, une étude quantitative dans la ville de Göteborg, située à l'ouest de la Suède. Il s'agit de comprendre la relation entre la géométrie urbaine et la variation des températures dans deux secteurs urbains du centre ville : le secteur nord expose un SVF des rues canyons qui varie entre 0.25 et 0.45. Le deuxième secteur situé dans la partie sud de la ville présente une géométrie irrégulière. Les valeurs du SVF des rues varient entre 0.5 et 0.9.

Les résultats de cette recherche montrent une corrélation forte entre le SVF et la température de surface dans le bilan local. Ils montrent aussi un phénomène d'îlot de chaleur urbain.

La différence de température de l'air entre le centre ville et le grand square avoisinant est de 4°C en moyenne. Ce différentiel est du même ordre que celui constaté entre la température urbaine et rural qui varie entre 3.5°C et 6°C.

Une différence entre $1^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}$ a été enregistrée entre la ville et la campagne du 11 au 12 Octobre 1988 de 14h- 6h (Eliasson, 1990/91).

Donc le SVF est un facteur de contrôle essentiel de l'effet d'îlot de chaleur urbain, et peut être employé pour l'ajuster. Le diminuer ou l'augmenter selon les conditions climatiques locales.

Contrairement aux températures de surface, les températures de l'air dans le bilan local n'ont pas une corrélation évidente avec le SVF car les résultats sont plutôt contradictoires (Putra et al., 2004) puisque la température de l'air dépend des facteurs régionaux plus complexes (Unger, 2004).

L.C.L De Souza et al. (2005) ont étudié numériquement vingt canyons urbains d'un même voisinage résidentiel de la ville moyenne brésilienne Bauru. Une gamme étendue des valeurs du SVF (0.7 – 0.9) a été choisie.

Les canyons sont orientés selon deux orientations NE-SO et NO- SE.

L'analyse des températures (surfaciques et de l'air) révèle :

- une forte corrélation entre les températures de l'air et le SVF.
- une forte corrélation entre les températures de surface et le SVF.

Mais son sens (négatif ou positif) diffère avant et après 15h.

- Les canyons d'orientation NE-SO sont les plus chauds et les plus consommateurs d'énergie contrairement à ceux orientés NO-SE .
- Pour une même orientation, le SVF est un bon indicateur de consommation électrique et de température.
- L'intervalle moyen des SVF étudiés soit 0.7-0.8 présente les meilleurs résultats pour une orientation NO-SE (**cf. Fig. III.19**).

Les géométries de cette classe sont de 20 % moins consommateurs d'énergie que le deux autres classes (> 0.8) et comprises dans l'intervalle 0.6-0.7.

- La consommation diffère selon les saisons pour chaque classe.

Pour un $\text{SVF} > 0.8$, elle présente 6 % de plus en été qu'en hiver ,vue la grande pénétration des rayons solaires contrairement aux deux autres classes où la demande en énergie est supérieure en hiver qu'en été. Elle est de 20% de plus pour la classe de SVF 0.7-0.8 et de seulement 8% de plus pour la classe de SVF 0.6-0.7 à cause des faibles vitesses du vent et des déperditions.

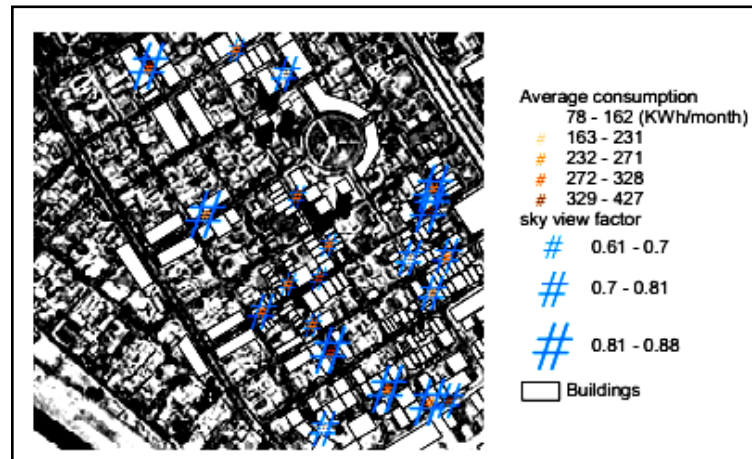


Fig. III.19 : La consommation électrique global évaluée en fonction du SVF.
(*De Souza. L.C.L et al., 2005*)

Le SVF est un des indicateurs principaux ayant une influence significative sur le confort thermique depuis qu'il est corréllé à la température de surface et employé pour dériver la température moyenne radiante (T_{mrt}). Au fait, le SVF a été pris comme facteur principal dans la détermination de la (T_{mrt}) dans le modèle prédictif RayMan (Matzarakis et al., 2006).

Dans le cadre du projet Climlis, le quartier résidentiel à Lisbonne Telheires dont les bâtiments ne dépassent pas une hauteur de 25m avec un rapport H/W = 0,65 et 1.1 est sélectionné afin d'étudier les conditions bioclimatiques par H. Andrade et al.2003. Température de l'air, rayonnement global et rayonnement terrestre ont été mesurés. La température moyenne radiante a été calculée par le modèle RayMan. La PET a été calculée dans 10 endroits représentant des différences microclimatiques durant deux périodes, 24 jours en juin et juillet et 10 jours en février 2000 (cf. **Fig. III.20**).

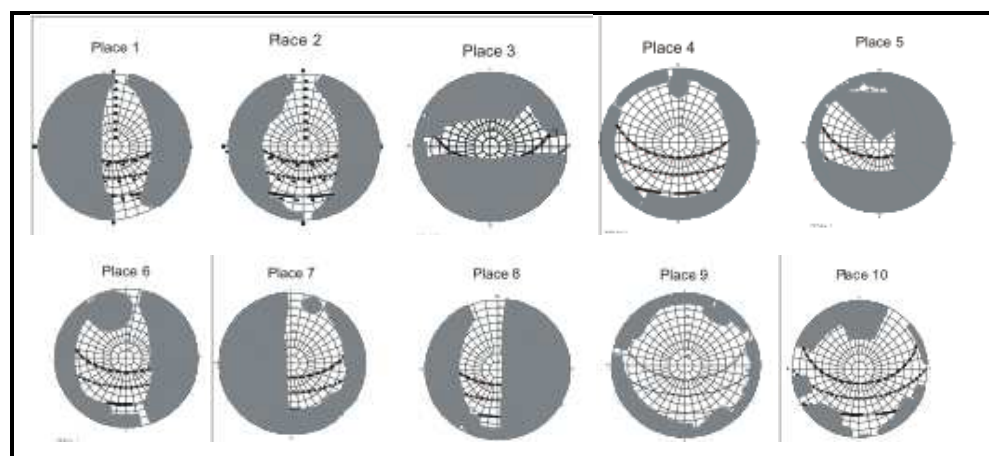


Fig. III- 20 : Diagrammes polaires des dix stations de mesures à Telheires.
(*Andrade. H , 2003*)

Durant la nuit, des faibles variations de la température de l'air ont été relevées. La valeur de la différence moyenne entre les espaces était de 0.6°C en hiver et 0.8°C en été. La température de l'air a une corrélation négative très significative avec le SVF en été d'où $R^2 = 0.72$, contrairement à l'hiver où $R^2 = 0.51$.

Les températures de l'air les plus élevées sont presque toujours liées aux sites 3 et 5 aux faibles SVF et les plus basses dans les sites 9 et 10 les plus ouverts.

Pendant le jour, la différence thermique était plus grande. Une moyenne de 1.9°C en hiver et 3.2°C en été ont été trouvées.

Les résultats de la modélisation de la T_{mrt} ont montré une forte corrélation négative entre le SVF et la T_{mrt} la nuit, cependant cette relation était beaucoup plus compliquée durant le jour. La T_{mrt} était élevée dans tous les espaces ouverts à grand SVF surtout ceux présentant des ouvertures vers le Sud et l'Est et avec albédo élevé.

La PET a des plus grandes variations que la température de l'air. Elle dépend du contraste entre la T_{mrt} et la vitesse du vent. La nuit, la valeur moyenne de la différence maximum de la PET était de 3.5°C en été et 3.9°C en hiver avec une corrélation négative avec le SVF ($R^2 = 0.79$ en été et 0.65 en hiver).

Les plus grandes valeurs de la PET ont été enregistrées dans les espaces 3, 5, 7, et 1 (cf. Fig. III- 20) soit aux plus faibles SVF. Le jour, la différence maximale était de 13.1°C en été et 8.9°C en hiver. La différence dépend principalement des conditions du rayonnement soit le SVF et à un degré moindre de la vitesse du vent.

La PET obtenue par le modèle SIG (cf. Fig. III- 21) pour la période d'été durant la nuit (tous les espaces ont été soumis à la même température de l'air et la même vitesse du vent 2.1 m/s de direction nord.) était supérieur à 18°C , les valeurs élevées de la PET ($> 23^{\circ}\text{C}$) ont été enregistrées dans les endroits à faible SVF.

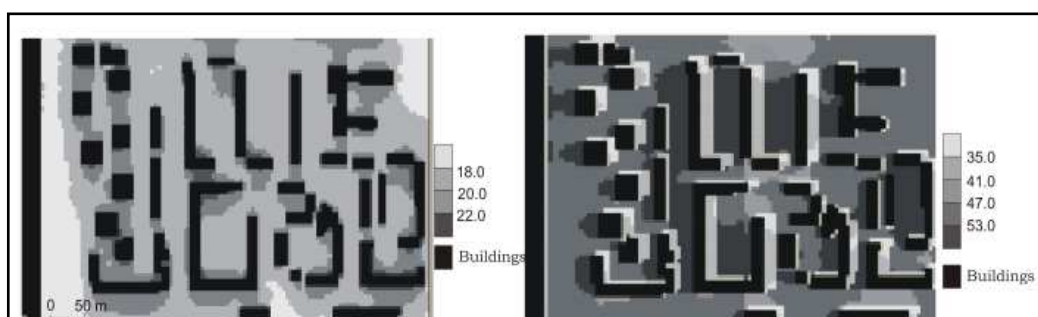


Fig. III- 21: Estimation de la PET pour un été chaud à Telheires. La nuit à 0h (à gauche), le jour à 15h (à droite) (Andrade. H, 2003).

Durant la période diurne, la PET estimée pour les espaces soumis à $T_a = 34.6^\circ\text{C}$ et vent $V = 3.2 \text{ m/s}$ de direction Est en conditions d'ombre et d'ensoleillement, était de $55\text{-}58^\circ\text{C}$ en condition d'ensoleillement. Cette marge peut être réduite de 46°C à 49°C avec une meilleure ventilation. En condition d'ombre la PET variait de $30 - 39^\circ\text{C}$.

L'étude a conclu que le facteur principal qui contrôle la PET est la géométrie urbaine, puisque les endroits étaient homogènes en végétation et en matériaux de façade et de couverture au sol et exposés à la même direction du vent.

Il est évident que le SVF joue un rôle indispensable dans le confort thermique local et la PET est un bon outil pour la planification urbaine.

III-3-1- 2- Descripteurs additionnels:

Plusieurs autres mesures quantitatives de la surface urbaine ont été mentionnées dans les études sur le climat urbain (Erell et al., 2011) :

a- La densité de la surface frontale :

C'est une mesure tridimensionnelle de la densité urbaine. elle est défini par le rapport entre la surface totale de toutes les façades des bâtiments orientées en direction des vents dominants et la surface horizontale globale.

Ce descripteur est étroitement lié à la rugosité des surfaces urbaines.

b- La densité du plan :

Représentant l'emprise au sol. Elle est déterminée par la relation :

$$P = \frac{\text{Surface toiture}}{\text{Surface totale}} \dots\dots\dots \text{Eq.III.5}$$

C'est un paramètre déterminant de la quantité des surfaces réceptrices du rayonnement solaire tels que les toits, murs et sol donc dépendant du profil urbain **H/W** et du **SVF**. Ces derniers conditionnent d'une manière considérable le degré d'absorption et de réflexion de la radiation solaire globale au niveau de la canopée urbaine et de la CLU.

V. Cheng et al. (2006) ont évalué le rapport entre la forme construite, la densité et le potentiel solaire. L'étude comporte des simulations de l'ensoleillement de dix-huit modèles génériques ; chacun représente une combinaison particulière de formes

construites et de densité. Ces modèles génériques peuvent être classés en quatre formes différentes correspondant à différentes dispositions horizontales et verticales, uniformes ou aléatoires comme illustré sur la **figure III.22**.

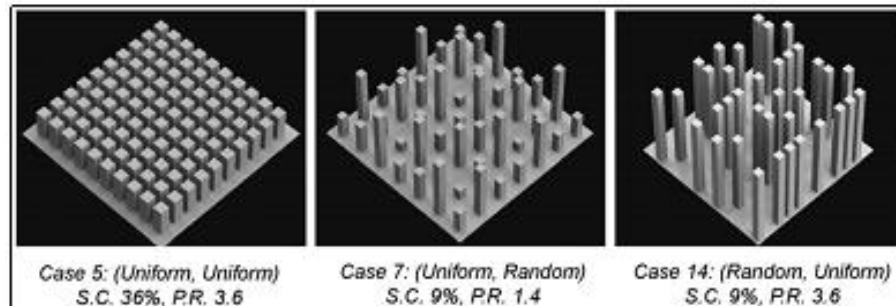


Fig III.22 : Modèles génériques des simulations (Cheng, V et al., 2006).

Les meilleures conceptions se sont avérées celles présentant une basse densité avec plus d'espaces ouverts (a), avec un aspect aléatoire dans la disposition verticale (b) et un aspect aléatoire dans la disposition horizontale (c), (cf. **Fig. III.23**).

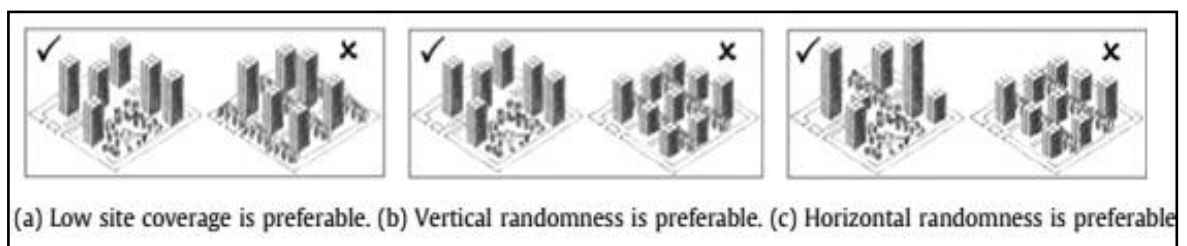


Fig. III.23 : Recommandations concernant la disposition, la hauteur et la densité des bâtiments (Cheng, V et al., 2006).

c- la fraction végétale : c'est la mesure de l'espace vert dans le site (ou la ville). Elle est quantifiée par le rapport surface horizontale couverte par la végétation par rapport à la surface horizontale totale.

III-3-1- 3- Autres aspects de la géométrie urbaine

Outre les descripteurs de la géométrie urbaine cités en haut, cette dernière prend d'autres formes assez significatives pour le confort piéton et les bâtiments aux alentours.

a- L'effet dièdre : caractérisé par l'échauffement des parois au niveau de leurs intersections par un renforcement des échanges par multi-réflexion et re-émission.

Dans les places et les cours, ces réflexions multiples entre les différentes surfaces participent à l'augmentation de la quantité d'énergie absorbée (cf. **Fig. III.24**).

Ce phénomène a pour conséquence l'augmentation de la température à l'intérieur de ces espaces (Aida et Goth, 1982). L'utilisateur qui circule à proximité de l'arête du dièdre subit un cumul du rayonnement global, des parois verticales ainsi que celui du sol.

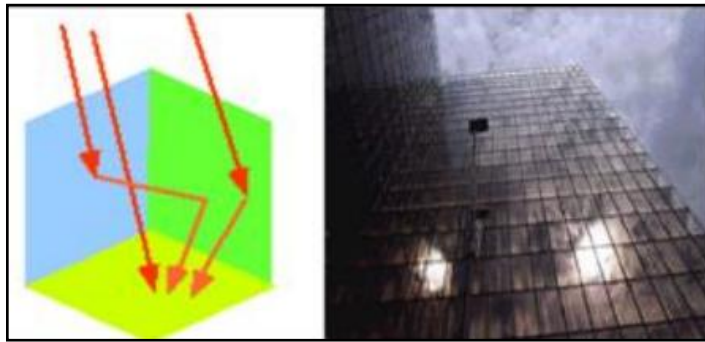


Fig.III. 24 : Effets de double dièdre. (*Laboratoire ABC, 2000*)

Pour mettre en évidence l'effet des inter-réflexions entre différentes surfaces de l'environnement d'un espace extérieur, J. Noilhan (1980) , à la latitude de 45°, a étudié en une journée ensoleillée d'un 18 Octobre le cas d'une cour de 30 x 40 m de dimensions entourée sur les trois cotés par des façades d'immeuble de 14 m. La cour a été découpée en un ensemble de carré de 10 x10 m numéroté de 1 à 12 (cf. **Fig. III.25**).

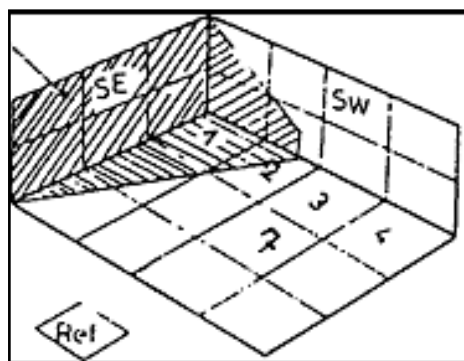


Fig. III.25 : Echanges radiatifs entre les différentes surfaces composant l'environnement de l'espace ouvert. (*Noilhan. J, 1980*)

L'énergie (sous forme de rayonnement net) reçue par les carrés 3 et 7 de la cour et au carré de référence (**Ref**), est respectivement égale à 286, 238 et 227 W/m², les apports par inter-réflexion entre le mur Sud-ouest et le sol sont limités en grande partie à la

surface adjacente (3) avec un écart de 59 W/m^2 représentant 26% de plus que la référence, par contre la surface (7) située à 15 mètres du mur, elle ne dépasse la valeur de la référence que de 11 W/m^2 ce qui représente 5%, bien que le facteur de vue du ciel soit passé de 0.55 en (3) à 0.74 en (7) entraînant une augmentation du rayonnement global ce qui met en évidence la grande part des inter-réflexions entre le mur et le sol.

Ce qu'on peut conclure de cette étude est qu'il existe une décroissance très rapide des échanges radiatifs lorsque les surfaces s'éloignent l'une de l'autre.

Les surfaces attenantes (sol + murs) sont très préjudiciables au confort thermique intérieur si elles ne sont pas contrôlées. Elles le sont autant pour le confort thermique de l'utilisateur des espaces extérieurs de par le cumul de radiations qu'il reçoit de son environnement. Il faut donc éloigner ce dernier de cet effet en respectant les distances entre les parois et les emplacements des différentes activités qui s'y déroulent ou en créant des écrans judicieux tels que la végétation (cf.chap.2).

b- Les galeries (espace semi-ouvert)

Les galeries au rez-de-chaussée des immeubles (cf. **Fig. III-26,27**), génèrent des conditions confortables notamment pour les orientations E- O (Swaid et al., 1993), N-S et NO-SE (Ali Toudert,2007).

Les résultats de l'étude par A.Aizenberg (1999), en utilisant le modèle CTTC sur différentes typologies construites avec des colonnades, indiquent que sur la côte méditerranéenne par exemple, leur effet de refroidissement maximum trouvé en été à



Fig. III-26 : Agora grec bordé de colonnes
http://veniceblog.typepad.com de l'ombre



Fig. III-27 : Arcades procure
de l'ombre (*Erell.E* , 2013)

midi était de 3-5 K pour $H/W = 0.5$ et 2 ou 3 K dans les plus étroites rues ($H/W = 3$).

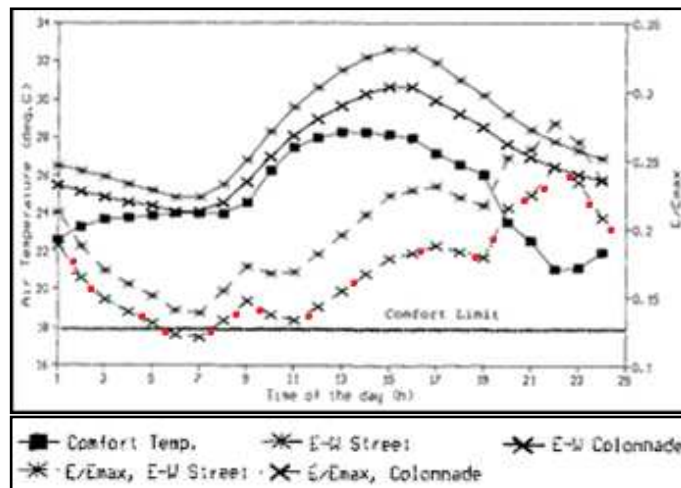


Fig. III-28 : Températures de l'air journalières dans un canyon urbain ($H/W=1$, E-O) avec et sans colonnade (Swaid, H et al., 1993).

c - L'espace couvert (ou Sabat)

Une autre typologie d'espace tout à fait indépendante du ratio H/W ou du SVF, à l'abri de tout rayonnement solaire et bénéficiant d'un environnement plus frais. (cf. **Fig. III-29**)



Fig. III-29 : Passage couvert (Iran) (Brahimi et Mansouri, 2016).

Dans une analyse du microclimat de la ville de Ghardaïa, les résultats étaient concluants : " Hiver comme été, les températures d'air les plus basses sont enregistrées au passage couvert. La différence de température de l'air entre le passage couvert et les rues exposées au rayonnement solaire est de 1°C en hiver tandis qu'elle varie entre 2 et 5°C en été, selon les prospectus des rues. De même, les températures de surface du sol à l'abri de l'irradiation solaire directe, sont respectivement de 14 à 20°C plus basses que

celles des rues ouvertes. En plus de l'effet d'ombre qu'il procure, le passage couvert est à l'origine d'une accélération des vents qui peut être recherchée en été, lorsque les écoulements d'air sont faibles." (Kitous et al., 2006).

Ces mêmes résultats ont été trouvés par M.Tahbaz et al. (2014) dans la vieille cité traditionnelle kashan en Iran où les ruelles profondes d'orientation nord-sud et les passages couverts, notamment de faibles hauteurs étaient plus confortables que les profondes ou peu profondes ruelles d'orientation Est-ouest ensoleillées en permanence en été et complètement ombrées en hiver. Ces mêmes géométries ont prouvé leur efficacité en saison froide par la protection du piéton des vents froids.

III-3- 2- L'ensevelissement d'une place:

Le confort des espaces extérieurs est fortement influencé par la durée d'ensevelissement des espaces publics et les masques créés au sol par les bâtiments ou autres (tâches d'ombre). Dans les climats contrastés, il est important de pouvoir équilibrer les espaces ombrés et les espaces ensoleillés à la différence des villes à climat chaud et aride où l'accès solaire doit être minimisé.

En fonction des saisons, la variation des zones ensoleillées et des zones à l'ombre dans un espace public est une source importante de diversité et de variabilité pour cet espace (**cf. Chapitre I**). Il est important de limiter le sentiment de monotonie (Reiter, 2007). Une règle générale à appliquer dans tous les espaces publics pour assurer cette variété de conditions environnementales est la suivante : la proportion ensoleillée de l'espace ouvert doit couvrir entre 20% et 80% de la surface du site. Ce critère de diversité par rapport à l'ensevelissement est un critère qualitatif du confort qui correspond à des données quantitatives au niveau thermique (Nikolopoulou et al, 2004) et au niveau visuel (Compagnon et Goyette-Pernot, 2004).

III-3-3- Forme et proportions d'une place

Si on considère la place publique comme un patio urbain par analogie au patio des habitations, en raison des échanges faibles d'air avec l'extérieur. La performance thermique des places est principalement affectée par l'accès solaire qui dépend de ses proportions (Muhsain, 2006 ; Mohcen en 1979, Yezioro et al en 2005, Aggarwal en 2006.).

Plusieurs études sur les performances thermiques des cours privées ou urbaines ont montré que la forme de la cour doit être suffisamment étroite pour garder des zones à l'ombre tout au long d'été et suffisamment large pour admettre l'énergie solaire tout au long de l'hiver (Nadimi et & Yaghoubzadeh, 2014).

Rempel et al., 2016; Almhafdy et al., 2013 b; Mehdi, 2016; Berkovic et al., 2012; Aggrawel, 2006; Bagneid, 2006 et bien d'autres chercheurs ont révélé que les facteurs qui promeuvent une bonne conception des microclimats des cours ou sa performance environnementale comprennent:

Sa latitude, sa géométrie (sa forme, sa surface, sa hauteur), son orientation aux vents et au soleil; le type des murs qui l'entourent (minéral ou végétal; semi ou complètement fermée); propriétés des matériaux au sol et en façades; le type de vitrage; les dispositifs d'ombrage au sol et en façade; les ouvertures dans la cour; le rapport de la surface végétale / surface minérale et le rapport surface eau / surface minérale.

Tous ces facteurs sont en interaction avec le rayonnement solaire qui déterminera le confort thermique dans les espaces ouverts car il possède une influence plus importante sur la température physiologique équivalente (PET) que la vitesse du vent (Makaremi et al., 2012; Berkovic et al., 2012; Shahab Kariminia et al., 2015).

Sharmin et al. (2015) ont constaté que le rapport H / W et le SVF sont les meilleurs indicateurs de la température globale. La température radiante moyenne (T_{mrt}) et la température opérative (T_{op}) sont les plus pertinentes pour le confort thermique extérieur.

Muhaisen (2006) analyse l'impact de différentes configurations de cours sur la base de simulations d'ombrage. Cette étude a révélé que les conditions d'ombrage des cours sont fortement influencées par les proportions formelles, la latitude de localisation et les conditions climatiques.

Dans une autre étude connexe, Muhaisen et Gadi (2006) ont montré que les proportions et la géométrie des cours jouent un rôle important dans l'amélioration des performances d'ombrage. Par conséquent, les formes de cour profonde sont recommandées en été et les formes peu profondes sont recommandées en hiver. Ils ont constaté que, pour le climat tempéré de Rome, les formes de cour les plus profondes correspondant à des proportions H/W plus élevées étaient préférables pour réduire la charge de refroidissement en été et la charge de chauffage en hiver.

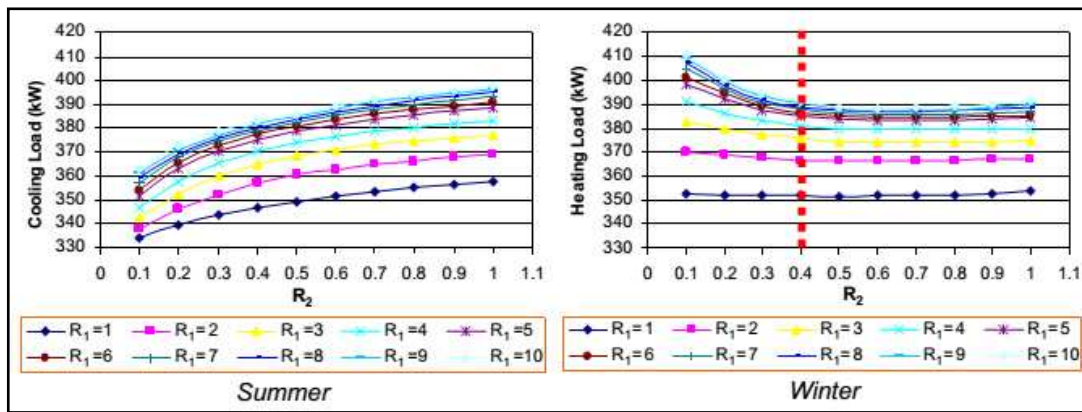


Fig. III-30: Effet de la variation du rapport $R_2 = W/L$ (élongation de la forme) sur la demande énergétique à Rome (climat tempéré). (Muhaisen et Gadi, 2006)

L'étude numérique effectuée par Martinelli et Matzarakis (2017) sur l'influence du rapport H/W sur le confort thermique dans les petites places et les enclos pour les zones climatiques italiennes et tout au long de l'année. Les proportions H/W de 4: 5 à 5: 5 (0,8 à 1) sont suggérées pour les climats chauds, tandis que les proportions H/W de 3: 5 à 4: 5 (0,6 à 0,8) sont souhaitables pour les climats froids.

Stemers et al. (1997) ont proposé six formes urbaines génériques pour Londres et ont comparé le rayonnement solaire incident, la densité construite et l'accès à la lumière du jour. Leur étude a été suivie par celle de Ratti et al (2003) pour la ville de Marrakech. Ils ont conclu que les grandes cours sont à prescrire dans les climats froids où elles peuvent agir comme collecteur solaire et conservent leur effet protecteur des vents froids.

Yasa et Ok (2014) ont trouvé qu'en général, l'effet de l'ombre sur l'augmentation de la demande énergétique en chauffage dépasse de loin son effet sur la réduction de la demande énergétique pour le refroidissement en été. Ils ont conclu que les gains solaires durant l'hiver sont plus bénéfiques que leur exclusion en été. Ils ont observé aussi que la demande énergétique annuelle augmente parallèlement à l'augmentation de la longueur de la cour notamment si l'élongation est dans la direction des vents dominants. Cette élongation est en rapport avec sa hauteur. Ils proposent des proportions optimales pour tout type de climat $H/W = 1$ et $H/L = 1$.

Shahab Kariminia et al. (2015), à Ispahan, en Iran à hiver froid et été chaud, ont trouvé qu'un ratio H/W élevé était la stratégie privilégiée pour améliorer le confort thermique en été. Cependant sa pertinence peut être partiellement inhibée par une orientation inappropriée. Pour une place où $L = 3W$, augmenter le ratio d'aspect de 0.1 à 0.3 atténue

le stress thermique pour toutes les orientations, cependant, l'amélioration observée était plus efficace pour les orientations N-S ou NO-SE qu' E-O.

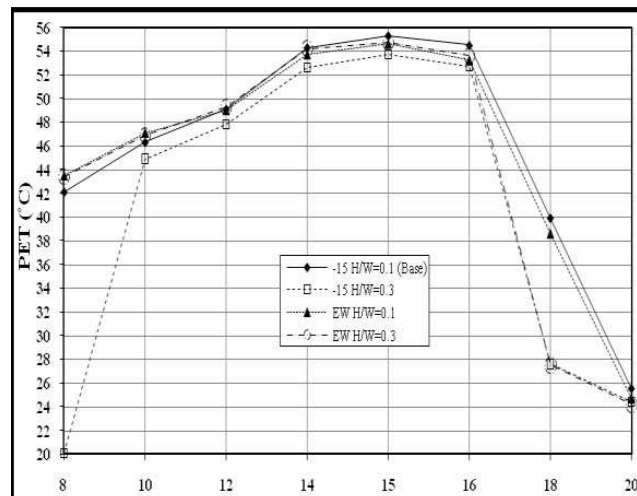


Fig.III.31 : Evolution journalière de la PET dans le centre d'une place en fonction de l'orientation et le rapport H/W (Shahab Kariminia et al., 2015).

Les travaux de Mohsen (1979) montrent qu'en ombrage les cours rectangulaires sont meilleures que les cours carrées.

Avec le modèle SOLENE, Ntefeh et al. (2003) ont évalué l'influence de la forme carrée, rectangle, triangle et cercle, selon plusieurs orientations sur la durée de l'éclairage naturel et les niveaux d'éclairage du sol et des façades dans les enclos pour différents climats. Les résultats montrent que le rapport du rectangle $L / W = 2$ présente les valeurs les plus élevées en cas de protection solaire en été et de gain de chaleur en hiver comparativement au carré et au rectangle $L/W = 3$. Les résultats du cercle sont plutôt contradictoires. Cette forme présente le plus haut niveau d'éclairage et de gain de chaleur en hiver et le plus bas niveau de protection solaire en été.

Masmoudi et Mazouz (2004) ont mené une étude numérique thermo-radiative dans les climats chauds et arides (latitude $34^{\circ}80' N$), pour trois places de forme rectangulaire, carrée et circulaire selon différentes orientations. Dans un premiers temps, la hauteur des bâtiments qui encadrent les places est considérée constante et égale à 16,6 m. La forme circulaire présente les résultats optimaux de flux solaire absorbée. En effet, la quantité d'énergie solaire absorbée par la place circulaire à 13h est la plus faible avec seulement 81 Wh/m^2 , en comparaison avec les valeurs de l'ordre de 114 Wh/m^2 obtenues pour les places en forme rectangulaire et carrée. Des

conclusions similaires sont tirées pour les températures moyennes radiantes égales respectivement à 36°C, 38°C et 39°C, pour la place circulaire, rectangulaire et carrée. Dans un second temps, trois hauteurs d'immeubles ont été considérées : 16,6 m, 25 m et 50 m. Cette modification géométrique a très peu d'effet sur l'absorption des façades des places. Cependant, au niveau du sol, la quantité d'énergie solaire absorbée est alors réduite de façon quasi-homogène pour toutes les places. L'étude a conclu que l'échauffement de la place est dû principalement à l'échauffement du sol aussi bien en été qu'en hiver et que l'orientation nord-est / Sud-ouest permet une adaptation au confort aussi bien estival qu'hivernal. L'effet de la hauteur n'est perceptible qu'avec une forme rectangulaire selon cette même orientation.

Une étude approfondie sur les proportions des places aux latitudes nord comprises entre 26-34° a été effectuée par Yezioro et al. (2006) en utilisant le programme SHADING. Ils ont montré que, pour un confort thermique d'été la meilleure direction d'une place rectangulaire était Nord-Sud suivie, dans cet ordre, de NO-SE, NE-SO, E-W. Ils ont constaté que la direction N-S offre la plus courte durée d'ensoleillement directe au centre de la cour. Ce résultat est souhaitable pour les climats (ou aux saisons) dans lesquels moins de soleil est souhaitable. L'étude a eu aussi comme conclusion que la hauteur des bâtiments autour de la place urbaine devrait être au dessous de 1/3 de sa largeur pour un ensoleillement souhaitable en hiver. L'ensoleillement intense d'été peut être réduit par les aménagements urbains.

Almhafdy et al. (2013a) ont mesuré par simulation CFD l'effet du changement du rapport d'aspect et les dispositifs d'ombrage sur le comportement thermique des cours. L'étude a révélé que le ratio d'aspect et le toit en porte-à-faux (partie ombrée) sont les principaux déterminants de la vitesse de l'air et donc de la sensation thermique. Dans leur comparaison, la cour rectangulaire en forme de U avec un rapport d'aspect 1: 2 a montré une meilleure performance thermique que la cour carrée en forme de U avec un rapport d'aspect 1: 1. Ils ont conclu que l'augmentation de la zone ombrée de la cour se traduirait par un microclimat plus confortable dans la cour.

Alwetaishi (2016) a étudié l'impact de la forme en U sur les températures intérieures. Il a conclu que les U orientées vers le sud et le nord sont recommandées pour les climats chauds et secs.,

Berkovic et al. (2012) ont étudié le confort thermique dans différentes places utilisant ENVI-met 3.1. L'étude a testé trois scénarios différents des géométries des places avec des passages ouverts sur deux côtés opposés. Le résultat a montré que la place

rectangulaire d'orientation Est-Ouest bénéficie de la plus petite surface d'ombre et par conséquent, n'est pas recommandée pour une stratégie d'ombrage efficace pour le refroidissement. La différence de température de l'air entre les zones ombrées et ensoleillées n'était que de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais une réduction significative de la T_{mrt} qui peut atteindre les 30°C est obtenue.

Parmi les deux hauteurs étudiées des passages ouverts, 3 m et 5 m, les ouvertures basses admettent moins de rayonnement solaire et sont donc plus appropriées pour le confort.

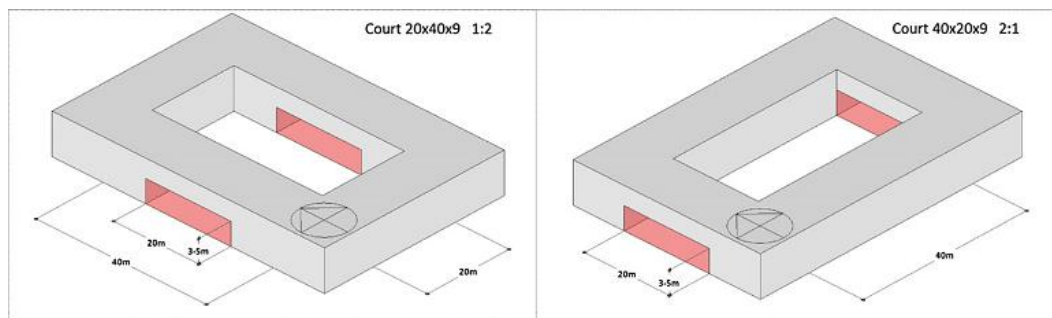


Fig.III-32 . Les géométries des cours avec les ouvertures en rouge.
Le cas de référence est la cour complètement entourée par des bâtiments.
(Berkovic. S et al., 2012).

Ghaffarianhoseini (2015) a évalué à Kuala Lumpur (Malaisie) l'évolution du confort thermique extérieur dans les cours urbaines tout en variant l'orientation, la hauteur, l'albédo des murs et la présence de la végétation. L'étude conclue que l'augmentation de la hauteur des cours diminue considérablement le niveau de T_{mrt} pendant la journée avec un taux de diminution moyen de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant la période critique de 12h à 15h.

L'étude de Safarzadeh et Bahador (2005) montre que les cours à elles seules ne peuvent assurer un haut niveau de confort thermique pendant les heures chaudes d'été à Téhéran, en Iran.

Ernest (2011) constate que l'application des procédées bioclimatiques telles que l'utilisation de la végétation est fortement recommandée pour améliorer les performances des cours. L'étude de Yahia et Johansson (2014) a démontré que grâce à l'utilisation de la végétation dans le climat chaud et sec de la Syrie, le confort thermique pourrait être atteint même pendant les heures critiques de l'été.

Ghaffarianhoseini et al. (2015) ont conclu que bien que les cours couvertes de verdure de 0 à 50 % offrent des conditions thermiquement confortables toute la journée sauf de

12h à 15h, les cours couvertes de 75% de verdure sont capables de réduire la période critique d'inconfort thermique de 13h à 14h.

L'analyse expérimentale du comportement thermique des cours en France menée par Robitu et al (2006) démontrent que l'utilisation d'arbres et de bassins d'eau augmente le confort thermique local, Semblable aux températures moyennes radiantes, le PMV obtenu pour la situation réelle de la place (avec bassin d'eau et arbres) montre une réduction significative comparée à celle obtenue pour la situation nue. Le PMV maximum à 14h est de 0.54 (zone de confort) pour la situation réelle contre 3.4 (extrêmement chaud) pour la situation nue. Ceci montre l'effet positif de la combinaison de l'eau et la végétation pendant les heures de surchauffe.

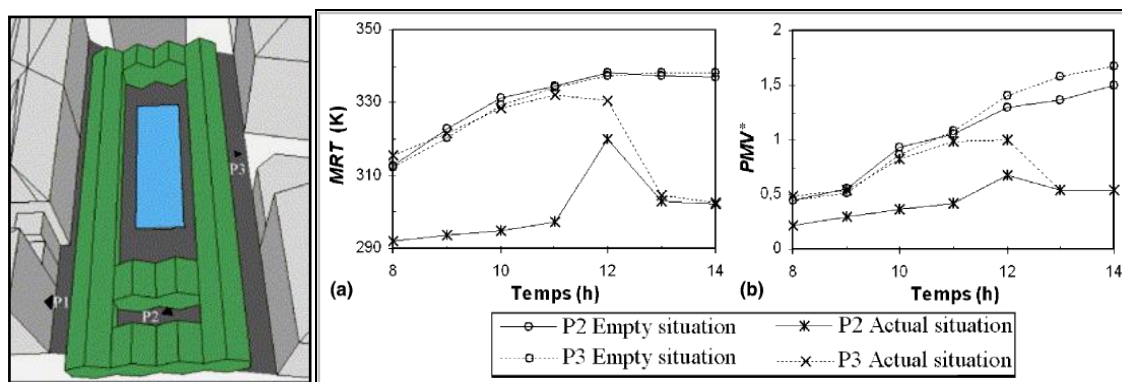


Fig.III-33 : La température moyenne radiante et l'indice PMV* à 1.5 m au-dessus du sol pour une personne debout dans le P2 et le P3 (Robitu, M et al., 2006).

Taleghani et al. (2014a) examinent l'influence de l'application de la végétation, des bassins d'eau et de surfaces à albédo élevé sur la réduction du gain de chaleur à Portland, aux États-Unis. Les résultats présentent des réductions de température de l'air de 1,6 °C et 1,1 °C pour les cours avec respectivement de la végétation et des bassins d'eau, tandis que l'augmentation de l'albédo de la chaussée de 0,37 à 0,91 entraîne une réduction de température de l'air de 1,3 °C et une augmentation de la Tmrt de 2,9 °C.

Taleghani et al. (2014b) ont également examiné les conséquences de l'application des stratégies d'atténuation de la chaleur sur les cours urbaines aux Pays-Bas et ont conclu qu'un albédo plus élevé des façades entraînerait une augmentation de la Tmrt de plus de 20 °C à 12h. Le bassin d'eau dans la cour diminue considérablement le niveau de température radiante moyenne avec une diminution maximale de 18 °C à 15h, et les zones vertes réduisent également la Tmrt avec un maximum de 17 °C.

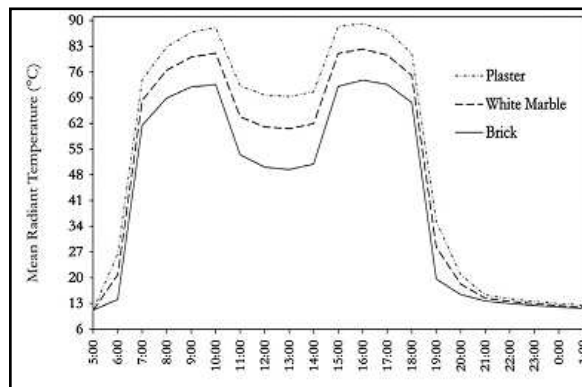


Fig.III-34 : Effet de l'augmentation de l'albédo des surfaces de 0.1 (brique) à 0.55 (marbre blanc) et 0.93 (plâtre) sur la Tmrt d'une cour E-O (Taleghani. M et al., 2014b).

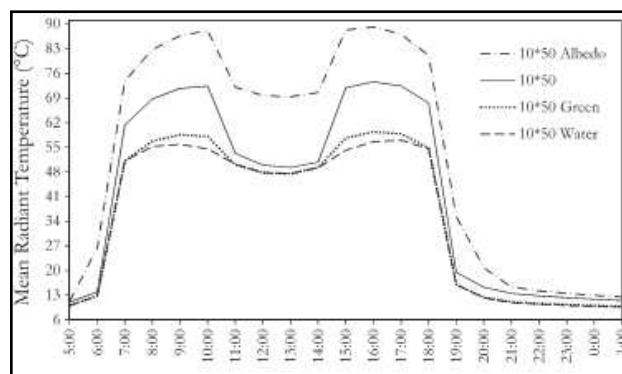


Fig.III-35 : Comparaison des Températures moyennes radiantes pour différentes stratégies d'atténuation de la chaleur (Taleghani. M et al., 2014b).

Ok et al. (2008) ont confirmé l'effet de la ventilation des cours à travers les ouvertures des bâtiments. Ils ont conclu que les emplacements, les dimensions, la configuration et les orientations de ses ouvertures affectent le mouvement de l'air dans les cours.

Chatzidimitriou et Yannas (2016) ont effectué une étude paramétrique avec trois logiciels Envi-met Radtherm et Fluent sur les places et les cours urbaines à Athènes où ils ont testé plusieurs stratégies d'amélioration du confort thermique estival (cf. **Fig.III-36**). Les valeurs maximales de la PET obtenues pour les points centraux de la place sont énumérées et classées dans le **tableau III.3** en fonction de la différence maximale avec le scénario de base ((H/W plus grand = 0.5, albédo = 0.5, humidité du sol = 50 %, eau et différentes couvertures 0%) . Le **tableau III.3** identifie également lequel des cinq points de référence ont donné les plus grandes différences moyennes journalières dans les valeurs de la PET.

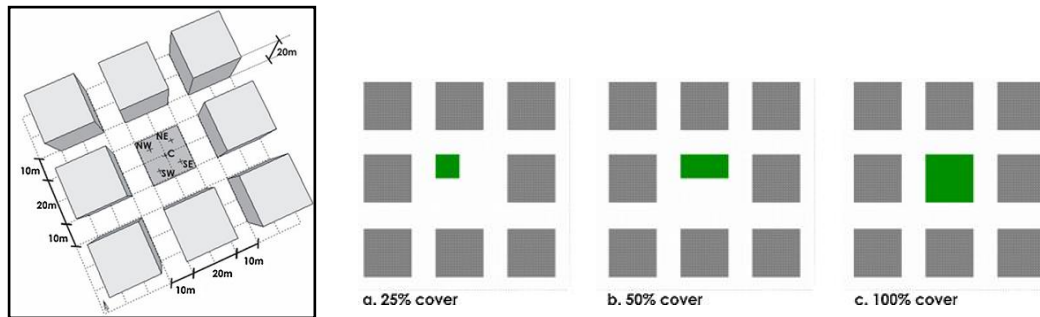


Fig.III-36 : Géométrie de la place avec l' emplacement et pourcentage des couvertures utilisées (Chatzidimitriou et Yannas, 2016).

Tab. III.3 : Effet maximal et effet moyen de l'application de différentes stratégies sur le confort piéton estival (Chatzidimitriou et Yannas, 2016).

Square centre simulation case	Effet maximal			Effet moyen		
	Peak PET +/- (°C)	Time of peak PET	PET(°C)	PET MOY (°C)	MOY Max PET +/-	Point de mesure
H20W20	-24.0	14:00	36.6	35.7	-3.5	NE
H10W40	+23.9	15:30	58.0	38.9	+1.3	NW
Albedo 0.2	-4.6	14:00	56.0	38.0	-1.7	NE
Albedo 0.8	+4.9	14:00	65.5	41.5	+1.8	NE
Tree cover 25%	-9.9	15:00	47.5	29.3	-8.9	NW
Tree cover 50%	-11.5	9:00	40.7	27.8	-9.6	NE
Tree cover 100%	-24.4	15:00	33.0	28.0	-10.2	NW
Canopy 25%	-2.0	14:00	58.6	34.5	-3.1	NW
Canopy 50%	-2.6	10:30	43.7	34.4	-5.3	NE
Canopy 100%	-23.0	14:00	37.6	33.7	-6.0	NE
Grass cover 25%	-0.6	15:00	56.7	34.3	-3.9	NW
Grass cover 50%	-9.0	12:00	45.3	34.3	-3.9	NW
Grass cover 100%	-9.0	12:00	45.3	34.3	-3.9	NW
Water cover 25%	-0.1	15:00	57.3	33.1	-5.1	NW
Water cover 50%	-12.3	12:00	42.0	33.1	-5.1	NW
Water cover 100%	-12.4	12:00	41.9	33.0	-5.2	NW
Soil RH 25%	-4.3	09:00	46.9	37.5	-0.7	NW
Soil RH 50%	-8.7	12:00	45.6	34.4	-3.8	NW
Soil RH 75%	-9.5	12:00	44.8	31.7	-4.1	SW

Les différences maximales avec le cas de base se produisent l'après-midi, entre 14h et 15h30. La mesure la plus efficace en termes de confort était la couverture complète par les arbres. Ceci a réduit la valeur de la PET de plus de 24°C à 15h. Une amélioration similaire s'est produite par l'ombre des auvents et en ayant un rapport d'aspect supérieur indiquant ainsi que l'amélioration était le résultat de la protection des rayons solaires. Les meilleurs résultats ont ensuite été obtenus avec les surfaces d'eau, un sol humide ou de l'herbe donnant une réduction de la PET d'environ 10°C. Une réduction de 5°C est obtenue grâce à un albédo plus faible que celui du sol du cas de base.

Il est évident que les techniques les plus efficaces pour créer des espaces thermiquement plus confortables sont ceux qui atténuent le rayonnement solaire en

réduisant le SVF et ceux qui provoquent l'évapotranspiration. Les matériaux à haut albédo sont à proscrire car ils augmentent la T_{mrt} et la PET.

L'effet combinée de toutes ces stratégies a été testé par Axarli et Chatzidimitriou (2012), dans le cadre d'un projet pour l'amélioration du microclimat de deux places publiques dans le campus de l'université d'Aristote de Thessaloniki, en Grèce (40°N) basés sur des critères bioclimatiques. L'objectif visait le confort thermique piétons et l'économie d'énergie des bâtiments en été. En utilisant des simulations par le logiciel ENVI-met 3.1, la proposition pour deux journées d'été (typique et extrême) consistait en une combinaison de différentes stratégies : divers types d'arbres, basse végétation, murs végétaux, auvents, fontaines, bassins d'eau. Tous les trottoirs ont été remplacés par un pavage perméable ou de la terre nue sinon des matériaux frais.



Fig. III.37 : Stratégies bioclimatiques utilisées dans les deux places à Thessaloniki, Grèce. (Axarli et Chatzidimitriou,2012)

La comparaison des températures de l'air, de surface et l'indice thermo-physiologique PMV des conditions en l'état réel et simulé indique une réduction moyenne de température de l'air de 2.6 °C et 1.7 °C dans les deux places et une réduction moyenne de température de surface approximativement de 14 °C et 18°C pendant la journée extrême. En outre, une amélioration de 36% et de 34% du confort piéton a été indiquée par l'indice PMV le jour typique d'été, aussi bien qu'une réduction de 32% et 26% du total journalier du degrés heures de refroidissement en la journée typique révélant une économie significative de la consommation énergétique de refroidissement des bâtiments environnants.

III-3-4 - Conditions du vent dans la place

Le vent est un facteur important car il est garant de la dissipation de la chaleur stockée puis dégagée par les constituants du tissu urbain. son absence accentue le gradient entre ville et campagne et l'inconfort piéton (cf. chapitre I).

Il est particulièrement difficile à prévoir en ville. Il s'accélère dans une rue qui se resserre, il est dévié par une tour, absent d'une place trop fermée.

Le degré auquel un objet du paysage urbain modifie l'écoulement du vent dépend de sa taille, sa forme, son orientation, sa rugosité, sa porosité et sa position par rapport aux autres objets urbains. Plusieurs effets ont été identifiés. (cf. Fig. III.38).

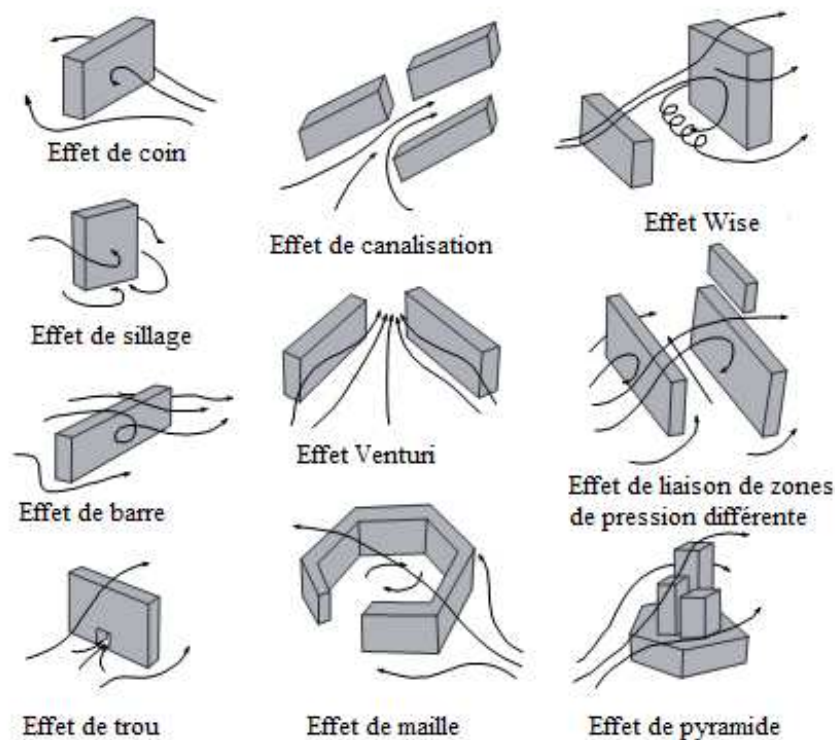


Fig. III.38 : Anomalies des mouvements d'air en tissu urbain affectant le confort piéton (*Gandemer.J., 1975*).

Pour pouvoir cerner, expliquer et résumer les différents effets du vent en interaction avec les obstacles urbains ainsi que leur configuration au sol relevés dans une littérature très abondante, les observations et les conclusions d'un exemple d'étude par modèle CFD (Kofoed et Gaardsted, 2004) menée dans le cadre du projet RUROS dont les objectifs sont d'évaluer les effets de différents paramètres sur les conditions de vent au niveau du piéton (1.5 m au-dessus du sol) dans un espace quadrilatère entouré d'immeubles (place), vont nous servir de toile de fond.

Les topographies des lieux environnants ont été incluses dans le modèle CFD pour prendre en compte les effets des structures urbaines environnantes (**Fig. III.39**).

La hauteur du voisinage considéré est de 18 m ($H_{\text{Neighbourhood}}$).

L'étude prend en compte les paramètres suivants :

1. Les dimensions du quadrilatère (A_{Square}): 1600m² et 3600m².
2. La vitesse du vent en site dégagé à 10 m de hauteur (V_{10}): 2.5m.s⁻¹ et 5m.s⁻¹.
3. La hauteur des immeubles aux bords (H_{Boundary}): 9 m, 18 m, 27 m.
4. La direction du vent: 0°, 15°, 30°, 45° (**Fig. III.39**).
5. Largeur et position des quatre ouvertures du quadrilatère (**Fig. III.40**).

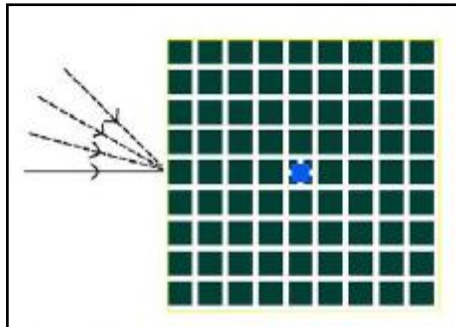


Fig. III.39 : Représentation graphique du modèle CFD avec les directions du vent (0°,15°,30°, 45°). Le square est situé au centre du modèle et entouré par un voisinage suburbain modélisé par des blocs de 18 m de hauteur (*Kofoed et Gaardsted, 2004.*)

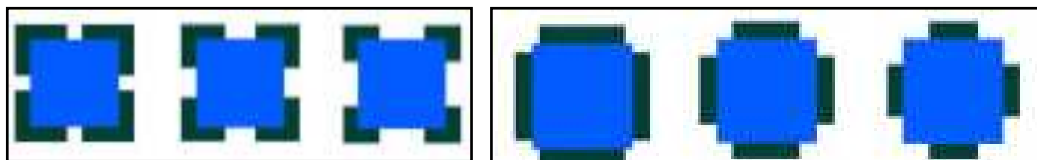


Fig. III.40: Square avec les ouvertures au milieu ; largeur: 10 m, 20 m, 30 m.à gauche et Square avec les ouvertures aux coins ; largeur: 7 m, 14 m, 21 m à droite (*Kofoed et Gaardsted, 2004.*)

Sur la base des observations, des conclusions ont été tirées :

- Le quadrilatère devrait être configuré le plus petit possible, car plus le quadrilatère est grand plus intense est la vitesse du vent dans cet espace, avec une relation quasi-linéaire entre A_{Square} et la vitesse du vent, et plus l'écoulement est turbulent.
- Plus hauts sont les immeubles aux bords de l'espace par rapport à ceux du voisinage, plus intense est le vent dans le quadrilatère (**cf. Fig. III.41– III.42**) car l'échelle de la turbulence croît avec la hauteur (Effet Wise).

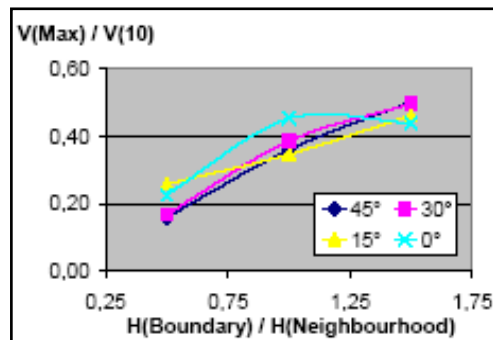


Fig.III.41 : vitesses du vent en fonction du rapport des hauteurs immeubles aux bords/ hauteurs immeubles du voisinage. (*Kofoed et Gaardsted, 2004*)

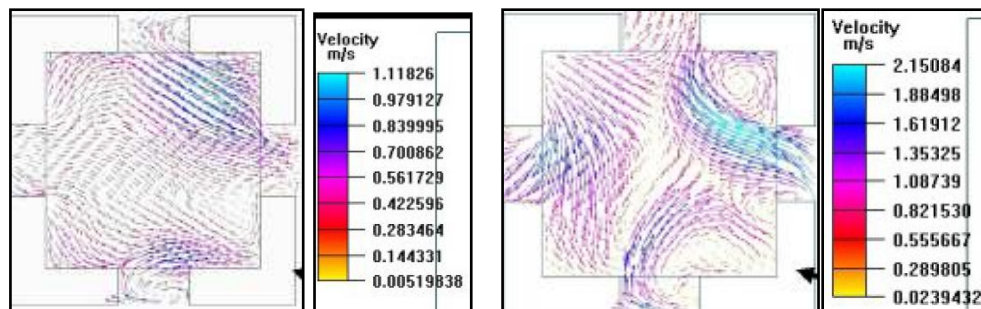


Fig. III.42 : vitesses du vent dans le square. Hauteur des bâtiments aux bords: 9 m (à gauche) et 27 m (à droite), direction du vent 15°. (*Kofoed et Gaardsted, 2004*)

- Les ouvertures dans les coins du quadrilatère produisent un écoulement plus turbulent que des ouvertures situées au milieu de ce dernier (cf. **Fig. III.43**).

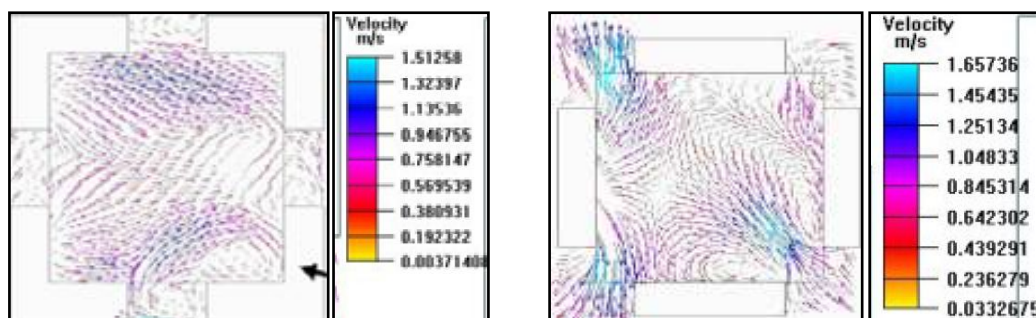


Fig.III.43 : vitesses du vent dans le square avec une ouverture placée au milieu et aux coins , direction du vent 15°, et avec l'axe principal du quadrilatère orienté parallèlement à la direction des vents dominants (*Kofoed et Gaardsted, 2004*).

- Plus les ouvertures sont grandes, plus le vent est turbulent dans le quadrilatère.
- Il est important que la largeur des ouvertures en direction de l'espace ne dépasse pas 25% de la longueur du périmètre de la place (Effet de barre).

• Il existe une tendance claire que l'écoulement devient plus chaotique lorsque la direction du vent s'écarte de l'orientation principale de cet espace. Plus grand est l'angle d'admission du vent, plus intense est la turbulence.

En effet ceci est du à l'effet de canalisation car si le vent est parallèle au sens d'orientation de la place, l'écoulement du flux est entretenu

Toute fois, Il faut éviter de placer un espace urbain en ligne directe avec de longues avenues linéaires (effet de canalisation), l'effet peut même être pire si les rues forment un entonnoir (effet Venturi).

Lorsque le vent lui est perpendiculaire, un rouleau tourbillonnaire plus ou moins stationnaire à axe horizontal se développe, observé aussi au contact des parois de la place. Quand la direction prédominante de l'écoulement d'air est approximativement perpendiculaire (± 30 degrés), avec l'axe d'orientation de la place, et en fonction du rapport (H/W) on observe ce qui suit:

• Quand les bâtiments sont bien distants, ($H/W < 0.05$), il n'y a pas d'interaction dans leurs champs d'écoulement. A un espacement plus étroit, on observe trois régimes de circulation d'air (**cf. Fig. III.44**).

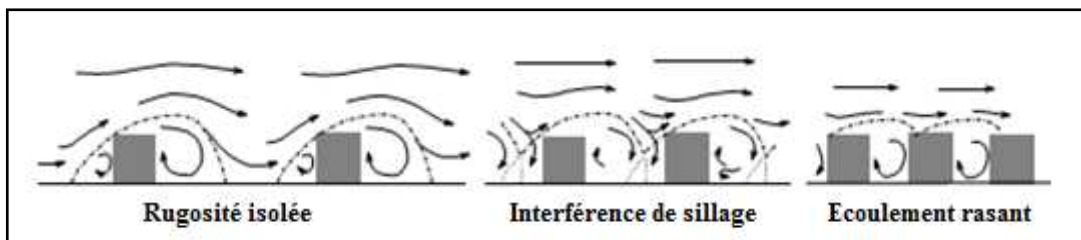


Fig. III.44 : Régimes d'écoulement du vent à une direction transversale selon le rapport H/W . (Oke. *TM*, 1987.)

• Un écoulement de type rugosité isolée pour $H/W < 0.4$. L'écoulement s'apparente à une succession de structures identiques autour des bâtiments isolés.

Les places ouvertes avec un rapport d'aspect $H/W < 0.25$ devrait être évitées dans la conception urbaine car elles sont souvent perçus venteuses. Des places partiellement fermées sont souvent considérés comme "confortables en terme de vent et d'ensoleillement même si elles ne bénéficient pas du soleil toute la journée (Lenzholzer et Koh, 2010).

• Un écoulement à interférence de sillage pour $0.4 < H/W < 0.65$.

- Un écoulement de type rasant pour $H/W > 0.65$. Ce cas est considéré le plus défavorable car la recirculation à l'intérieur de l'espace ouvert limite le flux d'énergie vers l'extérieur.

Dans le cas où les vitesses du vent au dessus des toitures sont inférieures à 4 m/s, les effets thermiques et mécaniques rendent l'écoulement chaotique. On observe alors la formation des zones non ventilées où la chaleur s'accumule (Bozonnet *s et al.*, 2002).

Une étude réalisée en soufflerie pour des espaces rectangulaires a démontré qu'avec des espaces réduits et moyennement réduits ($H/W = 0.25- 1$), le rapport L/H optimal est de 4-5. Avec de grands espaces ($H/W = 0.12$), le rapport L/H optimal est de 6 à 8 (Kofoed et Gaardsted, 2004).

U.Westerberg (2004) stipule que les bâtiments se protègent mutuellement s'ils sont assez proches les uns des autres. Une distance équivalente à 5 - 8 fois la hauteur du bâtiment permet d'inclure des cours suffisamment ensoleillées et protégées. On leur ajoutera quelques arbres qui apportent de l'ombre et maintiennent le vent en hauteur.

- Les dimensions des espaces urbains peuvent être conçues de manière à ce que le vent s'écoule plutôt au-dessus et non dans cet espace réservé aux piétons en créant ainsi des conditions inconfortables. Cet effet est appelé effet de maille qui fait intervenir le paramètre $K = A / (H)^2$; où A est la surface de l'espace urbain et H est la hauteur des immeubles avoisinants (ou celle d'autres structures comme les paravents). K est un paramètre sans dimension. Cet effet est valide pour toutes les formes géométrique.

D'une façon générale, " toutes mailles plus ou moins bien définies augmentent le confort si les dimensions transversales sont de l'ordre de 50 - 60 m." (cf. Fig. III.45)

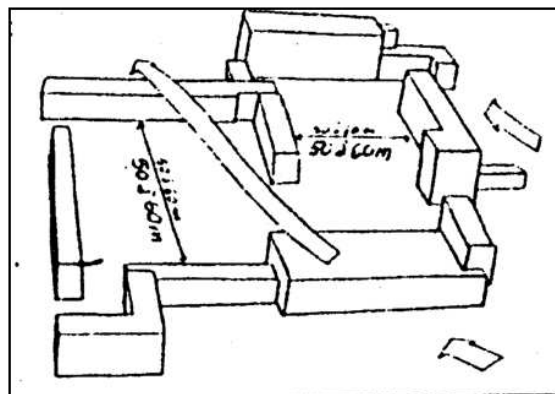


Fig. III.45: Dimensions transversales pour une maille. (Chatelet et Fernandez, 1998)

"L'effet de protection est d'autant plus net que A/H^2 est faible et < 30 ; que les mailles sont ouvertes au vent ou sous le vent ; que l'ouverture est minimum, soit $< 0,25$

fois le périmètre; qu'elles sont remplies de constructions de hauteurs voisines de celle des bras de la maille.» (Chatelet et Fernandez, 1998).

"Avec des ouvertures au milieu de l'espace et avec l'axe principal du quadrilatère orienté parallèlement à la direction des vents dominants et de l'orientation dominante des alignements des rues voisines." (Kofoed, et Gaardsted, 2004).

III-4- Bâtiments et place

Par leur taille et proportions, le rapport des surfaces en verre et leurs natures, détermineront la quantité du rayonnement réfléchi dans la canopée ainsi que la masse thermique de l'enveloppe qui dépend du climat. (cf.chap.II).



Fig. III.46 : Eblouissement affectant la place causé par le revêtement d'une façade.

III-5- Les aménagements d'une place

Dans ce contexte, ils sont évalués en termes des changements bioclimatiques de la place urbaine, notamment par la diminution des surfaces environnantes dures, sièges de températures radiantes élevées au niveau piéton, et son remplacement par une couverture naturelle (végétation et eau) permettant l'absorption de l'énergie solaire et les dispositifs d'ombrage (végétation ou tenture) (cf.chap.II).

Conclusion

Dans un tissu de ville, la place est considérée comme un vide où l'on peut percevoir par les sens et dans lequel on peut séjourner. Elle est délimitée par les façades des bâtiments qui composent ses limites. Délimitée par les rues, la place perd de son caractère d'espace clos.

Cet espace est caractérisé par sa hauteur, sa longueur et sa largeur ainsi que son tracé. Ces dimensions devraient procurer aux usagers la sensation d'enclos caractéristique

importante pour créer une ambiance paisible et un sentiment d'intimité et de sécurité garante de leur pérennité.

La place urbaine est influencée par un nombre de facteurs qui se complètent dans la combinaison de son comportement thermique dont les caractéristiques physiques de divers éléments urbains de par leurs propriétés thermiques et la géométrie des espaces. Cette dernière définie par nombre d'indicateurs, dont le SVF, H/W, l'orientation vers le soleil et le vent....., est importante de plusieurs manières puisqu'elle détermine la quantité des surfaces exposées aux procédés d'échange thermique; contrôle et complique la distribution spatiale des rayons solaires; provoque l'interaction radiative entre les surfaces; influencent le rayonnement en grandes longueurs d'ondes vers le ciel, dirige l'écoulement de l'air et lui attribue le régime.

Cette combinaison a un impact très significatif dans la qualification des ambiances thermiques de cet espace urbain et modifie les activités et le confort de ses usagers. Elle possède également une empreinte sur la consommation énergétique des bâtiments environnants. Sa connaissance est d'une importance capitale pour tout concepteur qui voudra donner une signification à son dessin.

Plusieurs recherches dans le monde ont essayé de trouver les géométries optimales selon les différentes latitudes et climats, notamment aride et sec, qui procuraient les meilleures performances thermiques et environnementales. Cependant rares sont les recherches effectuées pour nos latitude et climat contrasté en quête d'un compromis entre les exigences en confort thermique paradoxales en différentes saisons.

La partie suivante de cette recherche tentera de répondre à cette problématique et résorber cette lacune.

Chapitre IV:

Contexte

et méthodologie

"l'architecte ne peut ignorer le climat sans renoncer à intégrer dans sa démarche de conception des composantes aussi importantes que le rayonnement solaire (porteur de chaleur et de lumière), le vent, la pluie, le froid, bref, des données naturelles qui interfèrent directement avec la perception des formes et des matières, le confort, l'ambiance et l'économie d'un bâtiment."

André Liebard, 2007

Introduction

Par divers processus en rapport avec la domination coloniale, l'Algérie a subi l'urbanisme occidental. Ceci la induit dans des situations conflictuelles violentes tant en architecture qu'en urbanisme se manifestant par des incompatibilités notamment climatiques.

Au lendemain de l'indépendance, sous la pression de la forte demande en logement due à une démographie galopante et l'exode rural massif, l'Algérie a eu recours aux pays étrangers qui non seulement lui ont vendu leurs procédés, mais encore une fois leur urbanisme sans guère connaître ses exigences locales.

Après cinq décennies d'indépendance, ces violences continuent à se développer avec les pratiques des architectes et urbanistes locaux qui ont rompu avec le caractère mesuré des interventions ancestrales où bon sens et savoir faire concouraient à produire une architecture et urbanisme en parfaite symbiose avec leur contexte climatique aussi bien que socio- culturel.

La construction des logements se limite toujours à l'aspect quantitatif, surtout après le lancement du programme quinquennal d'un million de logement (2004- 2009) d'où la prolifération d'un espace urbain caractérisé par une architecture répétitive et identique sans forme ni âme qui sillonne le pays du Nord au Sud, en parfait dédain des facteurs : climatiques, culturels et sensoriels des usagers.

Ce programme était une opportunité pour corriger les errances du passé, à l'instar des villes du monde entier en quête de durabilité, notamment par l'ajustement climatique de leur espace urbain et la lutte contre les différentes pollutions.

Ceci s'est traduit par une augmentation de la consommation d'énergie du secteur bâtiment qui représente en 2013 plus de 38% de la consommation globale nationale.

Cette dernière a atteint 30 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2013 (cf. Fig. IV.1). Le chauffage constitue 46% de la consommation totale de ce secteur. Les utilisations électriques représentent 19% de la consommation totale d'énergie nationale dont 40% sont consommés dans le secteur habitat (APRUE, 2015).

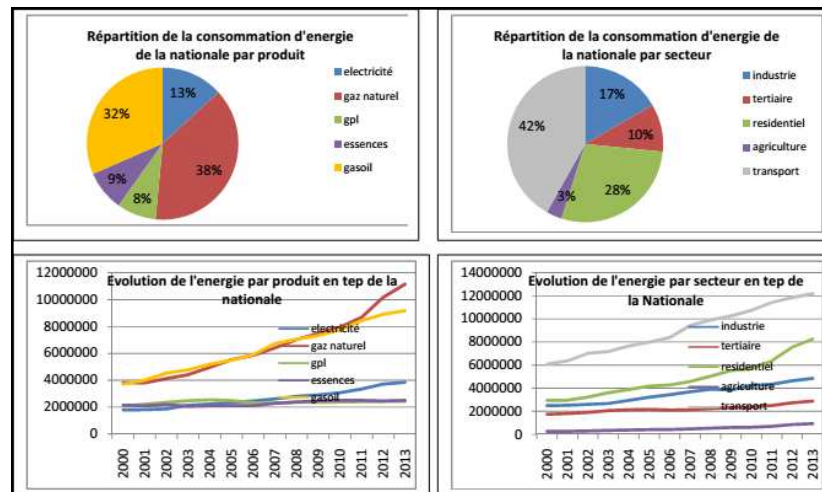


Fig.IV.1 : Répartition de la consommation d'énergie par produit et par secteur en Algérie. (APRUE, 2015)

Cette augmentation s'explique certes par une forte progression en équipements électroménagers, audiovisuels et de téléphonie mais aussi par l'augmentation du parc logement inadapté au contexte climatique. (cf. Fig.IV.2),

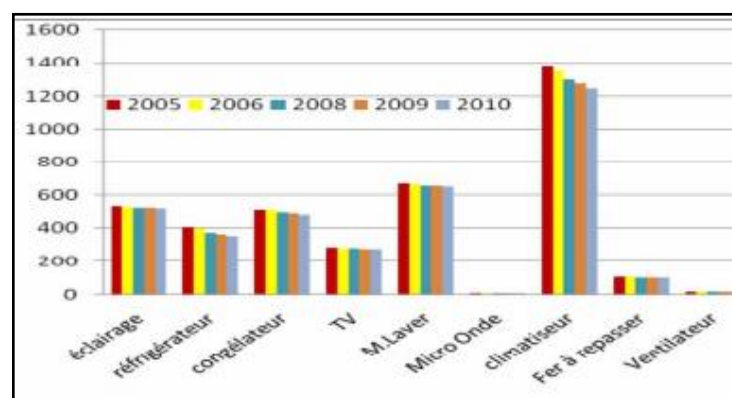


Fig. IV.2 : Consommation électrique spécifique annuelle en KWh des équipements ménagés. (APRUE, 2010)

La consommation électrique liée à la climatisation est aussi la plus importante, elle représente 43,18 % de la consommation totale (APRUE, 2010).

Ces chiffres montrent que l'amélioration de l'efficacité énergétique constitue un des défis majeurs notamment dans un contexte de changements climatiques. L'enjeu est d'améliorer le confort des citoyens tout en réduisant la consommation d'énergie.

L'intégration du facteur climatique dès les premières étapes de conception soit de l'échelle urbaine jusqu'à l'échelle architecturale est garante d'une production de l'espace en harmonie avec son environnement et dont le fonctionnement réduit au minimum l'utilisation énergétique.

Cette intégration n'est malheureusement pas abordée dans notre réglementation.

De ce fait, une approche scientifique se présente pour analyser chaque paramètre climatique afin d'aboutir aux stratégies les plus adéquates.

IV- 1 - Présentation du site d'intervention

La ville nouvelle Ali Mendjeli ($36^{\circ}15' N$, $6^{\circ}35'E$), faisant partie intégrante de la ville de Constantine ($36^{\circ}17' N$, $6^{\circ}35'E$), ville du Nord d'Algérie, est située au sud de cette dernière à environ 18 km du centre ville. Elle est localisée sur le territoire des communes d'Ain Smara et d'El Khroub. (cf. Fig. IV.3)



Fig. IV. 3 : Situation de la ville nouvelle Ali Mendjeli. (Google, 2015)

Elle couvre une superficie assez vaste de 1500 hectares sur un plateau de plus 780 mètres d'altitude (cf. Fig. IV.4) légèrement ondulé et raviné présentant des pentes variables mais généralement faibles. Ce n'est que dans certaines zones où elles s'élèvent jusqu'à 10% (cf. Fig. IV.5).

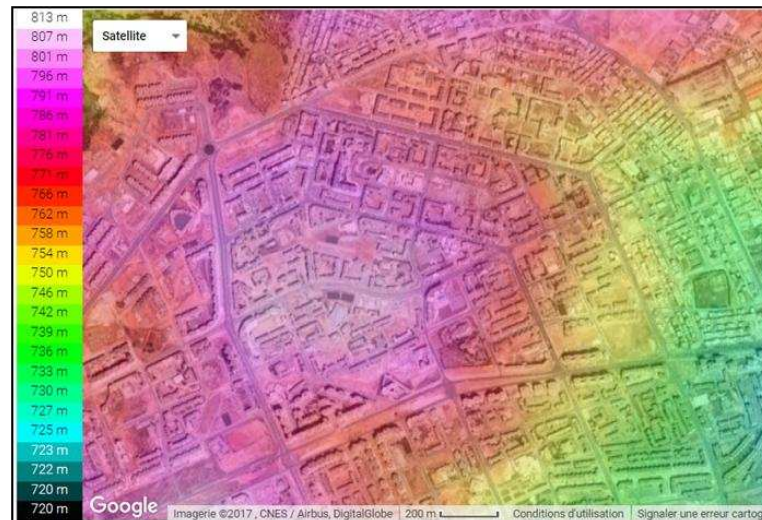


Fig.IV. 4 : Les altitudes à Ali Mendjeli. (<http://fr-lu.topographic-map.com>)

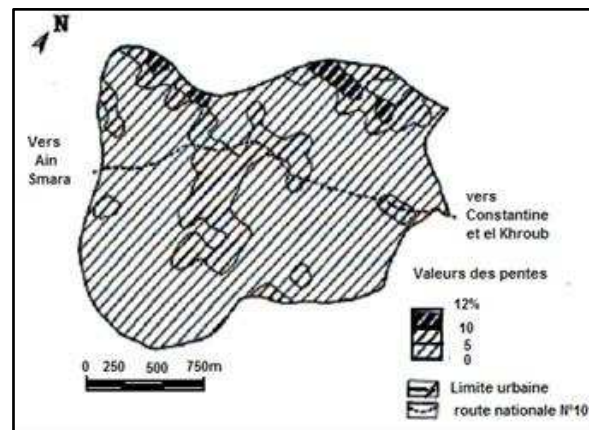


Fig.IV. 5 : Carte des pentes de la ville nouvelle Ali Mendjeli. (Louafi. S, 2005)

De par son plan et paysage urbain, la ville nouvelle est marquée par une influence directe de l'urbanisme moderne. L'absence de finition et de confort sont ses caractères dominants (Foura et Foura, 2006).

L'espace public est simplement ce qui n'a pas été construit, mal traité, mal défini et sans réflexion sur ses relations avec l'environnement bâti. (cf. Fig. IV.6).

L'insuffisance voire l'inexistence des aménagements des espaces extérieurs, à l'exception des trottoirs, confère à la ville une image de chantier toujours en cour.

La ville vit un grand déficit en espaces verts, mobilier urbain, placettes aménagées, espaces de promenades et de détente....etc.



Fig. IV. 6 : Vue aérienne de la ville d'Ali Mendjeli. (Google.2016)

La majorité des immeubles qui constituent les différents quartiers sont de cinq à six niveaux (exception faite pour quelques immeubles qui vont jusqu'à seize niveaux). Ces immeubles sont desservis par des rues larges et s'organisent autour d'enclos (forme îlot). Cours urbaines multidirectionnelles, de forme quadrilatère pour la plupart et de dimensions majoritairement exagérées. Leurs dimensions sont assez conséquentes qu'on pourra assimiler à celles des places urbaines (**cf. chap. I**) et qu'on a retenues pour stations de mesure en absence de véritables places.

Les rues et les carrefours sont aussi surdimensionnés. A cela s'ajoute leur nudité, ce qui joue en faveur d'un ensoleillement intense en été et une ouverture aux vents froids d'hiver. Ceci induira incontestablement en un inconfort thermique aussi bien pour le piéton que l'habitant (**cf. chap. I**).

Pour pouvoir déterminer le contexte climatique et bioclimatique auxquelles appartient la ville nouvelle Ali Mendjeli, il est indispensable de procéder à une étude climatique et une autre bioclimatique de la région de Constantine.

IV-2- Etude climatique de Constantine (ville nouvelle Ali Mendjeli)

L'étude climatique de la région de Constantine, nous servira de base pour l'intervention sur le champ d'investigation Ali Mendjeli, principalement sur la base des données météorologiques pour la période 2007- 2016 fournies par l'ONM sis à Alger dont les stations de mesure sont situées à l'aéroport Mohamed Boudiaf donc très proche de notre site d'intervention (**cf. Fig.IV.3**).

Constantine bénéficie d'un climat Méditerranéen, d'après la classification climatique de Köppen, «CSA» des climats subtropicaux à été sec. Cette zone a des hivers relativement doux et des étés très chauds. La température moyenne est supérieure à 18 ° C durant les mois les plus chauds, et une moyenne durant les mois les plus froids de -3 à 10 °C. Les étés ont tendance à être secs avec moins d'un tiers de celle du mois le plus pluvieux de l'hiver, et avec moins de 30 mm de précipitations durant les mois d'été (<http://www.weatherbase.com>) (cf. Fig. IV.7).

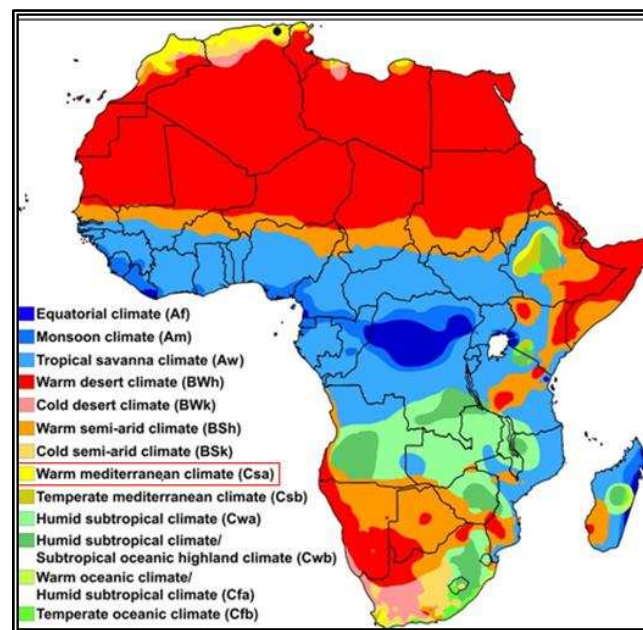


Fig. IV.7 : Climat de Constantine selon la classification Köppen.
(<https://twitter.com/observeafrica>)

D'après les données climatiques de la ville de Constantine (cf. Tab. C-1 annexe C) et la classification du Tab.C-4 (cf. annexe C), elle est située dans la zone bioclimatique d'hiver **H2** et la zone d'été **E2** dont les caractéristiques sont décrites en annexe C.

✚ Interprétation des données climatiques

Constantine reçoit les rayons solaires durant toute l'année (cf. annexe C, Fig.C-1). Le rayonnement solaire est intense et de l'ordre de 7380 Wh /m² sur un plan horizontal pendant le mois de **Juillet** qui correspond à une durée d'ensoleillement de 337 heures et qui peut dépasser 14h par jour (cf. Fig.IV.8).

En hiver, le rayonnement solaire incident atteint son minimum pendant le mois de Décembre soit une intensité de 1088 Wh /m² sur un plan horizontal qui correspond à

une durée d'insolation de 152 heures et qui peut atteindre 9h par jour (cf. **Fig. C-2, annexe C**).

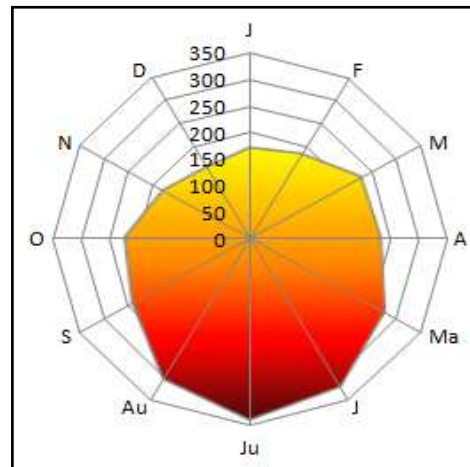


Fig.IV.8 : Moyenne mensuelle de la durée d'insolation totale en heure de Constantine. Période 2007-2016 (Auteur).

Ces valeurs montrent les potentialités qu'offre l'ensoleillement à Constantine. Ceci nous incite à en tirer profit pour les espaces ouverts et l'intégrer comme source d'énergie gratuite pour les bâtiments en hiver tout en pensant à la réduction de la surchauffe en été.

A Constantine, le pourcentage moyen du ciel couvert par les nuages connaît d'importantes variations saisonnières au courant de l'année. Le mois de juillet représente la période la plus claire de l'année (94% du temps de ciel dégagé) et le mois de janvier est le plus couvert en cette période (48% du temps très nuageux), (cf., **annexe C, Fig. C-3**).

La température moyenne annuelle à Constantine est de **15,7 °C**. En moyenne, le mois le plus chaud est **Juillet** avec une température de 26,5 °C, les maximales peuvent dépasser les 40°C pendant les mois de **Juin, Juillet** et **Aout**.

Le mois le plus froid, en moyenne, est **Janvier**, avec une température de 7,4 °C les minimales peuvent atteindre les -3°C pendant les mois d'hiver (cf. **annexe C, Tab. C-1** et **Fig .IV.9**).

Ceci nous laisse distinguer trois périodes :

➤ **La période chaude** : Les mois d'été **Juin, Juillet, Août** et même **Septembre** sont considérés des mois chauds avec des températures moyennes maximales allant de 27.8 à 34.8°C. Les températures moyennes nocturnes restent très douces voire fraîches allant de 14°C le mois de juin jusqu'à 17.9 °C pour les mois de Juillet et Août.

➤ **Intersaison : Avril, Mai et Octobre** correspondent à la période confortable avec des températures moyennes mensuelles maximales de **20 à 25°C** (cf. annexe C, Fig. C-5).

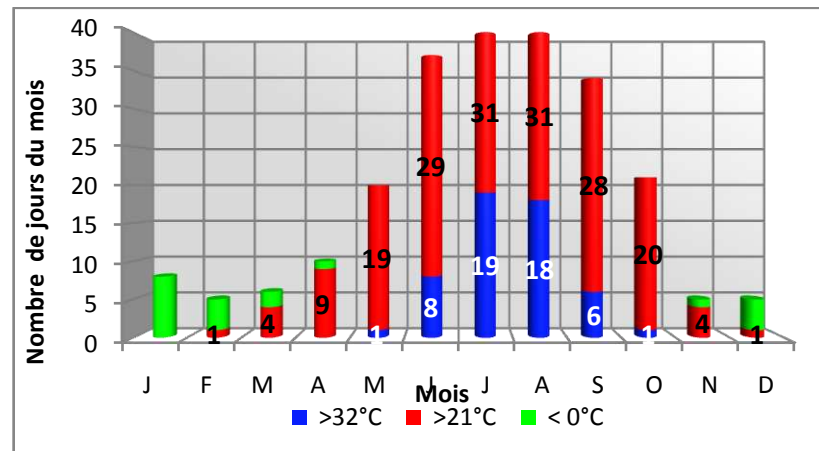


Fig.IV. 9 : Nombre de jours très froids, très chauds et caniculaires à Constantine. Période 1996-2016 (Auteur).

➤ **La période froide :** qui s'étale de **Novembre** jusqu'à **Mars** est considérée comme froide. Les températures moyennes mensuelles diurnes restent très froides ne dépassant pas les 10°C.

L'humidité relative varie entre les deux périodes hivernale et estivale. (cf. Fig. C-6, annexe C). Les minimales varient entre 24.9% pour le mois de Juillet et 58.6% pour le mois de Décembre. Les maximales varient entre 74.4% pour le mois de juillet (mois chaud) et 94.6 % pour le mois de Février. La moyenne annuelle est de l'ordre de 65.1%. Ceci confère à la région de Constantine un climat froid et humide en hiver et sec et chaud en été.

La quantité moyenne des précipitations annuelles à Constantine est de 480,6 mm. Le mois le plus pluvieux, en moyenne, est Mars avec 71.4 mm de précipitations. Le mois le plus sec en moyenne est Juin avec une moyenne de 12.9 mm.

L'indice de De Marton évalué à **18.7** indique que ce climat est **semi-aride** (cf. annexe C).

Les vents dominants à Constantine sont de direction **Nord Nord-Ouest**. En hiver, prévalent les **Nord Nord-Ouest**, vents froids, et **Nord** en été. Le sirocco (vent chaud) souffle au moins une fois en été (cf. annexe C, Fig. C-7).

Les vents dans cette région sont en moyenne faibles. Leurs vitesses varient de 2.3 à 3.35 m/s (cf. Tab. C-7, annexe C). La moyenne est de l'ordre de 2,5m/s, force 2 sur l'échelle de Beaufort (cf. annexe A, Tab. A-4), considérés comme des légères brises.

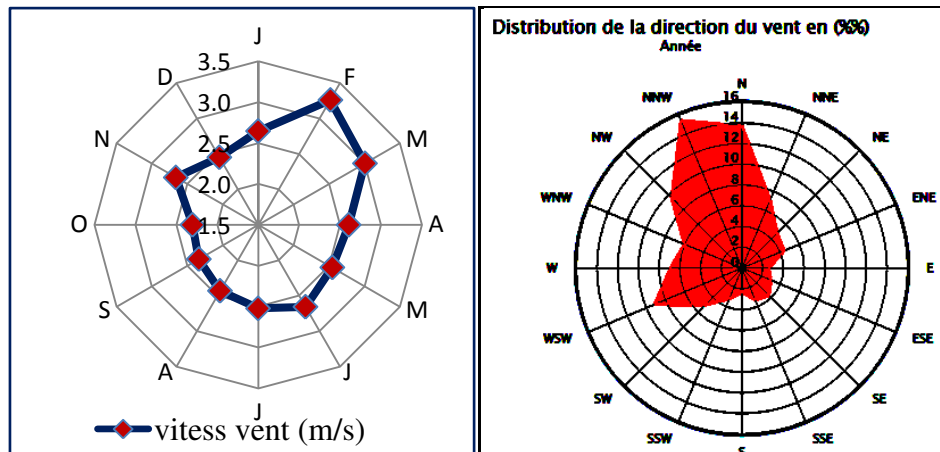


Fig.IV. 10 : Diagrammes des variations des directions et vitesses du vent de la ville de Constantine. Période 2007-2016 (Auteur).

IV- 3- Analyse Bioclimatique de Constantine (ville nouvelle Ali Mendjeli)

Pour concevoir un espace en accord avec le climat, il est nécessaire d'avoir assez d'information à son sujet. L'analyse des données climatiques enregistrées par la station de météorologie est une méthode pour déterminer les besoins climatiques.

IV- 3- 1- Le diagramme bioclimatique d'Olgay

Le diagramme bioclimatique d'Olgay (Olgay, 1963) est une méthode d'évaluation simple et rapide du confort thermique extérieur basée sur une approche graphique. Elle a été élaborée à partir d'études réalisées à l'extérieur et non à l'intérieur des bâtiments.

Olgay a été le premier à relier le confort et le climat d'un point de vue graphique. (Voir le diagramme d'origine en annexe C). Par la suite, Le diagramme psychrométrique a été diffusée comme un des outils de base pour les études du confort à l'intérieur des bâtiments Ceci dit qu'il tient en partie compte des adaptations des personnes qui diffèrent selon les saisons (Reiter , 2007).

Le diagramme bioclimatique de la **figure IV.11** simplifié et adapté par Liebard et de Herde (2005) pour nos latitudes portant une zone de confort (A) et une deuxième zone (B) liée aux conditions de vent. La **figure IV.12** donne l'interprétation d'Olgay de son diagramme pour expliquer comment les différents paramètres microclimatiques peuvent être utilisés pour étendre la zone de confort.

L'application de ce diagramme à notre contexte d'étude où la zone de confort est comprise entre 20 - 25°C (voir calcul de la température neutre pour la région de

Constantine en **annexe C**) pour une humidité relative moyenne d'environ 65% elle peut être étendue à 27°C pour 30% d'humidité.

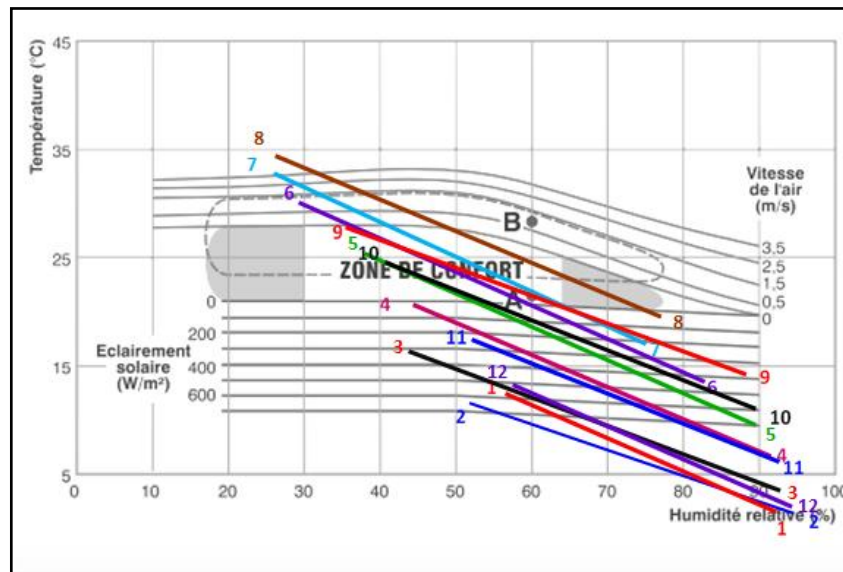


Fig.IV.11 : Diagramme bioclimatique d'Olgay appliqué à Constantine (Auteur).

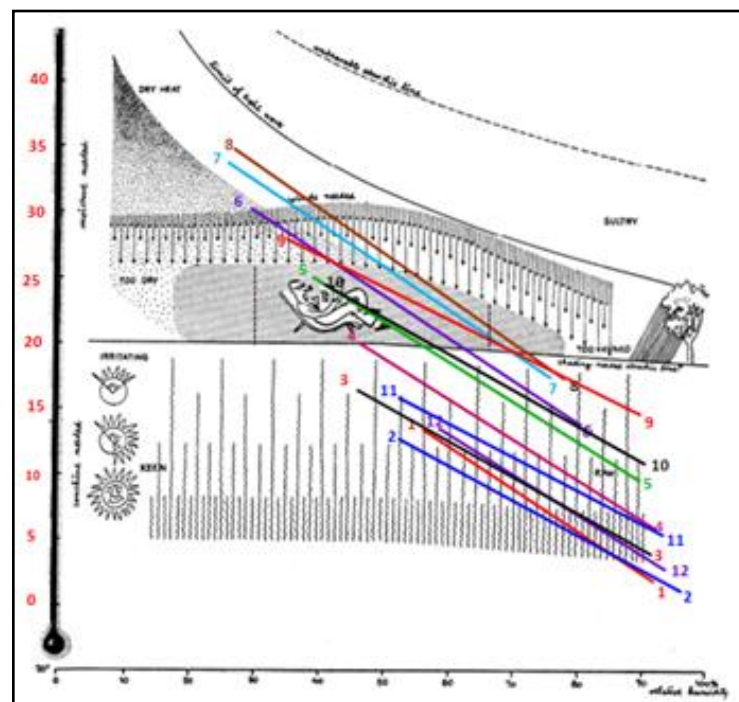


Fig.IV. 12 : Schéma des indicateurs bioclimatiques d'Olgay appliqué à Constantine (Auteur).

La lecture de ces deux figures indique que :

✓ Les températures maximales des mois de **Novembre** à **Avril** restent inférieures à la zone de confort pour une situation à l'ombre.

Il est donc extrêmement important de valoriser le rayonnement solaire direct dans les espaces publics afin d'atteindre le confort thermique.

Il faut mentionner que les minima des trois mois d'hiver, Décembre, Janvier et Février indiquent que même le rayonnement solaire ne permet à lui seul d'atteindre le confort. Seul l'habillement peut palier à une situation d'inconfort.

Si on se réfère à la norme de confort thermique Penwarden (**cf. chap.I, section 1.3.2**) à l'ombre sans mouvement d'air, le passage de 1 Clo à 1.5 Clo permet de gagner environ 6°C en température. Le passage de l'ombre au soleil avec 1 Clo permet de gagner 13°C en température.

Le besoin en ombre commence dès la température de 20°C (zacharias et stathopoulos, 2001 ; Penwarden, 1975 ; westerberg, 1994). Il englobe les mois d'**Avril** jusqu'en **Octobre**.

✓ pour les mois de **Mai** et **octobre** (intersaison) s'abriter du soleil ou s'y exposer selon le besoin permet d'atteindre le confort.

✓ Pour les mois de **Juin** et **Septembre**, l'ombre à elle seule ne suffit pas.

Des mouvements d'air de 0.5 à 1.5 m/s sont recommandés pour ramener l'ambiance à la zone de confort.

✓ La période la plus critique concerne les deux mois chauds de l'année, **Juillet** et **Aout**, où seule une évaporation conjuguée à des mouvements d'air qui dépassent les 3.5 m/s peuvent garantir le confort.

Toutefois, il faut noter que pendant cette période où les températures peuvent dépasser les 35°C (**voir supra, Fig.IV.9**) les mouvements d'air et l'évapotranspiration seront plutôt cause d'inconfort, vent chaud (effet séchoir) et humidité de l'air ne permettent pas au corps humain le refroidissement par sudation.

Projeter les données climatiques et des limites du confort thermique sous formes d'isothermes sur le calendrier des besoins climatiques proposé par Victor Olgyay (Olgyay,1957) qui couvre toute l'année et transférer ces l'information sur le diagramme solaire de Constantine (Ali Mendjeli) donnent une interprétation graphique des conditions climatiques et donc déterminent le mode d'emploi de l'espace ouvert sur les différentes périodes de l'année en mois, jours, et heures : période de besoin en soleil, de besoin en ombre, périodes où le soleil ou l'ombre sont indésirables, conditions

critiques très froides en hiver ou conditions très chaudes en été qui rendent incommode l'usage des espaces ouverts. (cf. Fig. 13, 14).

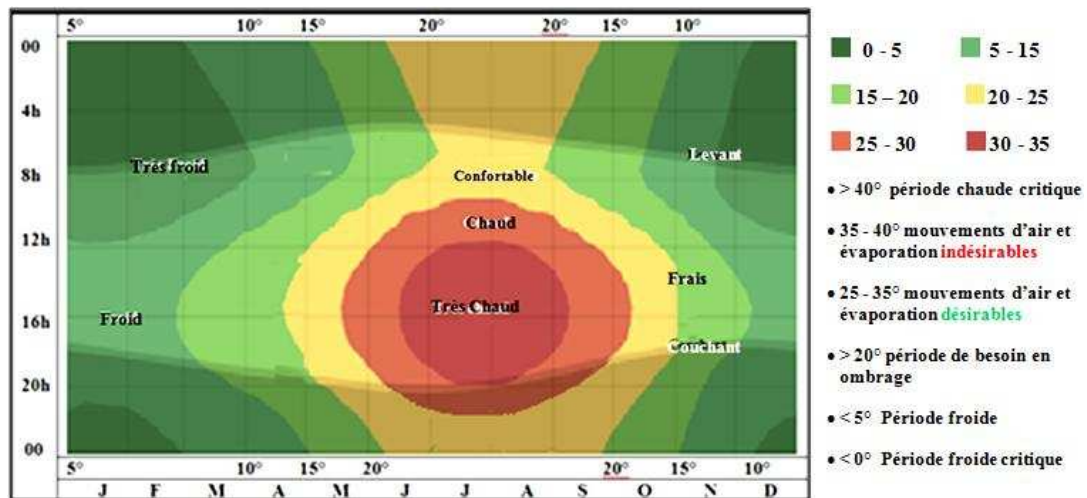


Fig. IV.13 : Calendrier des besoins climatiques de Constantine (Auteur).

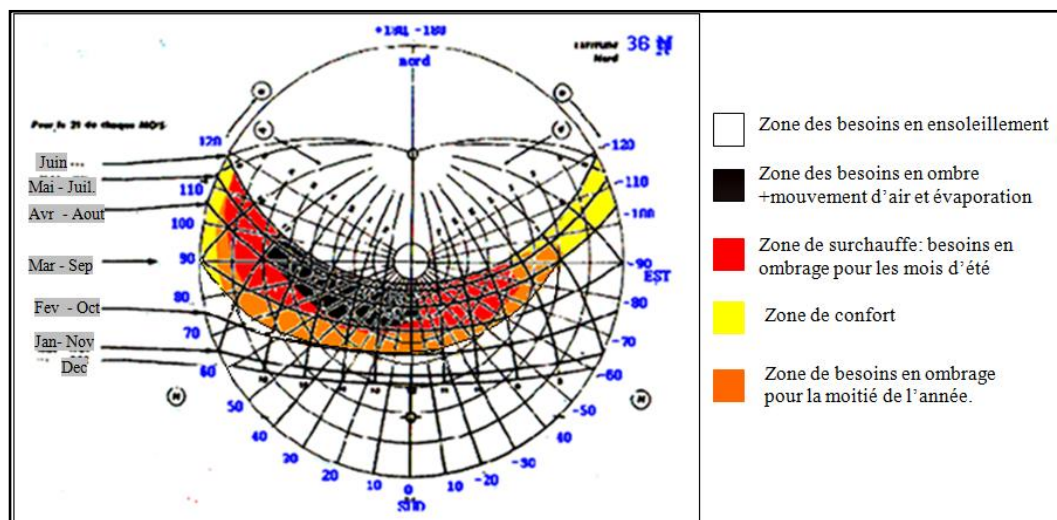


Fig. IV.14 : Diagramme solaire de la ville de Constantine et besoins climatiques (Auteur).

Le calendrier climatique de Constantine indique que :

✓ Plus de la moitié de l'année, l'ombre est demandée à Ali Mendjeli principalement en saison d'été, zone de surchauffe qui englobe les mois d'été (juin, juillet et août). De 10h jusqu'à 17h, les températures de l'air sont supérieures à 25°, à ce moment, le soleil est perpendiculaire, et son intensité est maximale, où on doit chercher le maximum d'ombre et de protection.

Durant cette période, les nuits sont confortables à chaudes donc utiliser des matériaux avec un albédo élevé pour éviter d'alimenter le flux sensible avec les radiations en grandes longueurs d'onde des matériaux chauds la nuit est une bonne stratégie. Cependant leurs réflexions constituent un flux thermique en plus pour les piétons et les bâtiments (cf. chap. I. Section. I -2-3-a).

Ou bien utiliser des matériaux à faible albédo et s'ouvrir vers la voute céleste pour le refroidissement de l'espace.

✓ **Durant la période chaude**, favoriser les mouvements d'air et l'évaporation sont deux bonnes stratégies pour atteindre le confort thermique approprié.

Donc il est nécessaire d'ouvrir l'espace vers les brises d'été et **de prévoir des bassins, des fontaines et des jets d'eau ainsi que de la végétation dans les espaces ouverts.**

En cette période d'été, si les températures maximales dépassent les 35°C, il est **recommandé de s'abriter dans les espaces clos** et d'éviter les espaces ouverts.

Le calendrier climatique de Constantine indique aussi que **le besoin en ensoleillement touche aussi la moitié de l'année (voir supra).**

Le rayonnement solaire qui intervient principalement entre **10h** et **14h** pour la durée d'ensoleillement la plus courte doit être valorisé dans les espaces extérieurs.

De même en hiver si les températures sont au dessous de 5°C où le vent concoure avec les basses températures à créer une ambiance glaciale l'utilisation des espaces ouverts est à **proscrire** dans ces conditions.

Pour concevoir les bâtiments en rapport avec leurs climats, l'analyse bioclimatique repose aussi sur l'analyse des données climatiques de Constantine en exploitant les tableaux de Mahoney, et le diagramme psychrométrique pour ressortir des recommandations passives conformes aux constructions en climat de la région.

IV- 3-2- Application de la méthode de Mahoney

En appliquant la méthode de Mahoney sur la région de Constantine de latitude 36°15 Nord (**voir annexe C**), les recommandations suivantes sont déduites :

- ✚ Orientation des bâtiments Nord – Sud (Grand axe Est – Ouest) pour des gains minimaux en été et des gains solaires maximaux en hiver.
- ✚ Compacité du plan de masse et du volume. Pour une exposition minimale des façades à l'extérieur.
- ✚ Les mouvements d'air ne sont pas recommandés.

✚ Ouvertures moyennes qui représentent 20 à 40% de la surface totale des murs sont recommandées.

Ces ouvertures sont de petite taille 15 - 25% de la surface du mur placées au Nord et au sud. Prévoir aussi des ouvertures dans les murs intérieurs, pour optimiser l'effet isolant de la grande masse thermique des murs et en même temps diminuer les gains de chaleur.

✚ Murs extérieurs et intérieurs épais et à forte inertie (matériaux à grande capacité thermique). Dans le but de retarder la transmission de la chaleur extérieure du jour vers l'intérieur par l'enveloppe massive et isolante du bâtiment, jusqu'à la chute de température à la tombée de la nuit.

✚ Toit massif et bien isolé avec un temps de déphasage dépassant les 8 heures.

✚ Espaces extérieurs sont recommandés pour dormir le soir.

✚ Drainage adéquat des eaux pluviales.

✚ Protection nécessaire des ouvertures de la pluie et des rayons solaires.

IV- 3- 3 - Le diagramme psychrométrique

Le diagramme psychrométrique (cf. Fig. IV. 15) établi selon Ashrae standard 55* par le logiciel libre Climat consultant 6.0 développé par le UCLA (2013)** rend une synthèse des principaux dispositifs climatiques pour les bâtiments à Ali Mendjeli : La zone de confort, les zones des stratégies passives (2-14) et les zones des procédés actifs (15, 16) pour éviter tout stress thermique.

Le programme a pour données d'entrée (inputs) les données climatiques établies sous format Epw par le logiciel Météonorme 7. 0 et qui sont en grandes concordance avec celles de l'ONM. (cf. annexe C, Tab. C.1, 2)

Le programme donne pour chaque stratégie en heure et en pourcentage son pouvoir à rétablir le confort dans le bâtiment.

* **Ashrae standard 55 and Current handbook of Fundamentals Model:**

Le confort thermique est basé seulement sur la température à bulbe sec, le niveau d'habillement (clo), le métabolisme lié à l'activité (met), vitesse de l'air, humidité et laTmrt. A l'intérieur on suppose que le Tmrt est proche de la température à bulbe sec .La zone de confort est calculée en utilisant l'indice PMV. L'adaptation de l'habillement selon les saisons et la ventilation naturelle donne une marge plus large de confort que dans les bâtiments à climatisation centrale.

** University California Energy Design Tools Group, UCLA Department of Architecture and Urban Design.

L'analyse climatique de Constantine (Ali Mendjeli) indique que cette zone est thermiquement confortable pour seulement **15.9%** de l'année, soit l'équivalent de **1396h/ an**.

La demande en chauffage actif est de **67.9%**, soit l'équivalent de **5947h/an**.

La demande en climatisation est de **4.6 %** soit l'équivalent de **407h** par an.

Les gains de chaleur internes ont le plus grand impact sur la diminution de la demande en chauffage (**27.3%**, **2388h/an**), les **gains solaires directs** couplés à une grande **inertie thermique** peuvent abaisser la demande en chauffage de **22.5 %**, **1975h/an**.

Les gains à travers le vitrage abaissent la demande en chauffage de **14.9 %**, **1306h/ an**, et les dispositifs d'ombrage des fenêtres peuvent également abaisser la demande en refroidissement de **12.9%**, **1132h/ an**, l'évaporation de **5.8%**, **512h/an** la ventilation naturelle de (**3%**, **266 h**).

La ventilation forcée et la protection des vents extérieurs ont les plus faibles impacts soient (**2%**, **179 h**) et (**0.3%**, **28h**) respectivement, puisque les vents à Constantine sont faibles (**voir supra**).

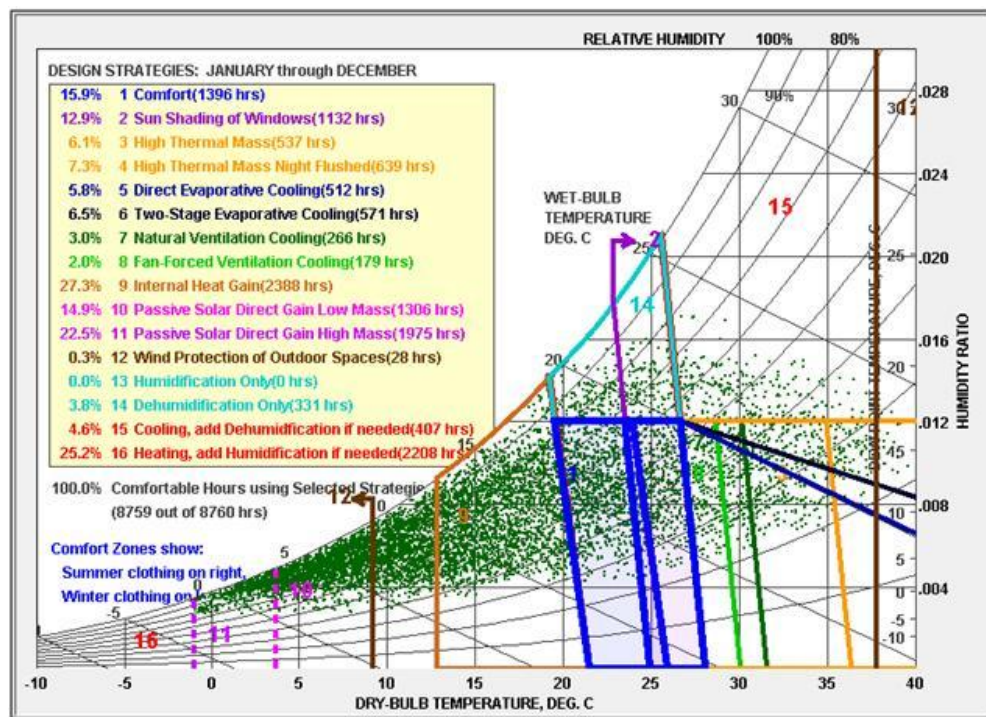


Fig.IV.15. : Diagramme psychrométrique de la ville de Constantine (Auteur).

Les stratégies passives donc peuvent assurer à elles seules environ **70%** de durée de confort. Le programme propose des solutions passives pour atteindre à **100%** le

confort thermique (cf. **annexe C, Fig.C.9, 10**). Nous ne citerons ici que les recommandations différentes de celles tirées des tableaux de Mahoney.

- ✚ Utiliser un vitrage double de haute performance basse énergie (Low-E) en ouest, Est et au Nord, mais simple et clair au sud pour maximiser les gains.
- ✚ Toiture plate et murs de couleur claire pour minimiser les gains.
- ✚ S'ouvrir aux brises d'été et favoriser une ventilation naturelle. Ces deux stratégies peuvent éliminer la climatisation, si les fenêtres sont orientées vers les brises d'été et protégées par les ombres.

IV- 4- Méthodologie et outils

Les recherches en micro-climatologie urbaine, se focalisent majoritairement sur deux aspects : la géométrie urbaine (forme urbaine) et l'aménagement urbain au sens de la composition de la surface urbaine

Comme cité auparavant, les formes bâties ont un effet considérable sur les conditions microclimatiques dans un espace urbain. Les distances entre les surfaces, l'orientation, la disposition verticale, horizontale ou inclinée des surfaces, le rapport hauteur largeur et la profondeur du bâti ont des influences certaines sur les effets thermiques (réception ou piégeage thermique) et lumineux (effet de masque et d'ombre portée), ainsi que sur les effets dynamiques d'écoulements de l'air.

Les propriétés optiques et thermiques des matériaux de surface (naturels ou artificiels) jouent un rôle considérable dans les échanges thermiques entre ces surfaces et modifient les facteurs climatiques.

Ces deux leviers de l'amélioration du microclimat pour le confort du piéton et l'habitant sont des paramètres complexes difficiles à caractériser et interdépendants.

En général, deux méthodologies sont utilisées :

a- Celle des recherches qui passent par des modèles génériques du tissu urbains qui permettent de dégager des tendances d'impact d'un paramètre. Les connaissances peuvent ensuite être mises en pratique sur des tissus réels (Ali-Toudert, 2005, Bouyer ,2009...)

Ces études nécessitent l'utilisation d'outils de simulations issus eux-mêmes de recherches tels que Solene-Microclimat, Envi-met, RayMan.....

Pour répondre aux différentes problématiques, les modèles sur lesquels reposent ces outils doivent permettre de prendre en compte les phénomènes physiques mis en jeu dans le climat (rayonnement, convection, conduction, écoulement d'air, humidité et

changement de phase), dans une forme urbaine complexe et composées d'éléments de surfaces et de volumes hétérogènes (nature et matériaux de surface, présence d'eau, de végétation).

b- Celle des campagnes de mesures, nécessaires pour établir une connaissance de référence du microclimat urbain en fonction de l'occupation des sols et de ses composants. Une tâche lourde et délicate en collecte, interprétation et exploitation des mesures vue la grande variabilité des formes et des composants.

Ces recherches sont en général suivies d'études de sensibilités par simulation via des programmes informatiques (que les campagnes de mesures sont un moyen de valider) selon les indicateurs dégagés de ces campagnes en vue d'une optimisation par différents scénarios (Bourbia et awbi (2004), Bouchriba et Bourbia (2006), Kedissa et Abdou (2010)...).

L'objectif de cette recherche est d'étudier le rapport entre la morphologie d'une composante du tissu urbain soit la place (ou cour urbaine, cœur d'ilot), combien variable, et son comportement microclimatique et évaluer l'impact de ce dernier sur le confort thermique des usagers de l'espace et la consommation énergétique des bâtiments qui l'entourent.

Cette recherche devrait aboutir à la détermination d'une stratégie d'intégration du microclimat dans la conception des places urbaine dans un climat contrasté comme celui de la région de Constantine, basée sur des règles de conception pour assurer le confort des piétons et pour limiter les consommations d'énergie des bâtiments.

Pour atteindre ce but, la première méthodologie est adoptée.

IV- 4- 1- La simulation

La simulation numérique a l'avantage, par rapport aux instruments de mesure, de pouvoir fournir une quantité de données très importante, dans différentes configurations, en plusieurs points de l'espace et à différents instants.

Pour notre cas, le recours à la simulation était plus que nécessaire pour obtenir des paramètres nécessaires à notre étude à savoir :

✚ Le calcul du facteur de vue du ciel (SVF) et son potentiel surfacique.

✚ La durée journalière d'ensoleillement et le potentiel surfacique de cette durée.

Ces deux indicateurs morpho-climatiques principaux permettent un diagnostic de la performance solaire des espaces urbains et bâtiments.

- ✚ la répartition des tâches d'ombre et de soleil pour comprendre les variations des températures surfaciques horizontales et verticales et leur corollaire vitesses aérauliques.
- ✚ Le calcul de la température moyenne radiante T_{mrt} .
- ✚ Le calcul des indices thermo physiologiques PET, et mPET afin de palper l'influence de la géométrie sur le confort thermique des usagers des espaces étudiés.
- ✚ Proposition d'une variété de scénarios d'amélioration du confort thermique dans les espaces étudiés.
- ✚ Evaluation de la consommation énergétique.

Les principaux outils de simulation des phénomènes physiques en milieux urbains utilisés dans cette recherche sont (voir description des logiciels en **annexe C**) :

IV- 4- 1-1- Townscope 3.2 :

Modèle thermo-radiatif pour simuler les phénomènes solaires : le SVF, nombre d'heures d'enseillement journalier, les ombres portées et les masques solaires.

✚ Proportions des places simulées

Pour tester quelles sont les meilleures géométries qui répondent au confort thermique hivernal et estival extérieur et son corolaire intérieur, plusieurs géométries ont été simulées par ce logiciel pour les quatre orientations des espaces* identifiés à une place, soient : Nord- sud, Nord est- Sud ouest, Nord ouest-Sud est et Est-Ouest. En faisant abstraction, pour cette première phase de simulation, des irrégularités par rapport aux formes, et variations des percées (ouvertures dans le périmètre) des configurations, on considère les dimensions des formes allant du carré** au rectangle étroit.

Les proportions de la longueur (L) à la largeur (W) sont :

$$L= W, L= \frac{3}{2} W, L= 2 W, L= \frac{5}{2} W, L= 3W.$$

L maximale = 3W selon les recommandations de C.Sitte (**cf. chap. III**)

La largeur W est augmentée d'un pas de $\frac{1}{2} W$ (**Fig. IV.16**), donc on aura:

* L'orientation d'une place est la direction de l'axe longitudinal.

**Inclue également les formes circulaires ou polygonales qui peuvent s'inscrire dans un carré.

$W * W, W * \frac{3}{2} W, W * \frac{4}{2} W, W * \frac{5}{2} W, W * \frac{6}{2} W \dots \dots \dots 3 W * 3 W.$

Se référant à la littérature (cf. chap. II), W sera compris dans l'intervalle [30- 135m] avec un pas de 1/2 W comme il a été déjà mentionné.

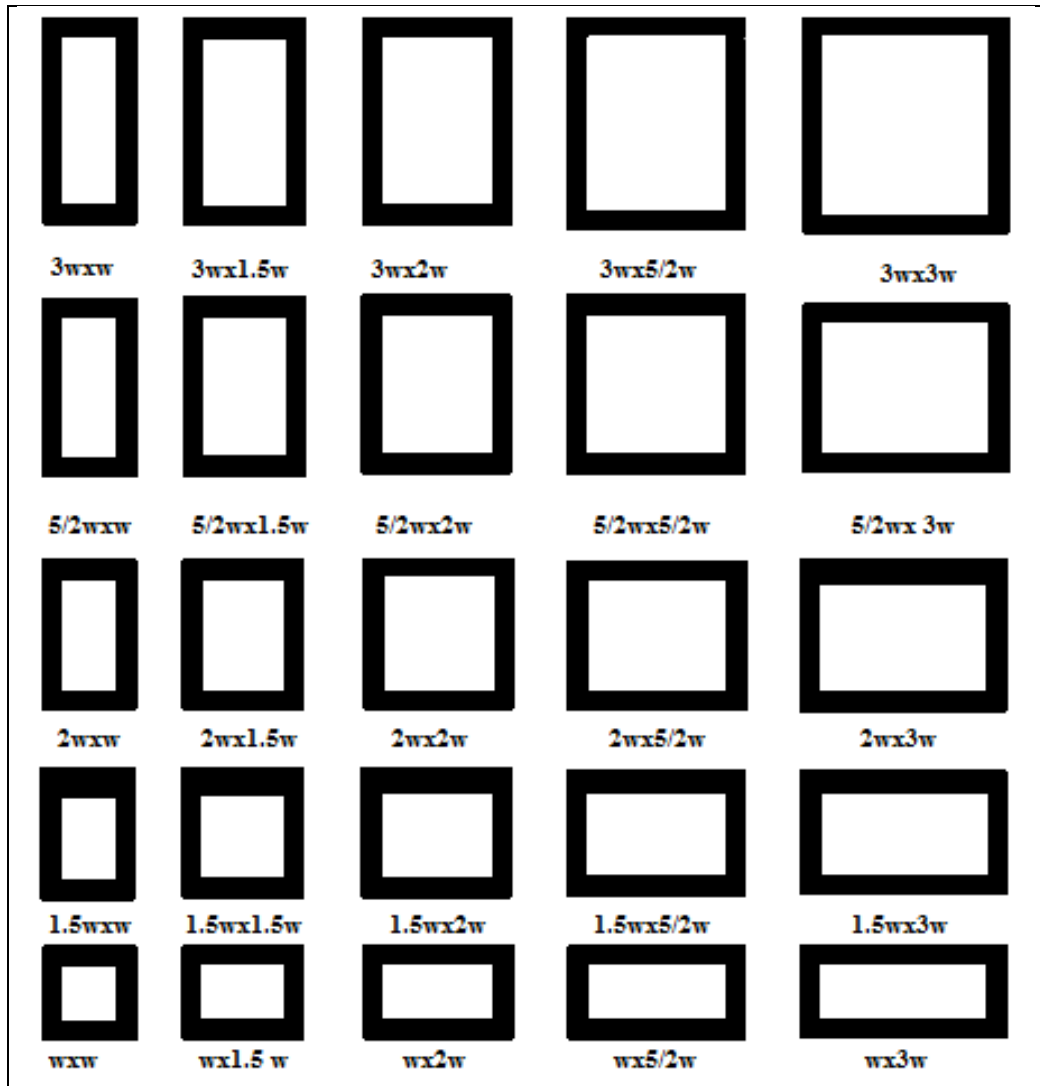


Fig. IV.16 : Périmètres des configurations simulées (Auteur).

Les hauteurs des bâtiments sont comprises entre 3 - 72m avec un pas de 3m l'équivalent d'un étage donc 3 à 24 étages (cf. Fig. IV.17).

Pour déterminer les configurations qui répondent au mieux à un compromis de confort thermique hivernal et estival c.à.d :

- Assurer un apport thermique aux surfaces au sol et aux bâtiments et un ensoleillement désirable des espaces urbains durant l'hiver.
- procurer une ombre suffisante en été.

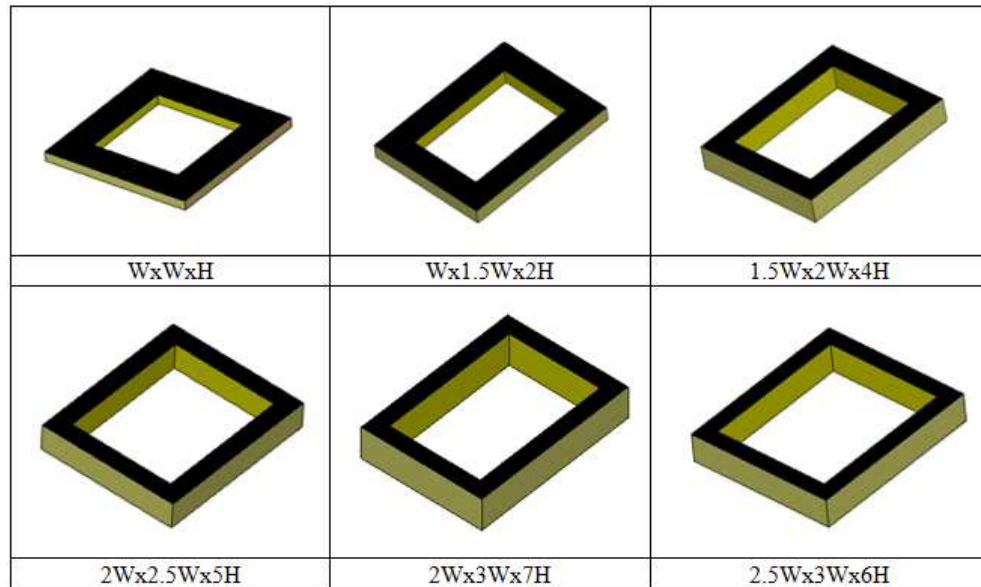


Fig. IV.17 : Proportions de quelques configurations simulées (*Auteur*).

Pour atteindre cet objectif nous assumons qu' :

1. Au solstice d'hiver (21 Décembre), au moins les 50% de la surface au sol de la place (cour) soient ensoleillée.
2. Au solstice d'été (21 juin), la durée de son ensoleillement au sol est l'équivalent au maximum à la moitié de la durée maximale journalière d'ensoleillement, soit un peu plus que 7h (14h.28' / 2) pour le point le plus exposé.

Les géométries conformes aux deux conditions précitées et au droit au soleil pour les habitations seront simulées par le logiciel Envi-met 3.1.

IV-4-1-2-Envi-met 3.1:

Un modèle thermo-aéraulique libre (<http://www.envimet.com>).

Ce modèle permet de calculer les flux radiatifs en courte longueur d'onde, les réflexions et les radiations dissipées depuis les bâtiments et la végétation dont le calcul de la Tmrt, les températures de l'air et des surfaces horizontales et verticales, le taux d'humidité, la vitesse du vent et évalue l'incidence de tout les aménagements urbains sur l'ambiance thermique et le confort humain dont le calcul du PMV.

Le Rayonnement solaire d'Envi-met 3.1 pour les journées de simulation a été calibré avec les données de Constantine pour la fiabilité des outputs.

La fiabilité d'Envi-met pour simuler la performance thermique des espaces extérieurs a été prouvée à plusieurs reprises (Dain J et al, 2015; Ghaffarianhoseini A et

al, 2015; Taleghani et al, 2014 a, b; Perini k et al ,2014; Bonggeun S et ,2015; Yahia MW et al, 2014; Tsitoura M et al, 2011). Ces études ont démontré un accord entre les températures de l'air mesurées (des mesures sur le terrain ou des données observées aux stations météorologiques locales) et simulées que nous avons constaté par nous même où une corrélation de plus de 90% a été trouvée (cf. Fig. IV. 18).

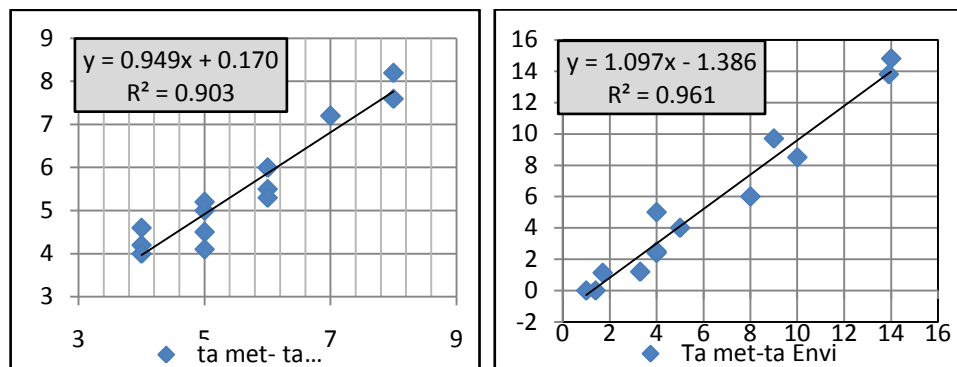


Fig.IV.18 : Corrélation entre les données climatiques (Hiver à droite et Eté à gauche)fournies par la météo et simulées par Envimet 3.1. (Auteur)

Les journées retenues sont :

- Le solstice d'hiver, le soleil est bas dans le ciel et balaie le secteur azimutal le plus faible. Deux journées ont été retenues pour cette période :

- ✚ 21 /12 représentant une journée froide typique d'hiver.

- ✚ 23 /12 représentant une journée ensoleillée propice pour la fréquentation des espaces publics.

- ✚ Le solstice d'été, car la journée solaire est la plus longue. Le soleil atteint sa hauteur la plus élevée et balaie le secteur azimutal le plus large, de part et d'autre du Sud.

De même deux journées ont été retenues.

- ✚ 21 /06 représentant une journée type de juin.

- ✚ 26 /06 représentant une journée caniculaire dans la décade, appréhendant ainsi le réchauffement climatique de la planète.

Donc si on arrive à déterminer les conditions de confort thermique pour ces deux périodes, on estime balayer toute l'année.

Il est à noter que les quatre stations présentent une similitude dans:

- Les propriétés thermiques des matériaux au sol et en façades horizontales et verticales (cf. Tab. IV.1).

- L'orientation au soleil et au vent.

Cela permettra de vérifier l'impact du seul paramètre géométrie sur le confort thermique durant les deux périodes critiques, hiver et été du climat semi-aride d' Ali Mendjeli

Tab. IV. 1 : Les données d'entrée pour les simulations. (Source Auteur)

Latitude (°)		36°17'N	
Longitude (°)		6°35'E	
Altitude (m)		780	
ENVI-met 3.1	Début de la simulation (h)	00	
	Totale d'heures de la simulation (h)	24	
	Pas de temps (h)	2	
	Date	21/12 -23/12	21/06- 26/06
	Température Initiale (°C)	6 / 4	22 / 25
	Vitesse du vent mesurée à la hauteur de 10 m (m/s)	4.1 / 00	1 /00
	Direction du vent (°)	320 / 0	0
	Humidité Relative (%)	87	57
	Longueur de rugosité du site de mesure	0.1	
	Nébulosité (octa)	00	
	Facteur de l'ajustement des ondes courtes	0.82	
	Albedo du sol, mur et toiture	0.25, 0.5, 0.18	
	Transmission de la chaleur (W/m²K): mur, toiture	2, 1.94	
	Hauteur du récepteur (m)	1.1	
	résistance thermique des vêtements (clo)	0.9, 2, 1.5	0.9, 0.5
RayMan	Activité (W)	80 w	
	Données de la personne (taille, poids, âge, sexe)	1.75m, 75kg, 35ans, male	

IV-4-1-3-RayMan pro 3.1 :

Modèle thermo-physiologique. Dans cette recherche, il est utilisé comme calculatrice des indices thermo-physiologiques PET et le tout récent indice mPET ayant comme paramètres d'entrées : la température de l'air (°C), l'humidité relative (%), vitesse de vent (m/s) et la Tmrt (°C), recueillis depuis les outputs des simulations d'Envi-met 3.1.

IV-4-1-4- Trnsys 17

Logiciel de simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment, destiné dans cette recherche à évaluer l'influence des places sur la consommation énergétique des bâtiments attenants.

L'objectif est non pas d'évaluer les besoins réels en énergie pour le confort thermique, cela nous conduirait à chercher à optimiser l'enveloppe, le type et le pourcentage du vitrage,ce qui est loin d'être notre champs d'investigation, mais de faire une comparaison entre la consommation des zones qui donnent sur la place par rapport à leurs opposées afin d'évaluer l'impact de leurs rapports dimensionnels sur les économies d'énergie.

A ce stade, ces blocs sont considérés opaques, pour éviter des confusions quant aux différences en pourcentages de surfaces d'ouvertures ainsi que la ventilation.

Chaque barre entourant la place selon son orientation est sectionnée longitudinalement sur deux. Le mur qui sépare les deux sections est considéré adiabatique pour limiter les échanges entre les deux zones.

Les 3 blocs restants sont définis comme une zone d'ombre qui affecte l'ensoleillement du sol et les parois de la barre car Trnsys 17 prend en charge les masques solaires des obstacles environnant (**cf. Fig.IV.19**).

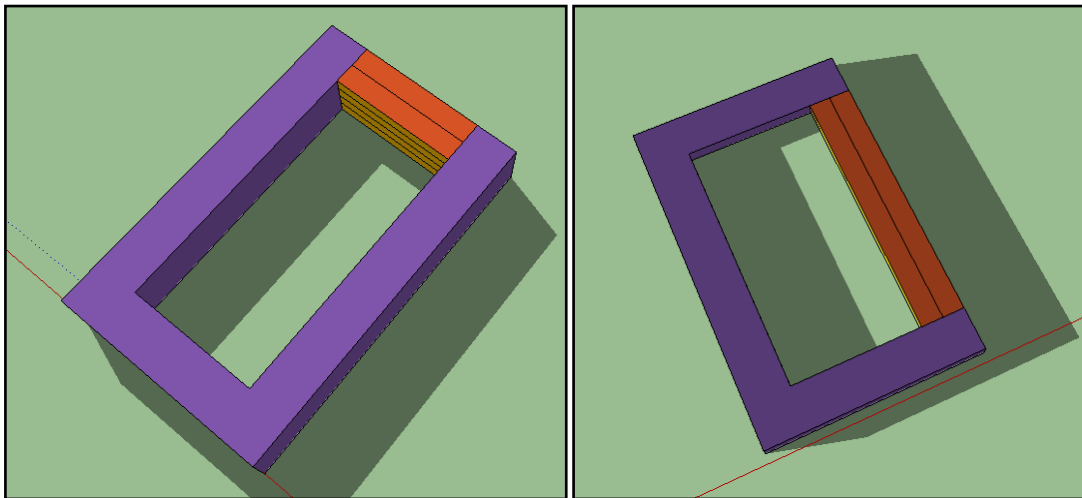


Fig.IV.19 : Parois et masques solaires pour évaluer la consommation énergétique autour de la place (*Auteur*).

Les propriétés thermiques des parois sont les suivantes :

- Mur extérieur : enduit plâtre + brique (10 cm) + lame d'air de 5cm + béton (15cm) +2cm de mortier de ciment. ; épaisseur $e = 35\text{cm}$, $u\text{-value} = 0.726 \text{ w/m}^2\text{.K}$.
- un toit en béton (15 cm) +gravier $e = 17\text{cm}$, $u\text{-value} = 0.707$.
- Plancher : dalle corps creux 16+4 cm.
- Dalle flottante 10 cm.

IV- 4- 2- Les mesures

La campagne de mesures par l'intermédiaire des instruments a l'avantage de nous fournir des données en adéquation avec la réalité physique du site d'investigation. Plus on multiplie les stations, plus les résultats sont concluants.

Cette campagne de mesure qui a touché plusieurs facteurs dans différents points spatiaux et à différents moments de la journée, s'est confrontée au nombre limité des appareils de mesure d'où la synchronisation difficile entre les différentes stations.

De ce fait, le choix s'est limité à quatre stations de mesures situées à Ali Mendjeli.

Les paramètres mesurés servent principalement à apprécier la validité des résultats trouvés par la simulation.

La campagne de mesure s'est faite durant le mois de juillet 2014, le mois le plus chaud de l'année. Elle s'est étalée du lever du jour jusqu'à minuit.

Sur la totalité des jours où l'on a effectué des mesures, on a retenu pour ce travail la journée caniculaire du (19 /07/2014) à ciel clair où la nébulosité était de 0 octas pour toutes la période de mesures.

La campagne s'est faite avec des appareils de mesures mobiles, à différents moments de la journée.

Ces mesures sont bi-horaires et concernent :

➤ Les températures et les vitesses de l'air mesurées à 2 niveaux:

- 1.5 m pour être comparées avec les mesures enregistrées par la station météorologique afin de mettre en évidence les dissemblances entre l'espace urbain et le rural sur le plan thermique et aéraulique.
- 1.1m nécessaire pour le calcul des indices de confort PET et mPEt en utilisant le programme RayMan pro 3.1.
- l'humidité de l'air pour achever la caractérisation du confort et pour mesurer les effets du peu de végétation existante sur l'ambiance des espaces urbains.
- Les températures des surfaces au sol à l'ombre et au soleil ont été aussi mesurées pour mettre en évidence les champs radiatifs thermiques dans chaque station.
- Les températures de l'air, humidités relative et vitesses de l'air à 1.5 m du sol et au centre des pièces à l'intérieur des logements retenus pour l'investigation dans notre échantillon.
- Des mesures simultanées à l'intérieur des habitations environnantes nous informent sur l'ambiance thermique interne.

IV- 4- 2-1 - Les stations d'études

Il faut rappeler que l'évaluation d'une place urbaine est déterminée par :

- Son ensoleillement déterminé par son rapport d'aspect H/W orientation et/ou son facteur d'ouverture au ciel (SVF).
- Son comportement aéralique par la combinaison des vents locaux et les vents dominants.
- Sa température moyenne radiante.

De ce fait, le choix des quatre stations de mesures s'est effectué comme suit (cf. **Fig. IV.20 - 23**):

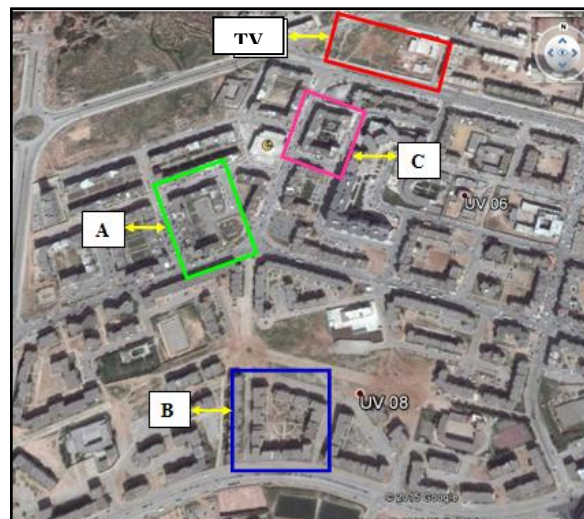


Fig. IV.20: Vue aérienne des quatre stations de mesures à Ali Mendjeli (Google Earth, 2014)

- ✚ Station **A** de forme rectangulaire et dont l'orientation dévie du nord de -29° avec un facteur d'ouverture au ciel (SVF) de 0.512.
- ✚ Station **B** : de forme irrégulière qui tend vers le carré et d'une orientation qui dévie du nord de -11° avec un facteur d'ouverture au ciel (SVF) de 0.514.
- ✚ Station **C** de forme rectangulaire et dont l'orientation dévie du nord de 8° avec un facteur d'ouverture au ciel (SVF) 0.516 avec végétation et 0.552 sans végétation.



Fig. IV.21 : Photos aériennes des stations : **A** à gauche, **B** au centre et **C** à droite.
(*Google Earth, 2014*)

✚ Une station dénommée, dans cette étude, terrain vague (**TV**) de **SVF** égal à 1 situé non loin des stations des mesures afin de souligner, en premier plan, les différences thermiques entre ce secteur urbain et la station météo de référence (**r**) en dehors de l'effet direct de la géométrie urbaine.

Ceci nous permettra de mettre, par la suite, en exergue l'effet de la géométrie urbaine sur les paramètres microclimatiques et nous évitera toute aberration quant aux conclusions tirées par rapport à son influence.



Fig.IV.22: Photo aérienne de la station **TV**. (*Google Earth, 2014*)

Pour chaque station, les mesures sont effectuées en différents points :

- Central dans le but d'effectuer une comparaison avec les autres stations.
- Diagonaux pour déterminer les différences thermiques entre les zones à l'ombre et au soleil.

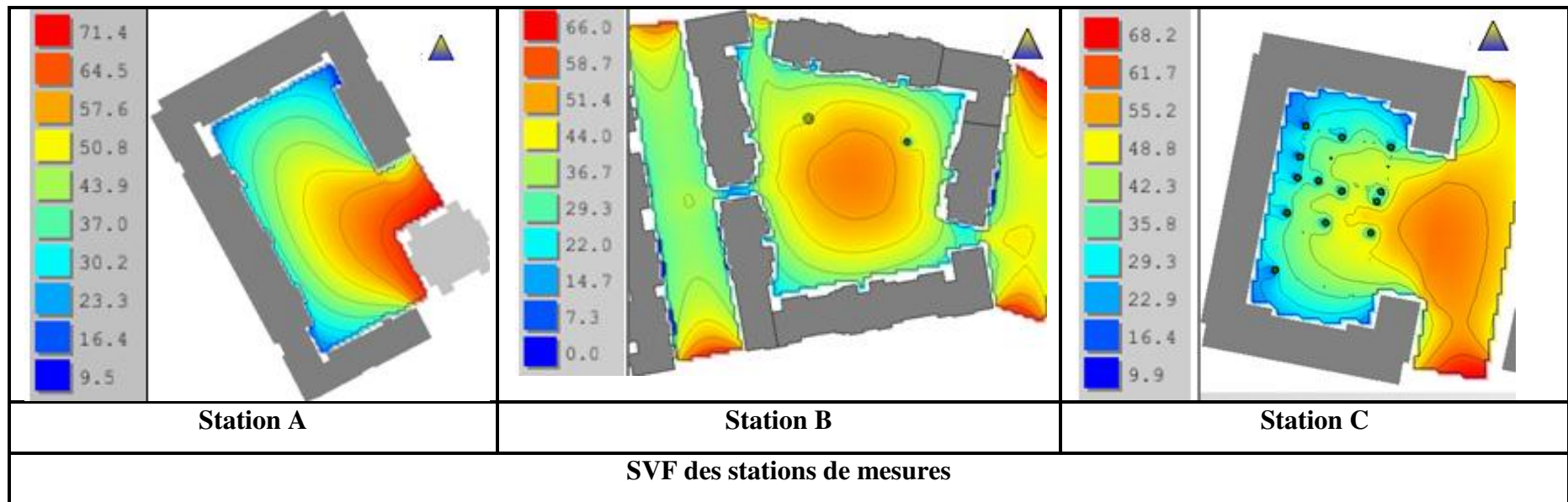


Fig.IV.23 : Répartition des valeurs des svf dans les trois stations de mesures (Auteur).

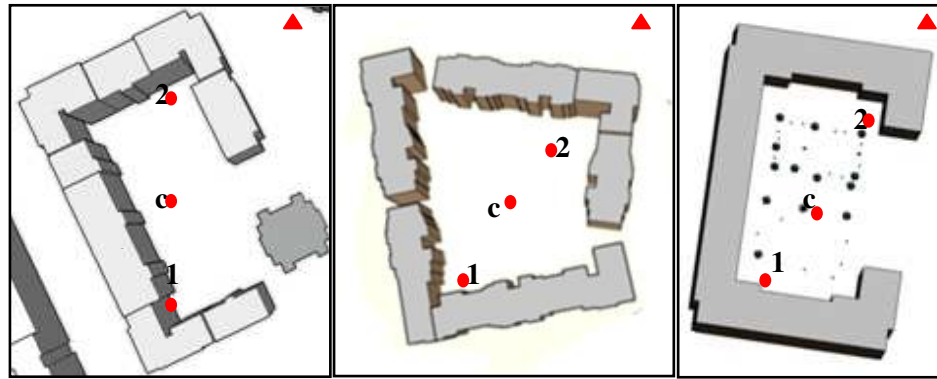


Fig. IV.24 : Répartition des points de mesures dans chaque station (Auteur).

Le Tab. IV.2 est un récapitulatif des caractéristiques significatives pour l'étude des stations de mesures.

Tab.IV-2 : Caractéristiques des stations de mesure (Auteur).

Station	Altitude (m)	H/W	H/L	SVF	Couleur Parois	Albédo moyen des Parois	Sol	Albédo moyen du sol	Albédo point de mesure
A	794	0.55	0.26	504	Blanche	0.56	Terre + Asphalte	0.22	0.20
B	800	0.33	0.32	0.514	beige	0.50	Terre +beton +ciment	0.29	0.3
C	786	ouverte	0.29	0.516	Beige	0.50	Terre +beton ciment	0.25	0.40
TR	777			1			Terre	0.25	
Lever du soleil le 19-21/07/2014 : 5h 30'									
Coucher : 19h 49'									

IV- 4-2-2- Justification du choix du site de mesures

Le choix des stations d'étude à Ali Mendjeli est guidé par plusieurs critères :

- ✚ L'absence de l'influence du relief sur les différentes stations (cf .Fig. IV. 25,26).
- ✚ Les stations d'étude présentent une différence d'altitude de 23 m (777 – 800 m). Sachant qu'en gagnant de l'altitude, la température de l'air baisse en moyenne de 1.6°C à chaque palier de 300 m. Cette différence est considérée donc insignifiante.
- ✚ Couleurs claires des façades.
- ✚ Absence de source de chaleur artificielle à l'échelle des stations et même de la ville, émanant d'industrie ou de trafic automobile intense. Cependant les rejets dus à la climatisation prennent de l'ampleur d'une année à une autre.

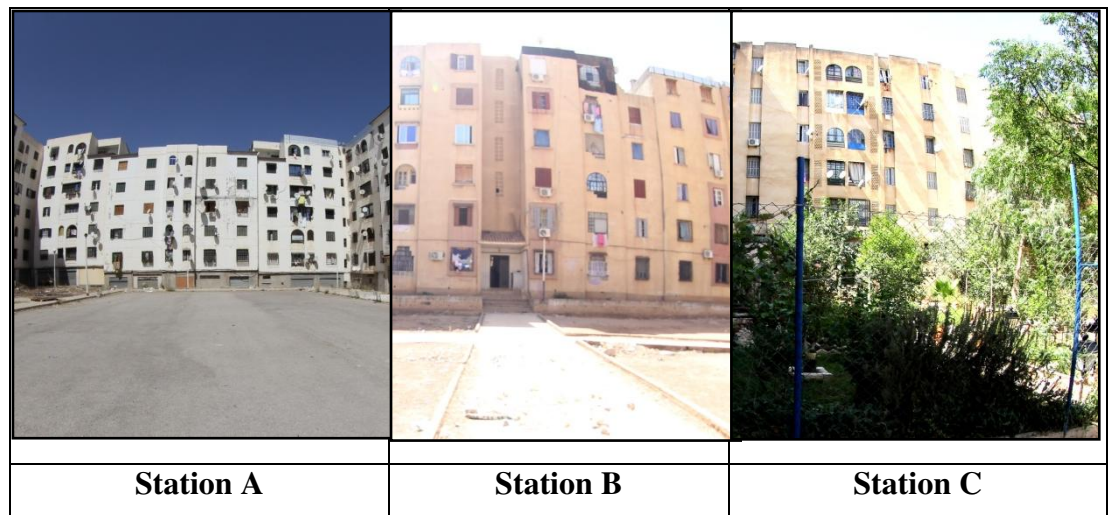


Fig. IV.25: Couleurs claires des façades (Auteur).

- ✚ Les trois stations sont de mêmes degrés d'ouverture au ciel, donc reçoivent la même quantité de rayonnement solaire car (seul un changement de 0.1 dans la valeur du svf est capable de ramener un changement significatif dans le rayonnement solaire) Et elles sont choisies pour leur représentativité (**voir chap.V**).
- ✚ Les trois points de mesures sont sujets aux mêmes degrés des Multi -réflexions entre parois horizontales et verticales. Résultats obtenus des calculs de facteur de forme en utilisant des abaques appropriés (cf.annexe C)..
- ✚ Selon la littérature les trois stations sont protégées du vent (cf.annexe C).
Donc comme première étape dans cette étude, nous avons éliminé l'effet de l'orientation aux vents pour répondre à un volet de notre première hypothèse :
Les différences entre les trois stations résident dans :

✚ L'Orientation : chacune des trois stations bénéficie d'une orientation jugée préférentielle : NNO-SSE pour la station A : Nord-Sud pour la station B et NNE-SSO pour la station C.

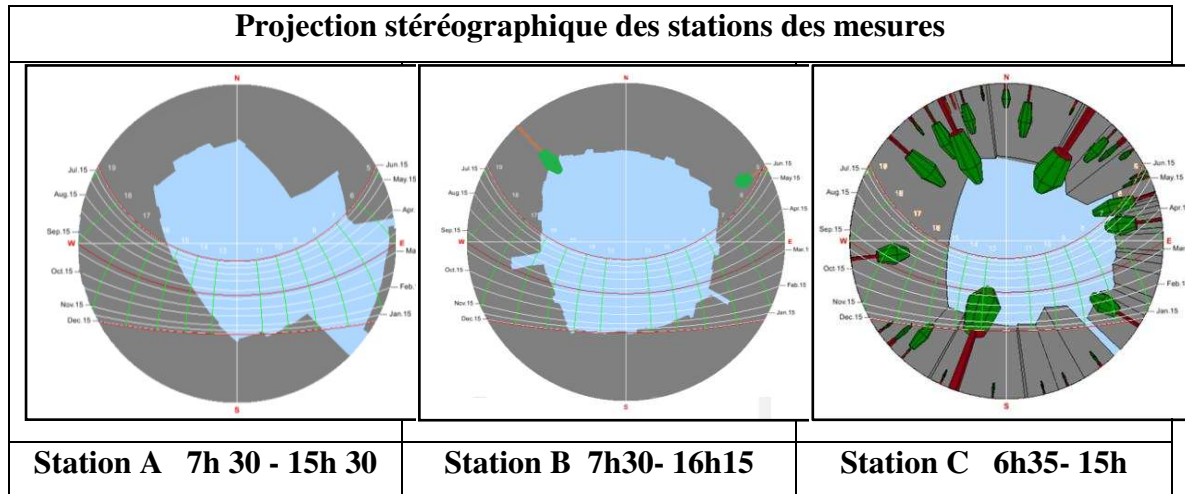


Fig.IV.26 : Courses solaires des trois stations de mesures (*Auteur*).

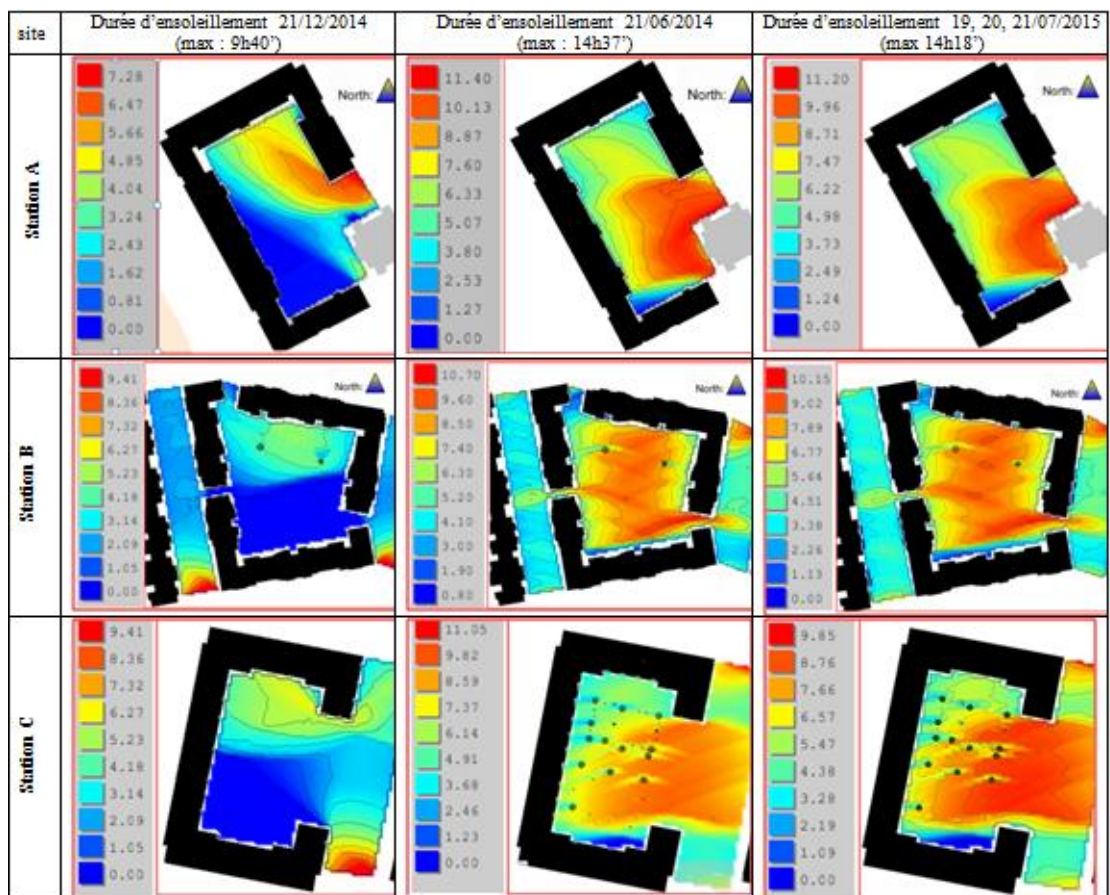


Fig.IV.27 : Durée d'enseiement des stations de mesures pour les dates significatives de l'étude (*Auteur*).

- ✚ Couverture au sol pour les points de mesure.

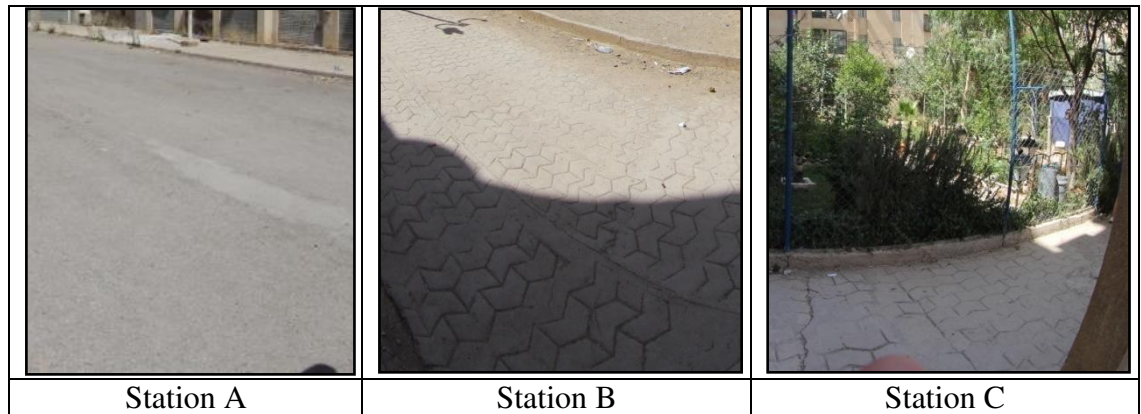


Fig.IV.28 : Nature de la couverture au sol des points de mesures (*Auteur*).

- ✚ Présence ou absence de végétation (cf. Fig.IV.29) :

- ✓ Absence total de végétation dans la station A.
- ✓ Absence de couvert végétal dense dans la station B sauf quelques jeunes arbres qui poussent ici et là, normalement sans influence significative.
- ✓ Présence de jeunes arbres au niveau de la station C.

D'après la littérature, la maturité est indispensable pour une évapotranspiration efficace du fait que les arbres âgés aient des températures de feuillage légèrement inférieures à celle de l'air (Heisler, 1977), ceci induit à un échange de chaleur entre l'air et les feuilles, tandis que les jeunes arbres ont des températures de feuillage quelques degrés de plus que celle de l'air (Scudo, 2004).

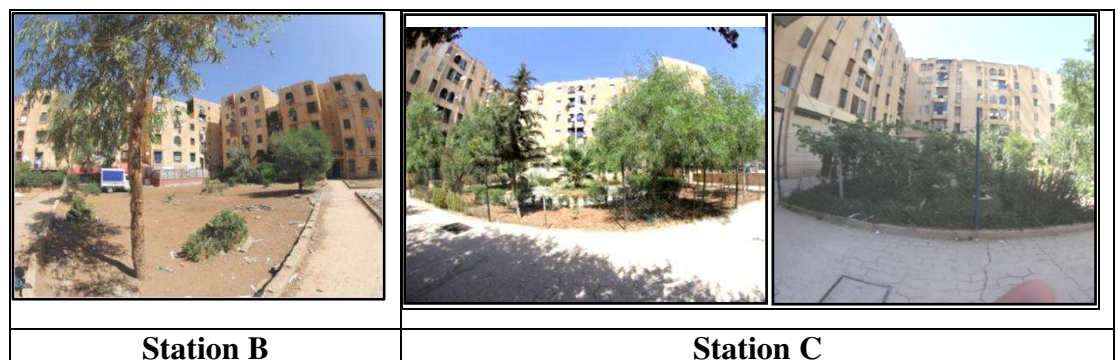


Fig.IV.29 : La végétation existante dans les stations de mesure (*Auteur*).

- ✚ Source de réchauffement anthropique :

Les climatiseurs des logements qui entourent la station **B** rejettent leurs flux en sa direction, Contrairement à ceux des deux autres stations installés sur les façades opposées à l'espace.



Fig.IV.30 : Climatiseurs présents dans la station **B** (Auteur).

✚ Les instruments de mesures

Les instruments utilisés pour mesurer les différents facteurs climatiques sont :

➤ **Un thermo-hygromètre-anémomètre-luxmètre:** modèle LUTRON LM-8000

Un appareil digital qui permet à la fois de mesurer la température de l'air et de surface, l'humidité relative et les vitesses des vents.

Son degré de précision est de :

- $\pm 4\%$ pour des vitesses de vents inférieures à 20 m/s.
- $\pm 3\%$ pour des humidités relatives inférieures à 70 %.
- $\pm 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour des températures inférieures à 50°C.

L'appareil est utilisé pour mesurer les variables microclimatiques.

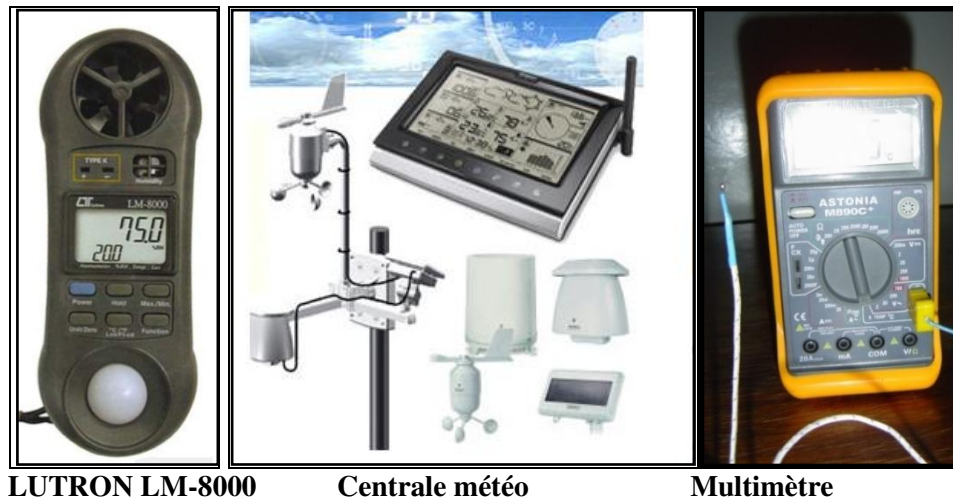
➤ **Une centrale météo professionnelle :** modèle **WMR200**

Pour mesurer la température de l'air, l'humidité relative et les vitesses des vents avec une précision de :

- $\pm 3\%$ pour des vitesses de vents inférieures à 10 m/s.
- $\pm 7\%$ pour les humidités relatives inférieures à 70 %.
- $\pm 1^{\circ}\text{C}$ pour des températures inférieures à 40°C.

L'appareil est utilisé pour mesurer l'ambiance thermique à l'intérieur du logement.

➤ **Un multimètre digital :** Pour mesurer les températures surfaciques à l'aide d'une sonde. Le degré de précision est de $\pm 2^{\circ}\text{C}$.



LUTRON LM-8000

Centrale météo

Multimètre

Fig.IV. 31 : Appareils de mesures des variables climatiques (*Auteur*).

Conclusion

La région de Constantine, de par sa situation, est soumise à un climat à deux saisons distinctes : froide en hiver et chaude en été avec des écarts de température diurne assez importants ; des vents faibles, une moyenne pluviosité qui augmente en hiver et une humidité très forte en saison froide mais faible en été.

L'analyse bioclimatique de la région révèle une dualité des besoins en ombre en été et d'ensoleillement en hiver aussi bien pour les espaces extérieurs qu'intérieurs.

La demande en chauffage dépassent de loin les besoins en climatisation pour assurer le confort des occupants d'où l'intérêt d'un chauffage passif gratuit en exploitant le potentiel d'ensoleillement tout en pensant à s'en protéger l'été par des dispositifs d'ombrage.

L'inertie thermique du bâtiment joue en faveur d'une bonne économie d'énergie pour les deux saisons d'où le choix judicieux des matériaux de l'enveloppe est déterminant. Ceci en conjugaison avec une grande compacité d'où l'intérêt des immeubles collectifs par rapport à l'individuel ; un vitrage adéquat, une ventilation nocturne et refroidissement par évaporation, ainsi que l'intégration des prolongements des espaces intérieurs tels que loggia, terrasse,etc, d'où l'indispensable régulation thermique des abords des bâtiments.

Une bonne configuration urbaine de par sa géométrie et son orientation permet de satisfaire les besoins énergétiques des espaces extérieurs et des bâtiments, et de maîtriser éventuellement une bonne ventilation d'hiver et d'été.

Donc l'idée fondamentale de cette recherche est de trouver un compromis entre trois grands domaines : ambiance thermique extérieur, ambiance thermique intérieur et économie d'énergie.

L'étude des phénomènes d'ambiance a nécessité le recours à des méthodes permettant la collecte des données mesurables relatives aux facteurs physiques des ambiances thermiques. De ce fait, une technique de mesure hybride combinant les outils de simulation numérique et les instruments de mesure habituels pourrait nous aider à atteindre cet objectif. Les résultats de ces deux méthodes sont le sujet des chapitres suivants.

Chapitre V:

Modélisation : résultats et interprétations

"Le soleil permet un dialogue intense entre intérieur et extérieur grâce auquel cette relation peut être autrement. C'est pourquoi il faut attacher autant d'importance à l'utilisation et à l'ensoleillement des lieux extérieurs qu'à celui des espaces fermés."

Gonzalo et Habermann (2008)

Introduction

L'environnement urbain ne se résume pas seulement à un ensemble de formes bâties imposantes, c'est aussi un amalgame de phénomènes physiques : soleil, lumière, vent, son, ... etc., qui interagissent avec la forme construite et les usagers des espaces architecturaux et urbains. Cette interaction fait émerger un phénomène complexe et une expérience partagée par tous appelée ambiance architecturale et/ou urbaine. De par son affectation des tâches d'ombre et de soleil sur les surfaces horizontales et verticales et son action positive ou négative sur le vent, la géométrie urbaine est un facteur parmi d'autres qui participe à déterminer l'ambiance thermique dans ces espaces. Plusieurs recherches à travers le monde l'ont prouvé par expériences sur terrain et par simulations.

La manière la plus simple et la plus efficace d'assurer le confort d'été est de limiter les effets de la principale source de surchauffe en abritant ces espaces du soleil ou tout en moins en réduisant les surfaces horizontales et verticales exposées au soleil d'été. Si l'ambiance thermique hivernale est omise, cette réduction aura des impacts négatifs sur la fréquentation de ces espaces ainsi que la charge énergétique des bâtiments aux limites.

V-1- Résultats généraux des simulations de l'ensoleillement des places

Cette première phase de simulation est dédiée à confirmer ou infirmer notre première hypothèse :

🌈 Hiver comme été, la combinaison confort extérieur et économie d'énergie est possible par le seul choix judicieux de la géométrie des espaces publics ouverts aux abords des bâtiments.

Le logiciel **Townscope 3.2** est utilisé.

Pour ce fait, on a procédé à une analyse de l'ensoleillement pour le point central, le plus exposé, de chaque configuration (cf. **Tab. V.1**). Plus de 650 modèles ont été simulés.

En procédant à l'analyse des outputs des simulations, on a eu pour résultats :

1. L'ensoleillement du carré, cercle et polygone équivalents en surface et en hauteur ont la même durée d'ensoleillement (cf. **Tab. V.2**).

Donc les résultats des trois formes seront évoqués avec le même vocable "carré".

2. Une redondance dans la durée d'ensoleillement a été observée avec plusieurs parallélépipèdes pour la même hauteur et le même rapport H/W selon la relation suivante :

$$XW. (X+Y) W$$

Où XW est la largeur et $(X+Y) W$ est la longueur L

D'où pour ces cas :

$$X \in \{1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, \dots\} \quad \text{Et } Y \in \{0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, 3, \dots\}$$

Soient : $W.W$, $W.3/2W$, $W. 2W$, $W. 5/2 W$, $W. 3 W$, $W.7/2W \dots \dots \dots$ etc

Ceci dit que pour une même hauteur, la durée d'ensoleillement est indépendante de l'élongation de la place.

Le changement dans la durée d'ensoleillement ne s'opère que lorsqu'il y a un changement dans la valeur de W selon que se dernier soit fixé en orientation **Nord- sud** ou **Est-Ouest** (cf. **Tab.V. 3- 5**).

➤ Donc le rapport H/W avec l'**orientation** commande la durée d'ensoleillement d'une place.

De ce fait pour un **même** rapport H/W , on peut tirer les conclusions suivantes :

V-1-1- Orientation Nord-Sud

Pour cette orientation (cf. **Tab. V.1, 3 - 5**):

✚ L'espace permet de se faire pénétrer plus profondément par le soleil d'hiver en comparaison aux autres orientations.

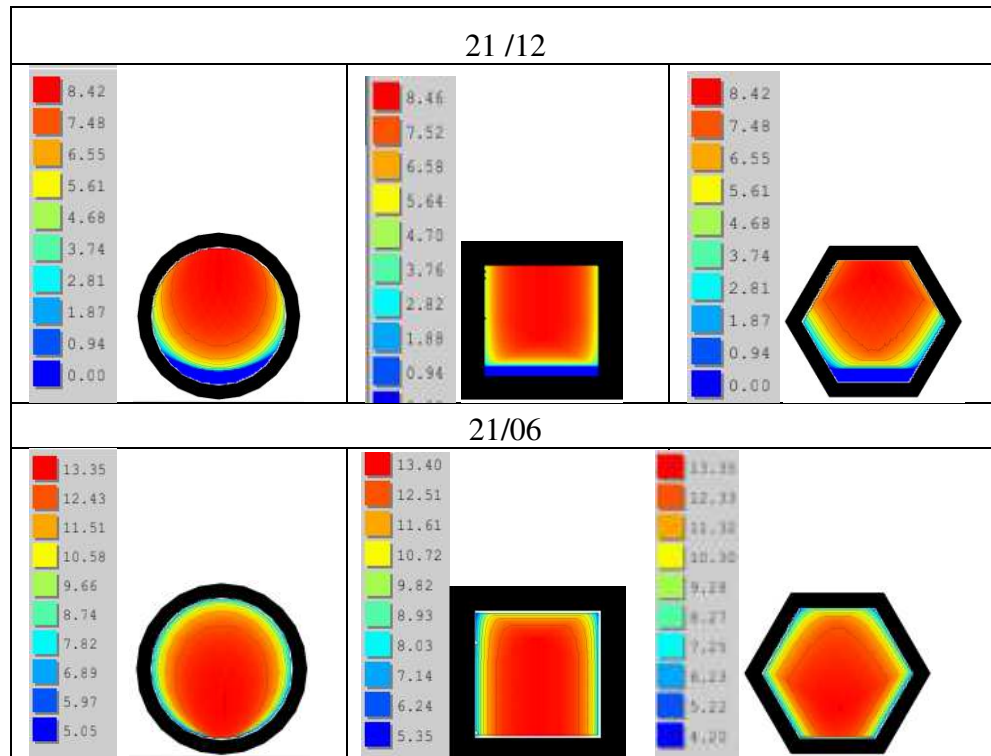
✚ La durée d'ensoleillement est la même pour tous les espaces.

✚ L'allongement de l'axe longitudinal n'a aucun effet sur la durée d'ensoleillement, par contre il possède une grande signification sur la surface ensoleillée : plus $L > W$, plus la surface ensoleillée est grande (cf. **Tab. V. 3 – 5**).

Tab.V.1: Courses solaires des différentes géométries (Auteur).

Géométrie	N-S	E-O	NE-SO	NO-SE
W*W* 3H				
W*3/2W*3H				
W*2W*3H				
W*5/2W*3H				

Tab. V.2 : Durée d'ensoleillement pour un cercle, carré et hexagone de même surface et hauteur ($H/W = H/2R = H/2 \cdot \text{apothème} = 0.1$), (Auteur).



De ce fait, on peut conclure que le rectangle permet une surface ensoleillée plus conséquente par rapport au carré. Ce carré qui possède comme pour le cercle un comportement tout à fait contradictoire :

Un bas niveau d'accès solaire en hiver et une basse protection solaire en été comme prouvé par Mohcen (1979) et Ntefeh et al. (2003), (cf. **Tab. V. 6**)

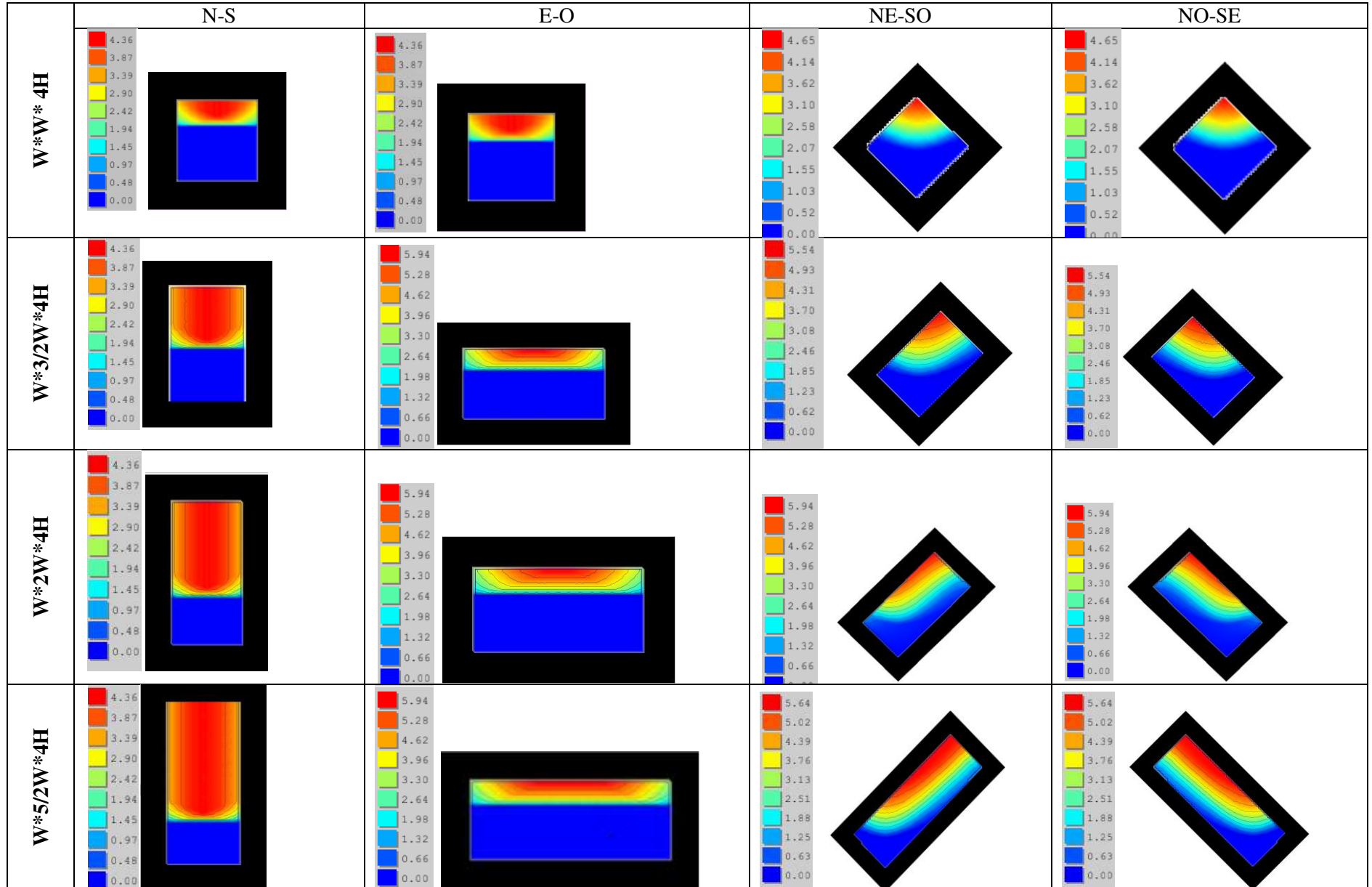
✚ Le changement dans la durée ne s'opère que lorsqu'il y a un changement dans la largeur ou la hauteur qui affecte le rapport d'aspect H/W (cf. **Tab. V. 7**).

✚ Le **Tableau. V. 7** indique aussi que le rapport H/L commande le pourcentage de surface ensoleillée. Plus il est bas plus grande est la surface ensoleillée.

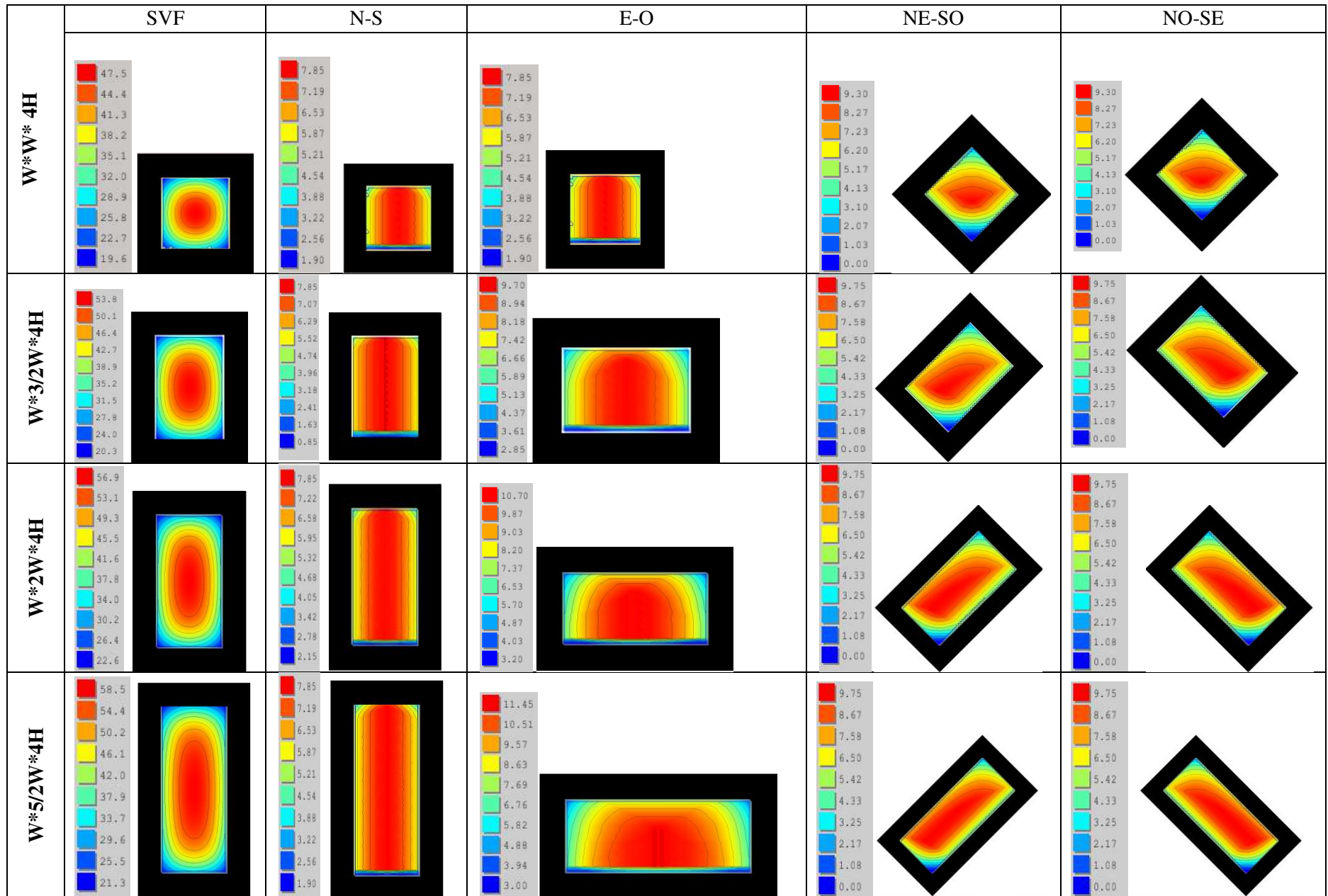
Pour un même rapport H/L ce pourcentage est le même indépendamment de la largeur de l'espace.

- En été, cette orientation a la durée d'ensoleillement la plus courte (cf. **Tab. V.3**).
- Les places d'orientation **Nord -Sud** sont donc recommandées pour le climat chaud et lui sont favorables comme trouvé par nombre de chercheurs (Santamouris,2001 ; yeziero et al.,2006 ; Givoni,1998 ; Mohcen,1979 ; Martinelli et Mazarakis, 2017 ; Reiter,2007, Talghani et al.,2014 ; Muhaisen, 2006 ; Bourbia et Awbi, 2004b ; Yeziero

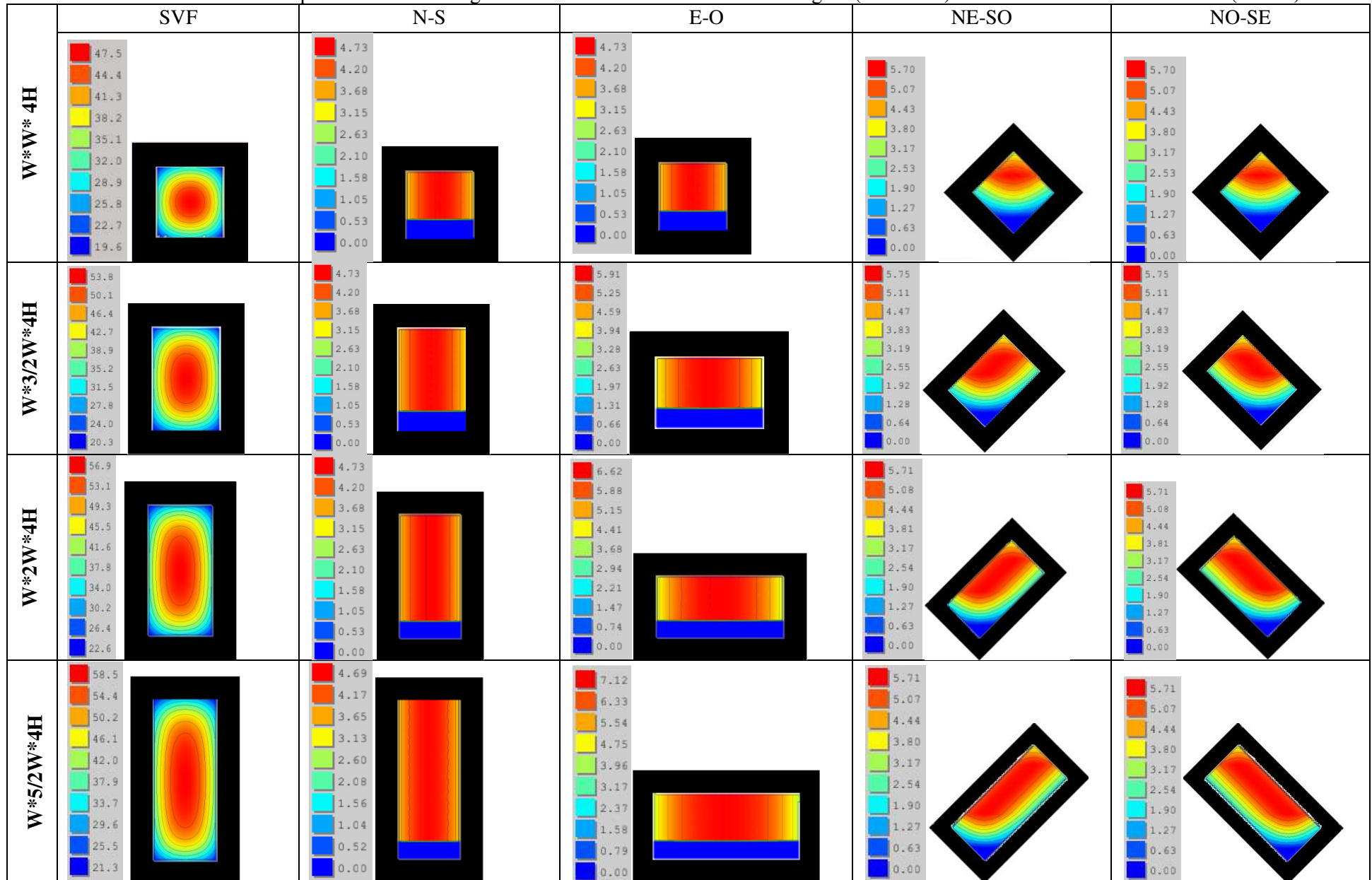
Tab.V.3 : Durée d'ensoleillement le 21 décembre pour des géométries de même hauteur et même largeur (H/W= 0.4) selon les différentes orientations (Auteur).

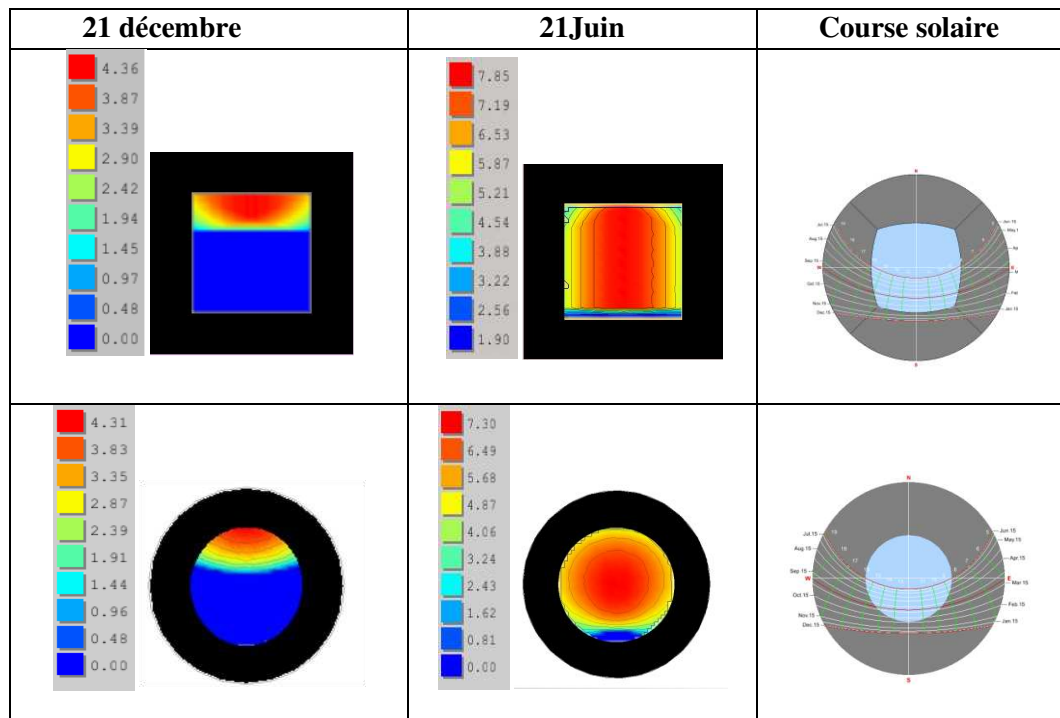


Tab.V.4 : Durée d'ensoleillement le 21 juin, pour des géométries de même hauteur et même largeur (H/W= 0.4) selon les différentes orientations (Auteur).



Tab. V.5 : Durée d'ensoleillement pour le 21 Mars des géométries de même hauteur et même largeur (H/W= 0.4) selon les différentes orientations (Auteur).



Tab. V.6 : Accessibilité solaire en hiver et en été pour le carré et le cercle (*Auteur*).

et al., 2005 ; Swaid et Hoffman,1990 ; Erell et al2013 ;Shahab Kariminia et al.,2015 ; Kalman,2013).

Cependant l'orientation des plus longues façades vers l'Est et l'Ouest n'est guère une orientation préférentielle pour le confort thermique intérieur ou extérieur d'été (**cf. Chap.III**), Elles sont sujettes à la surchauffe (Bougiatioti, 2006).

Toutefois, avec les avancées technologiques dans l'amélioration des propriétés thermiques du verre et les protections solaires notamment amovibles on pourrait surmonter cette contradiction (**cf. Chap. II**).

Toutefois, avec les avancées technologiques dans l'amélioration des propriétés thermiques du verre et les protections solaires notamment amovibles on pourrait surmonter cette contradiction (**cf. Chap. II**).

On pourrait proposer une autre solution pour palier à la problématique de surchauffe en affectant les fonctions que doivent abriter les bâtiments qui entourent la place. La place est en général entourée d'édifices publics, mais l'habitat n'est pas à exclure (Allain, 2004). L'habitat exposera ses façades vers le Nord et le Sud de la place pour des meilleurs gains en hiver et une protection aisée en été.

Les édifices publics, qui ferment leurs portes vers 16h 30', heure d'extrême surchauffe peuvent orienter leurs façades vers l'Est et l'Ouest (l'orientation la plus défavorable en été). Avec les protections des fenêtres et une bonne conception de l'enveloppe -inertie thermique des matériaux+ isolant- et un temps de déphasage adéquat, la chaleur

restituée pourra être dissipée par ventilation naturelle après le départ des occupants sans avoir recours à la climatisation en été (Aggrawal, 2006).

En hiver, les gains internes dus à la présence des personnes et l'utilisation de différents appareils dégageant de la chaleur peuvent engendrer des économies en chauffages et palier aux faibles gains solaires de ces deux orientations.

Tab. V.7 : Effet du changement de la hauteur et la largeur sur la durée d'enseulement pour une orientation Nord-sud (Auteur).

	SVF	H/W	H/L	21 décembre	21 Juin	Course solaire
W*2W* 6H	0.405	0.6	6H /2W			
3/2 W*3W* 9H	0.394	0.6	9H /3W			
3/2 W*2W * 6H	0.503	0.4	6H /2W			
3/2 W *3W * 5H	0.618	0.3	5H /3W			

V-1-2- Orientation Nord est– Sud ouest

A l'exception du carré, tous les espaces bénéficient de la même durée d'ensoleillement. Cet ensoleillement est principalement l'après midi (**cf.Tab.V.1**).

Donc désirable dans les espaces de récréation des pays froids pour profiter des rayons solaires aussi bien en hiver qu'en été.

IV-1-3- Orientations Nord ouest –Sud est

Même résultat que l'orientation précédente, sauf que l'ensoleillement est plutôt le matin que l'après midi (**cf.Tab. V.1**).

Cette orientation est donc souhaitable quand les nuits sont froides et l'ensoleillement matinal est désirable. Ces places nous semblent adéquates pour être entourées d'édifices qui ferment leurs portes l'après midi et durant l'été comme les établissements scolaires pour éviter la surchauffe et le recours à la climatisation.

Elle est souhaitable aussi pour les espaces de récréation dans les pays chauds, comme l'Algérie, où l'ombre se déploie l'après midi. Ceci implique un long usage par les riverains en saison estivale.

V-1- 4- Orientations Est - ouest

Cette Orientation a la durée d'ensoleillement la plus longue aussi bien en hiver qu'en été mais la surface ensoleillée au sol est visiblement moins profonde que l'orientation **Nord- sud**. L'augmentation de la durée d'ensoleillement ne s'opère qu'en augmentant la largeur des places.

Cette orientation, n'est nullement souhaitable pour les places urbaines. Elle est plus commode pour les parcelles et les cœurs d'îlot d'habitation où l'orientation sud des façades des logements est propice pour un ensoleillement efficace aussi bien en hiver qu'en été.

V-2- Résultats selon les conditions requises pour l'ensoleillement des places

En appliquant, les deux conditions d'hiver et d'été :

- Au minimum, les 50% de la surface au sol de la place soient ensoleillées le 21 décembre ;
- La durée d'ensoleillement de l'espace ne doit en aucun cas dépasser la moitié de la durée totale maximale au 21 Juin, pour un compromis de confort thermique hivernal et estival ; soit environ 7h14' pour notre cas.

L'intervalle des géométries trouvé, selon l'orientation et la forme géométrique est :

V-2-1- Orientation Nord-Sud

- Pour un facteur de forme $L = W$, soit la forme carrée, la condition d'été n'est satisfaite que pour des géométries dont le rapport d'aspect $H/W > 0.4$ correspondant à un $SVF \leq 0.43$.

Pour ces valeurs, la disponibilité en ensoleillement sur le sol atteint seulement les 15 à 25 % de la surface au solstice d'hiver (cf. Tab. V.8) et dépasse les 8h d'ensoleillement en été.

Tab. V.8 : Proportions, SVF, et durée d'ensoleillement journalière dans les places de forme carrée de rapport d'aspect H/W : 0.3, 0.4 et 0.5 (Auteur).

SVF	H/W	21/12	21/06
	0.4		
	0.3		
	0.5		

Ceci fait que les places carrées soient inappropriées pour nos latitudes où l'ensoleillement des places est indispensable en hiver (Johansson, 2006) et l'ombre est plus qu'une nécessité en été (cf. Chap. IV).

La forme carrée avec un rapport $H/W < 0.3$ est donc convenable pour les pays nordiques où le soleil est désirable aussi bien en été qu'en hiver.

- Pour un facteur de forme $1 < L/W \leq 1.5$, forme rectangulaire, la condition d'été n'est satisfaite que pour des géométries dont :

- le rapport d'aspect est compris dans l'intervalle $0.4 < H/W < 0.6$;

- un rapport H/L compris dans l'intervalle $0.3 < H/L \leq 0.45$.

Ceci correspond à un SVF compris dans l'intervalle $0.3 \leq SVF \leq 0.5$.

Comme pour le carré, la disponibilité en ensoleillement au sol en pourcentage est comprise dans l'intervalle $[20,50[$ au solstice d'hiver avec une durée maximale d'environ 4h et ne dépasse pas les 7h 15' en ensoleillement d'été (cf. Tab. V.9).

- Pour un facteur de forme $1.5 < L/W \leq 2$ l'intervalle des rapports d'aspect résultant est de (cf. Tab. V.8) :

$$0.4 < H/W \leq 0.6 \text{ avec } 0.13 \leq H/L \leq 0.3$$

Ceci correspond à un SVF compris dans l'intervalle $0.4 \leq SVF < 0.5$.

La disponibilité en ensoleillement au sol est $\geq 50 \%$ au solstice d'hiver avec une durée maximale d'environ 4h et minimale de 2h. Au solstice d'été la durée maximale est de 7h. (cf. Tab. V.10). Ceci :

- répond exactement à nos deux conditions précitées ;

- correspond parfaitement à l'intervalle $0.4 < H/W \leq 0.6$ déterminé par Oke (1988) et Arnfield (1990).

Ceci donne de la validité à nos deux conditions et aux résultats trouvés.

Mais il se trouve que le profil urbain H/W à lui seul en combinaison à l'orientation est insuffisant pour décrire la disponibilité en ensoleillement d'une place, même constat pour le SVF. D'autres indicateurs géométriques doivent être ajoutés. Il s'agit du facteur de forme L/W et le rapport H/L .

L'interaction des rayons solaires avec la forme d'une place est donc mieux décrite par l'association des indicateurs géométriques :

- Tridimensionnels dont le SVF ;

- Surfaciques dont le facteur de forme L/W ;
- Et les deux rapports H/L et H/W .

Tab. V.9: Proportions, SVF, et durée d'ensoleillement journalière dans les places de forme rectangulaire comprises dans l'intervalle $0.3 \leq SVF \leq 0.5$ (Auteur).

	SVF	H/L	L/W	H/W	21 /12	21/06
2W*3W*10H	0.422	0.33	1.5	0.5		
2W*5/2W*9H	0.537	0.36	1.25	0.45		
W*3/2W*6H	0.308	0.4	1.5	0.6*		
3/2W*3W*7H	0.492	0.23	2	0.6		
W*3/2W*5H	0.445	0.33	1.5	0.5		

* Sur ce tableau en remarque que pour le même rapport H/W, la durée d'ensoleillement est égale mais la surface ensoleillée diffère en raison de la différence en facteur de forme L/W.

Tab. V.10 : Proportions, SVF, et durée d'ensoleillement journalière dans les places de forme rectangulaire comprises dans l'intervalle $0.4 \leq SVF < 0.5$ avec $1.5 < L/W \leq 2$ (Auteur).

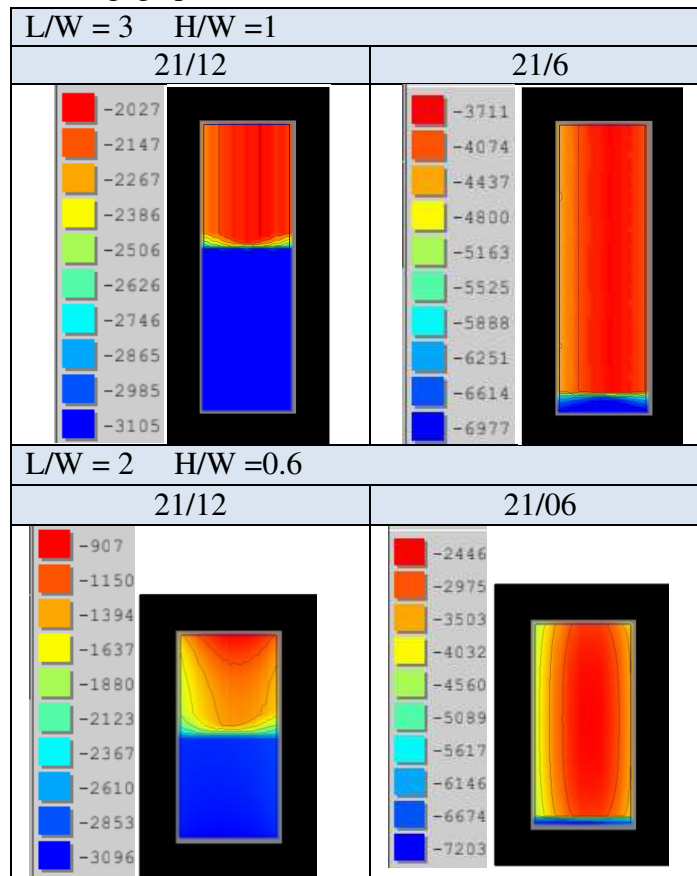
	SVF	H/L	L/W	H/W	21/12	21/06
w*2w*4h	0.569	0.2	2	0.4		
w*2w*5h	0.479	0.25	2	0.5		
3/2w*2w*9h	0.40	0.3	2	0.6		

- Pour un facteur de forme $L/W > 2$ l'intervalle des rapports d'aspect répondant à nos deux conditions est élargi pour des géométries longues et étroites avec un minimum d'accès solaire en hiver ($\leq 2h18'$) comme en été ($\leq 3h54'$) d'où :

Un rapport d'aspect compris dans l'intervalle $0.4 < H/W \leq 1$ qui correspond à un SVF compris dans la marge : $0.26 \leq SVF < 0.5$.

Une durée d'ensoleillement très intéressante pour éviter la surchauffe d'été, mais sans grand intérêt sur les apports énergétiques gratuits en hiver (cf.tab.V.11 et annexe D)

Tab.V.11 : L'énergie reçue sur le sol en Wh/m² par comparaison à un site dégagé pour H/W= 1 et H/W= 0.6 (Auteur).



En se référant, également, aux principes de la composition urbaine cités au **chapitre III, section III.2.3**, des dimensions trop inégales font que la place soit trop ouverte ou trop fermée (Maouïa, 2000). Elle risque ainsi de perdre son identité d'espace public surfacique pour être d'avantage assimilée à l'espace public linéaire de la rue (Fusco, 2017).

Donc pour éviter ceci :

- Selon les fondements esthétiques de la composition d'une place, le facteur de forme ne doit pas excéder la valeur de **2**, $L/W \leq 2$ (Sitte, 1980 ; Vitruve, 1684).
- Le rapport d'aspect doit être supérieur à 1 :3, $H/W \geq 0.33$ pour donner le sens du lieu (Iselin D.C, 1989).
- Les usagers des espaces ouverts apprécient spécialement les zones où le ciel occupe une plus grande partie du champ visuel que les bâtiments environnants. De telles zones, appelées « noyaux » sont très sensibles à la hauteur des bâtiments environnants. Dès que

le rapport H/W dépasse la valeur de 0.5, son noyau commence à disparaître (Compagnon et Goyette-pernot, 2004).

Ceci donne encore de la validité, du point de vue composition urbaine, à l'intervalle dégagé : $0.4 < H/W \leq 0.6$, avec $L/W \leq 2$.

Pour vérifier la validité de ces résultats, une première approximation du confort thermique par rapport à différentes proportions L/W compris dans l'intervalle [1.25, 3] pour un rapport d'aspect $H/W = 0.5$ et H/L compris dans l'intervalle [0.16, 0.4] est effectuée (cf. Fig. V.1).

Le logiciel Envi-met 3.1 permet une répartition des niveaux du confort thermique sur l'ensemble de la place en utilisant l'indice PMV*.

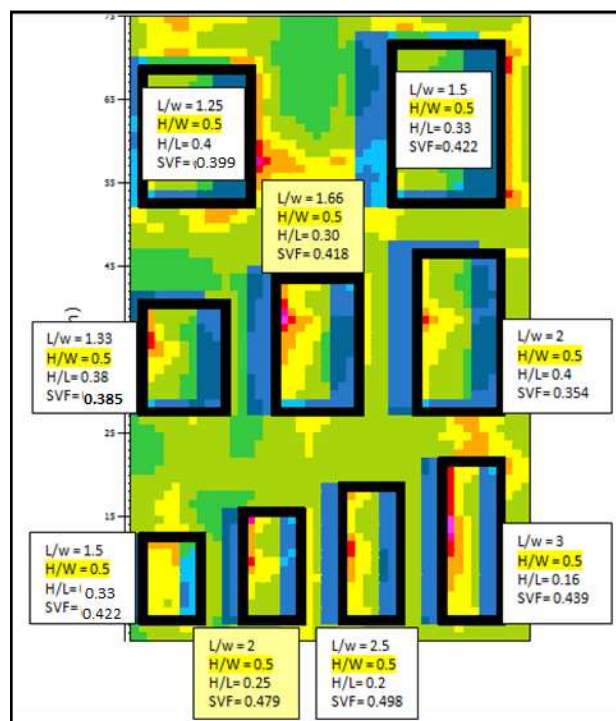


Fig. V.1 : Proportions des différentes places simulées en quête du meilleur facteur de forme d'une place (Auteur).

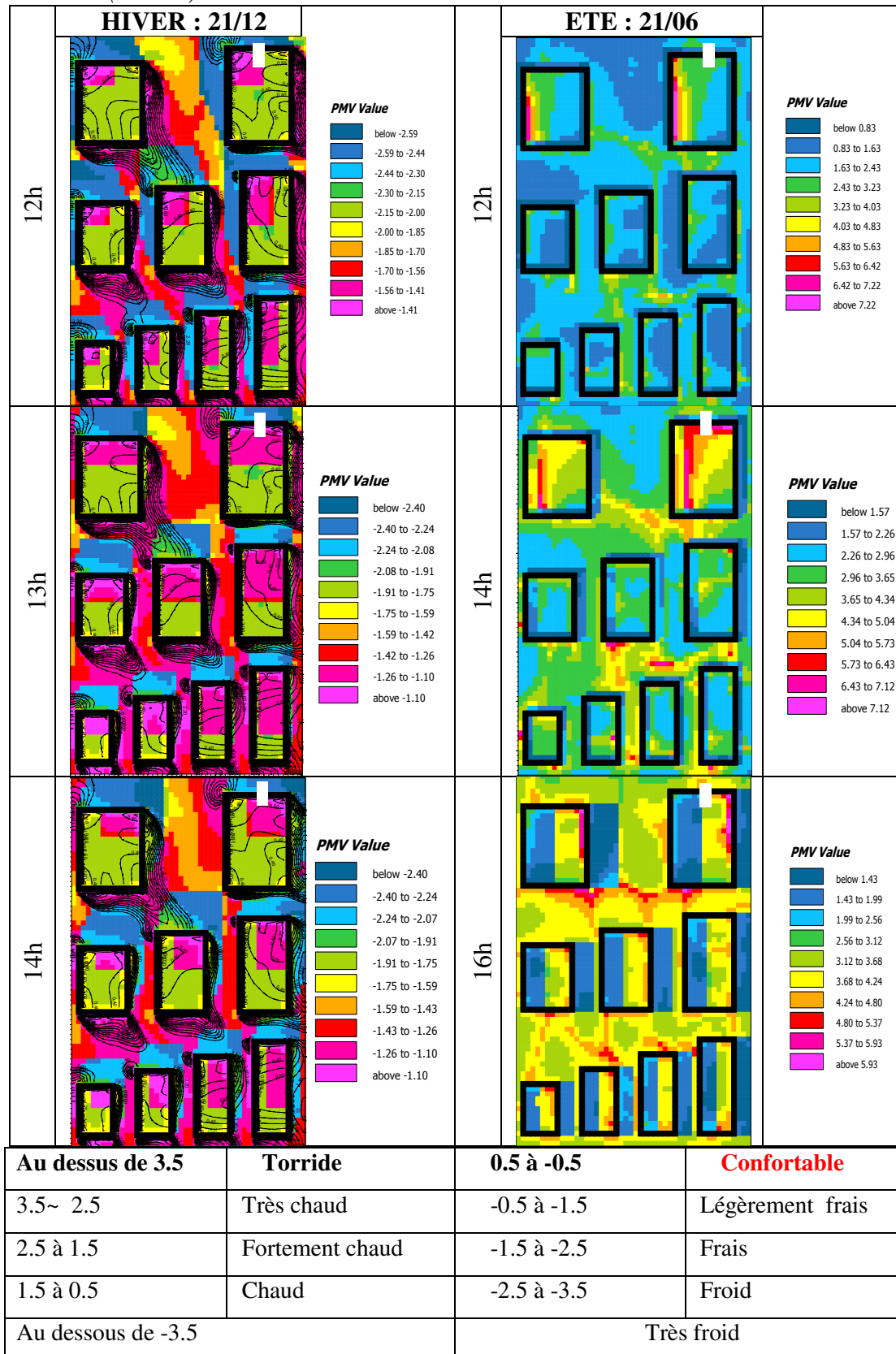
- Les résultats sur le **tableau V.12** indiquent un meilleur rapport surfacique de confort thermique (où des intervalles qui présentent un meilleur niveau de confort), hiver comme été dans les heures les plus significatives pour des formes de places dont :

$$1.5 < L/W \leq 3 \text{ et } 0.16 \leq H/L \leq 0.3 \text{ avec un } H/W = 0.5.$$

* Envi-met 3.1 utilise l'équation d'équilibre énergétique de Fanger destinée pour le confort thermique intérieur. Ceci rend les résultats contestables. C'est pourquoi, le PMV est utilisé uniquement pour approximation du confort thermique par rapport à différentes géométries des places publiques.

Ceci valide encore ne fois nos conditions pour un ensoleillement adéquat hiver comme été dans ces espaces urbains.

Tab.V.12 : Résultats des simulations du confort thermique selon différents facteurs de forme (Auteur).



V-2-2- Orientations NO -SE / NE –SO

Comme on a déjà vu, pour une même géométrie, les deux orientations diagonales ont la même durée et surface ensoleillée sauf que pour le NE-SO l’ensoleillement est principalement le matin et la NO-SE l’après midi.

Pour ces deux orientations, en hiver la surface ensoleillée se trouve très réduite par rapport à la même durée pour une orientation N-S. En été l’inverse se produit.

Une inclinaison plus vers le nord (< ± 45°) augmentera le temps d’ensoleillement en hiver et diminuera le temps d’ensoleillement en été (cf. **Tab. V.3, 5 et 13**).

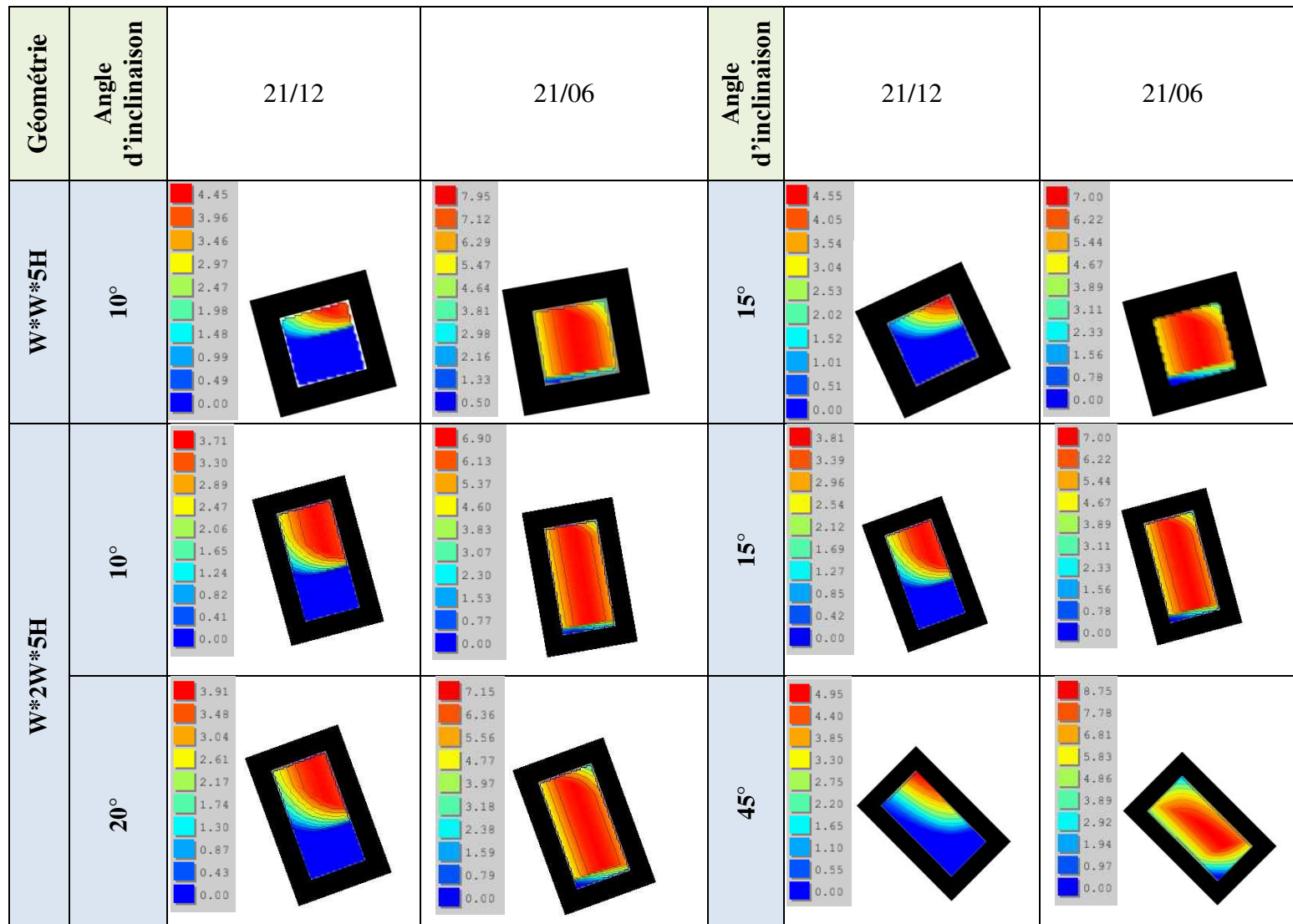
Tab.V. 13 : Durée et pourcentage de surface ensoleillée au sol pour les orientations diagonales ± 45° (Auteur).

W*2W*6H	SVF	H/W	21/12	21/06	Course solaire		
	0.405	0.6					

✚ Pour la forme carrée une inclinaison de l’axe d’orientation d’un angle de 10° à 15° permet de réduire le temps d’ensoleillement d’été par rapport à celui d’une inclinaison à 45° (8h 15') d’environ 1h. Sans toutefois réussir à faire pénétrer les rayons solaires plus profondément en saison hivernale (cf. **Tab.14**).

✚ Pour la forme rectangulaire, une inclinaison de l’axe d’orientation d’un angle $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ permet de réduire le temps d’ensoleillement d’été par rapport à celui d’une inclinaison à 45° (8h 45') d’environ 1h30' et permet également d’augmenter la surface ensoleillée en hiver (cf. **Tab.14**). Une inclinaison à 20° est rejetée puisque elle augmente le temps d’ensoleillement d’été par rapport à une orientation N-S.

Tab .V. 14 : Durée et pourcentage de surface ensoleillée au sol pour différentes inclinaisons de l'axe longitudinal (*Auteur*).



V-3 - Synthèse des simulations de l'ensoleillement

La détermination des distances entre bâtiments doit toujours se faire parallèlement à la conception et à l'utilisation envisagée pour les espaces extérieurs. Ces distances doivent être déterminées non seulement pour répondre au confort thermique extérieur et intérieur, champ de notre recherche, mais aussi à des paramètres normatifs concernant la composition urbaine, la vision et la psychologie humaine.

Les proportions jugées optimales des places ont été définies. Ceci lui conféra à la fois une durée d'ensoleillement raisonnable en hiver et intersaison, et un minimum en été.

Pour notre climat, on retiendra donc la forme rectangulaire avec les deux orientations **Nord/ Sud** et **Nord-ouest/ Sud-est** avec :

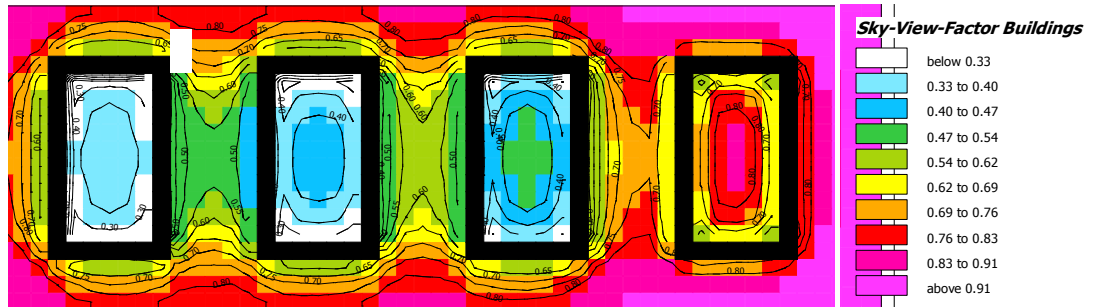
- un facteur de forme $L/W = 2$;
- un rapport d'aspect $0.4 < H/W \leq 0.6$ avec $0.13 \leq H/L \leq 0.3$;
- un SVF, donc, compris dans l'intervalle $0.4 \leq SVF < 0.5$.

V-4- Modélisation des paramètres climatiques dans les géométries retenues

Dans le cadre de cette recherche et afin de vérifier la validité de l'intervalle dégagé, $0.4 < H/W \leq 0.6$; quatre stations de mesures au facteur de forme $L/W=2$ sont modélisées afin d'étudier les conditions microclimatiques et le confort thermique des usagers de ces espaces ouverts pour les deux périodes hivernale et estivale (cf. **chapitre IV**):

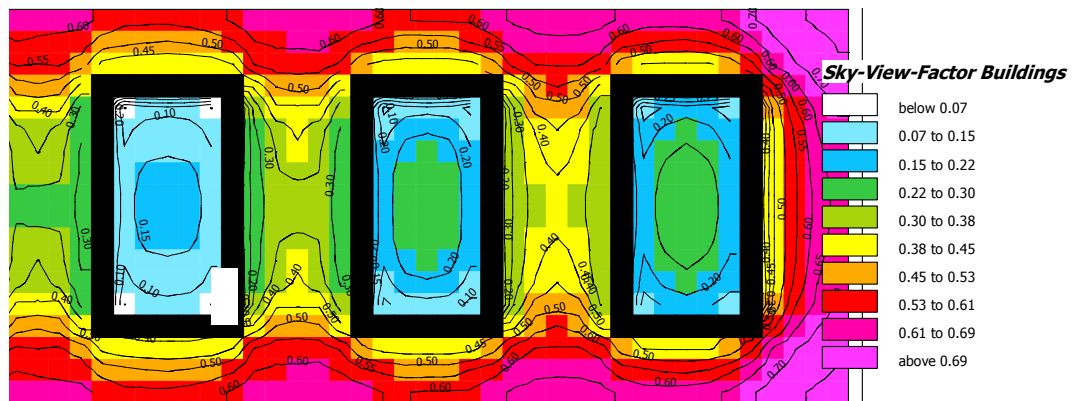
- La station **S1** représentant une grande ouverture au ciel est située hors l'intervalle retenue avec un $H/W = 0.1$, $SVF = 0.938$.
- La station **S2** avec un $H/W = 0.4$ représentant la limite inférieure de la marge et $SVF = 0.569$.
- La station **S3** avec un $H/W = 0.5$ représentant la moyenne de cette marge dont le $SVF = 0.479$.
- La station **S4** avec un $H/W = 0.6$ représentant la limite supérieure de cette marge, $SVF = 0.405$.

Pour un souci de surchauffe d'été, et pour éviter toute aberration quant à nos conclusions, nos simulations sont étendues jusqu'aux espaces dont la surface ensoleillée au solstice d'hiver ne dépassera pas le 1/3 de la surface totale.



S4	S3	S2	S1
H/W = 0.6	H/W = 0.5	H/W = 0.4	H/W = 0.1
H/L = 0.3	H/L = 0.25	H/L = 0.2	H/L = 0.05
SVF = 0.405	SVF = 0.479	SVF = 0.569	SVF = 0.938
L/ W = 2			

Fig. V.2 : Indicateurs géométriques des configurations simulées par Envimet 3.1, Intervalle $0.4 < SVF \leq 0.6$ (Auteur).



S7	S6	S5
H/W = 1.2	H/W = 1	H/W = 0.8
H/L = 0.6	H/L = 0.5	H/L = 0.4
SVF = 0.171	SVF = 0.223	SVF = 0.298

Fig. V.3 : Indicateurs géométriques des configurations simulées par Envimet 3.1 $SVF \leq 0.3$ (Auteur).

Températures de l’air, vitesses du vent, humidités de l’air, températures des surfaces au sol et températures moyennes radiantes ont été recueillies depuis les récepteurs placés dans chaque espace à une hauteur de 1.1m. (cf. Fig. V.4)* et simulées avec le logiciel Envimet 3.1.

* Il est à noter que les stations ont été placées graduellement hauteur 3m, 12m,24m) de droite à gauche pour éviter que les hauteurs supérieures déploient leurs ombres sur les récepteurs des plus basses et donnent ainsi de faux résultats. (La simulation est effectuée simultanément pour les 7 stations).

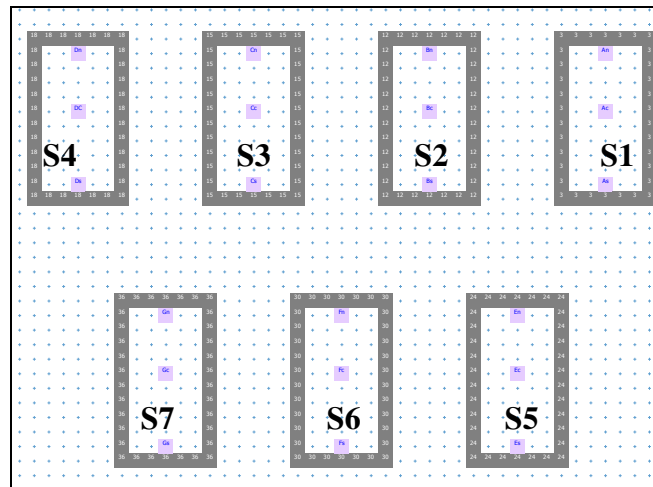


Fig. V.4 : Positions des récepteurs au niveau des stations simulées (*Auteur*).

Les résultats ont servi comme inputs au modèle RayMan pro 3.1 pour calculer les indices thermo physiologique PET et mPET.

V-5 - Résultats des simulations pour le solstice d'hiver

Comme mentionné au **chapitre IV**, les simulations sont faites pour deux journées le 21/12 et le 23/12 choisies pour leur représentativité.

V-5- 1- Journée du 21/12

Les résultats des simulations pour cette journée froide typique d'hiver sont les suivants :

a - Températures de l'air

Les variations des températures de l'air au niveau des centres des sept stations révèlent trois phases (**cf. Fig V. 5**) :

- En l'absence du rayonnement solaire direct des espaces entre 0-10h et 16h-00h (**cf. ensoleillement, annexe E**), des faibles variations sont relevées.

La station S1 (SVF 0.938) enregistre la plus basse température de l'air $T_{a_{xc}} = 3.8^{\circ}\text{C}$ à 8h, soit une différence de 0.6°C avec la station S4 (SVF 0.405) moyennement profonde et maximale de 0.9°C avec S7 (SVF = 0.171) la plus profonde.

Ce même comportement est observé après 16h avec un écart maximum de 0.6°C entre S1 et S4 à minuit.

Ces écarts trouvent leur explication dans les faibles vitesses du vent ($V = 0.6 \text{ m/s}$) au niveau des géométries S2 à S7 (**cf. Fig. V.6**), comparativement à S1 ($V = 1.5 \text{ m/s}$) et le piégeage des radiations en grandes longueurs d'onde (**cf. Fig. V.7**).

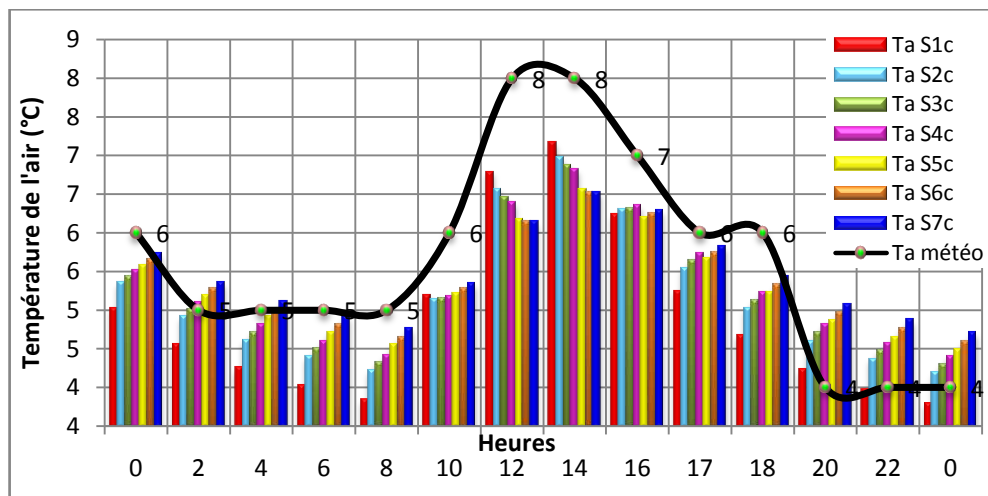


Fig V. 5: Variations de la température de l'air aux niveaux des stations simulées pour le 21/12 (*Auteur*).

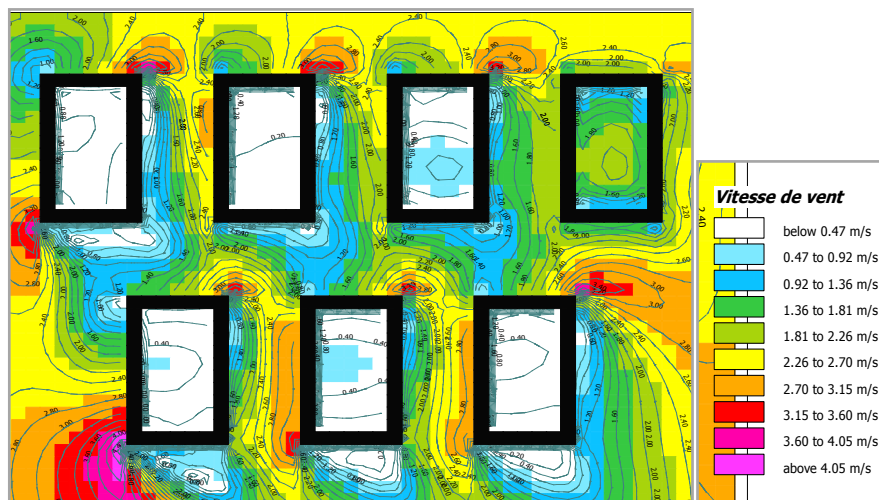


Fig. V.6 : Vitesses du vent dans les stations simulées pour le 21/12 à 8h (*Auteur*).

En cette période, une forte corrélation positive existe entre H/W et la température de l'air (cf. **Fig. V.8**) d'où $R^2 = 0.91$. Cette forte corrélation est négative avec le SVF ($R^2 = 0.98$).

Ces résultats identifient un ICU nocturne bénéfique pour l'ambiance thermique des espaces en cette période froide, où l'on enregistre une ΔT_{u-r} max de 0.41°C avec S4 par contre 1°C avec S7 d'où l'intérêt des géométries profondes à limiter les déperditions que nous estimons, préjudiciables en période estivale.

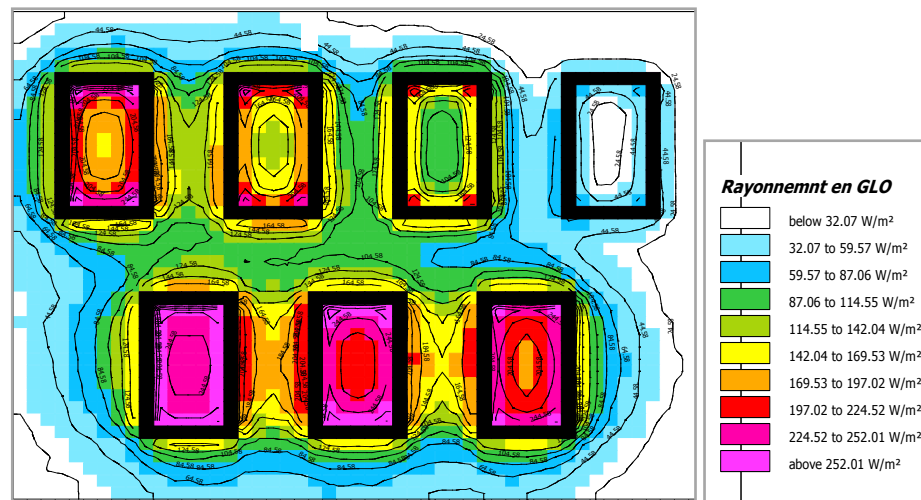


Fig. V.7 : Rayonnement en grandes longueurs d'ondes dans les stations simulées pour le 21/12 à 8h (Auteur).

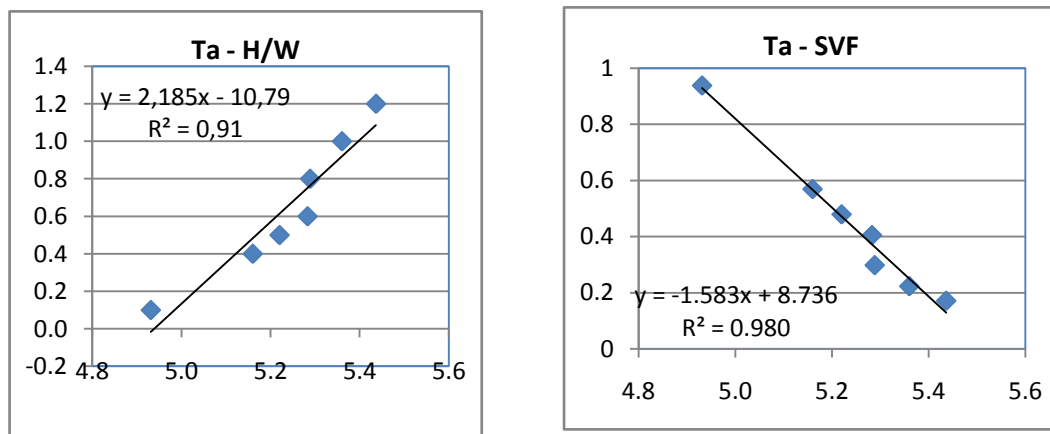


Fig. V.8 : Corrélation H/W et SVf et les températures de l'air pour le 21/12 (Auteur).

Ces résultats sont en parfaite accord avec ceux trouvés par H.Andrade (2003) et Sharmin et al. (2015). Ils confirment la protection fournie par les espaces ouverts à faibles SVF contre les basses températures de l'air.

A **10h** et **16h**, quand les espaces dégagés ne subissent plus les températures radiantes (Benadji, 1999), ces valeurs se confondent où une différence maximale de $0,1^{\circ}\text{C}$ est enregistrée entre la station S1 et les stations S4 et S7 à 10h et $0,2^{\circ}\text{C}$ à 16h.

Entre **10h - 16h**, comme représenté par la **Figure V. 5** s'enregistrent les plus grandes valeurs des températures de l'air puisque le soleil frappe perpendiculairement l'axe de ces géométries. A **14h** la station S1 représentant un plus grand accès solaire enregistre une température de l'air maximale de $7,2^{\circ}\text{C}$ d'où ses écarts avec les stations S4 et S7 qui se trouvent plus froides que S1 de **0,4** et **0,7** $^{\circ}\text{C}$ respectivement.

A partir de **16h**, ce comportement s'inverse et les températures de l'air les plus élevées sont relevées dans les stations à faible SVF. Déjà à l'ombre, leur bilan radiatif devient négatif alimentant l'espace en flux sensible d'où l'élévation de la température (cf. **Fig. V.9**).

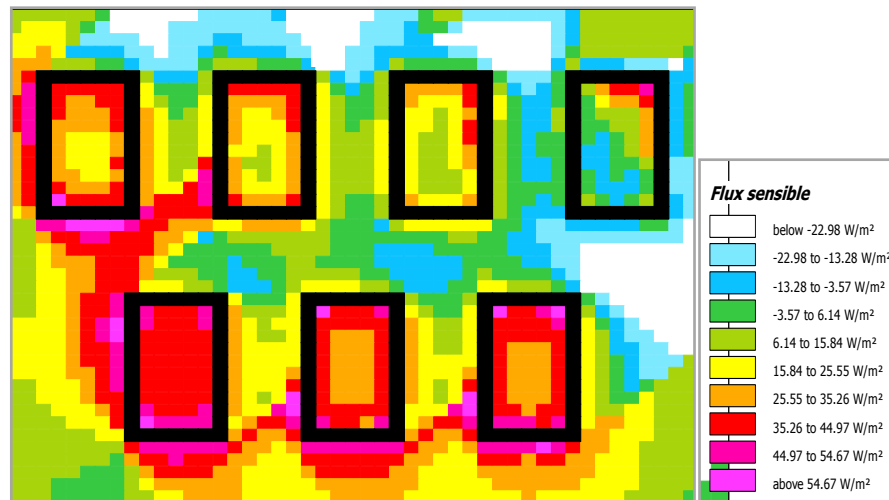


Fig. V.9 : Flux sensible dans les stations simulées pour le 21/12 à 16h (Auteur).

Toutefois, il faut noter que ces faibles variations font de la température de l'air un faible indicateur de confort thermique dans les espaces extérieurs (Ali toudert et Mayer ,2006 ; Berkovic et al., 2012).

- b- Les vitesses du vent

Des faibles vitesses sont observées dans ces espaces urbains par rapport aux vents synoptiques (cf. **Fig. V.10**). Les vitesses du vent enregistrées dans la station météo à midi étaient de 8.3 m/s soit 2.7 m/s à 1.5m^{*}, contre une moyenne de 0.4 m/s pour les stations urbaines à l'exception des stations S1 qui enregistre 2 m/s et la station S3 (SVF 0.478) qui se distingue par la plus faible valeur soit 0.2 m/s.

Ceci fait des géométries profondes un meilleur protecteur des espaces piétons des effets thermiques et dynamiques des vents froids d'hiver.

* Les vitesses de vent à 10m ont été transformées pour 1.1m et 1.5m via le site www.wind-data.ch.

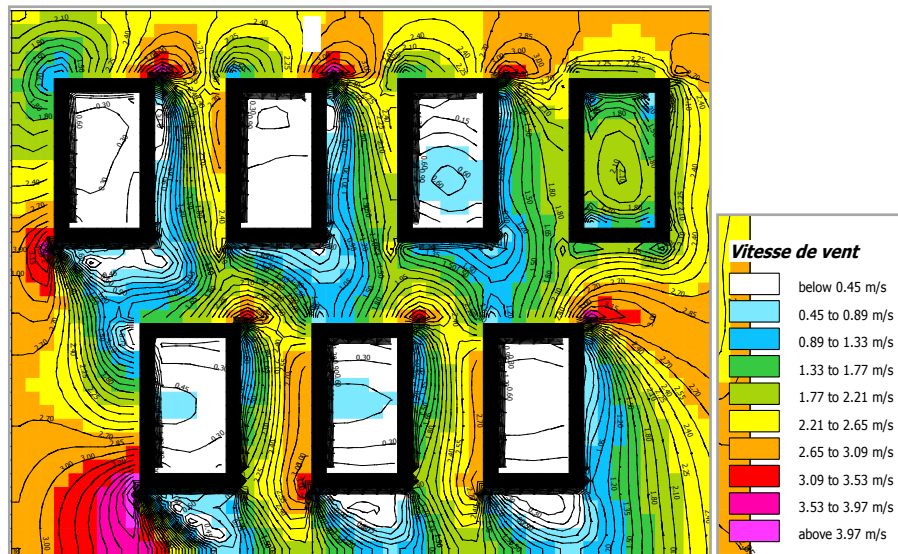


Fig. V.10 : Vitesses du vent dans les stations simulées pour le 21/12 à 12h (Auteur).

- c- Températures des surfaces au sol

D’après la littérature, les surfaces horizontales pour les géométries d’orientation Nord / Sud avec un rapport H /W compris entre 0.1 - 1 atteignent leur maximum entre 11h et 15h (Bougiatoti, 2006).

La stations S₁, S₂, S₃ et S₄ atteignent une température au sol maximale à 12h d’une valeur respectivement de 10.3°C, 22.6, 24.2 et 22.6 °C, soit une différence maximale assez significative de 13.9°C entre S₁ et S₃ et 12.3 °C avec S₂ et S₄ (cf. Fig. V.11).

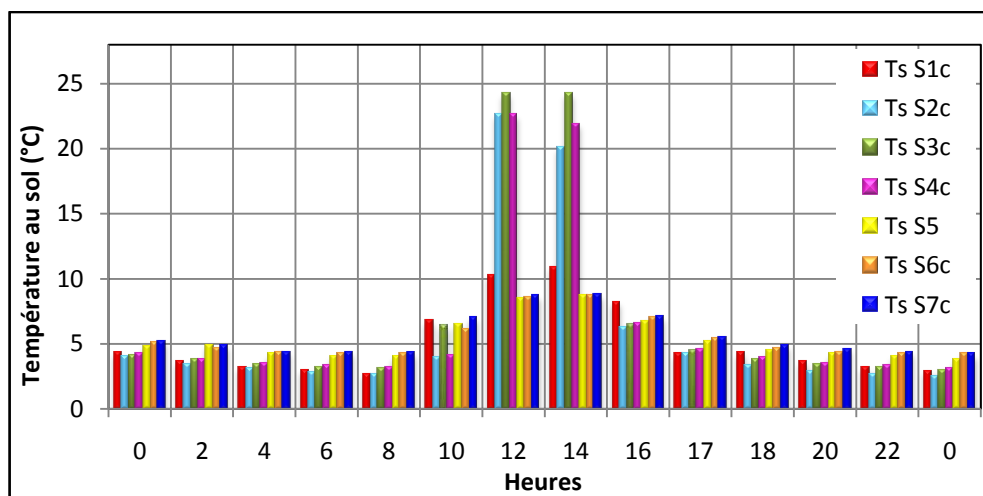


Fig. V.11 : Températures des surfaces au sol des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

Ces résultats semblent contradictoires avec le grand cumul de rayonnement direct reçu par les surfaces de cette espace ouvert S1 (H/W= 0.1, SVF 0.938) en comparaison avec les géométries plus fermées.

Ceci trouve son explication dans ses grandes vitesses du vent qui atteignent les 2 m/s comparativement aux autres stations (cf. Fig. V.10) en faveur d'un échange convectif entre les surfaces minérales et l'air et donc une dissipation rapide de la chaleur emmagasinée par les surfaces au sol. Les températures au sol en S3 et ses faibles vitesses du vent confirment cette conclusion.

Pour les trois autres stations S5, S6 et S7 dont le sol est à l'abri du rayonnement solaire direct (cf. Fig. V.12) mais soumis seulement au rayonnement diffus et réfléchi, cette température dépasse d'à peine les 9°C.

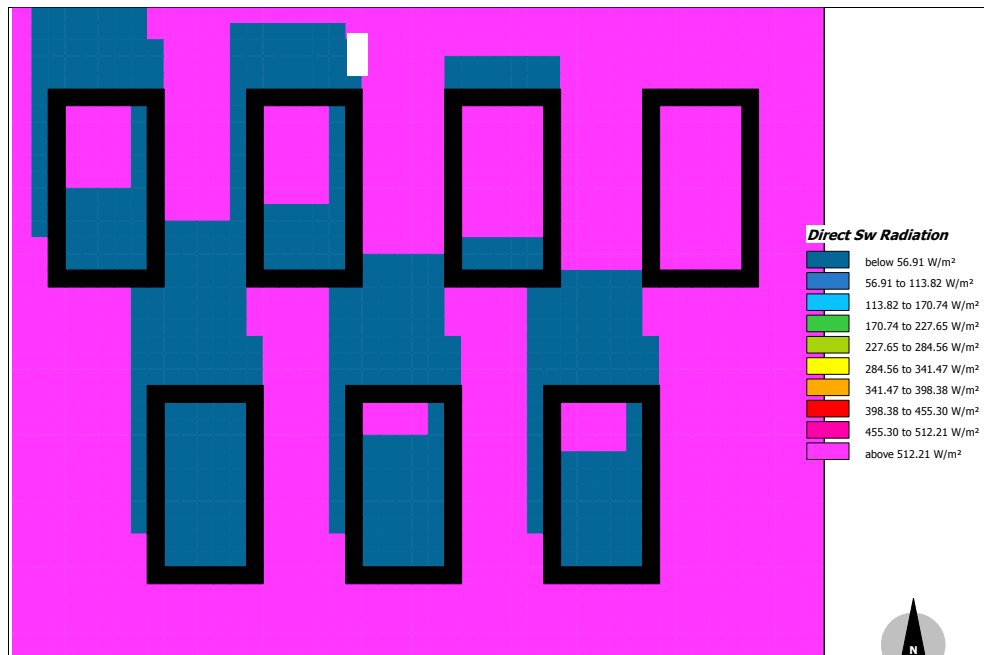


Fig. V.12 : Rayonnement direct dans les stations simulées pour le 21/12 à 12h (Auteur).

Cette situation s'inverse à 16h. En ce moment, les surfaces au sol de ces dernières sont supérieures d'1°C de celle de S₁ vu leur faibles échanges avec le ciel contrairement aux stations S₂, S₃ et S₄, dont les récepteurs sont déjà à l'ombre (cf. annexe E), qui se trouvent plus froides d'environ 2°C que S₁, car le rayonnement en GLO déjà amorcé (cf. Fig. IV.13) est favorisé par leur ouverture au ciel.

Dans chacune de ces stations, en 2h de temps, elle chute de respectivement 13.8, 17.7, 15.3 °C. Ceci nous renseigne sur le pouvoir de refroidissement des ombres

projetées par les bâtiments en comparaison aux vitesses du vent (Gulyas et al. 2006 ; Picot, 2004).

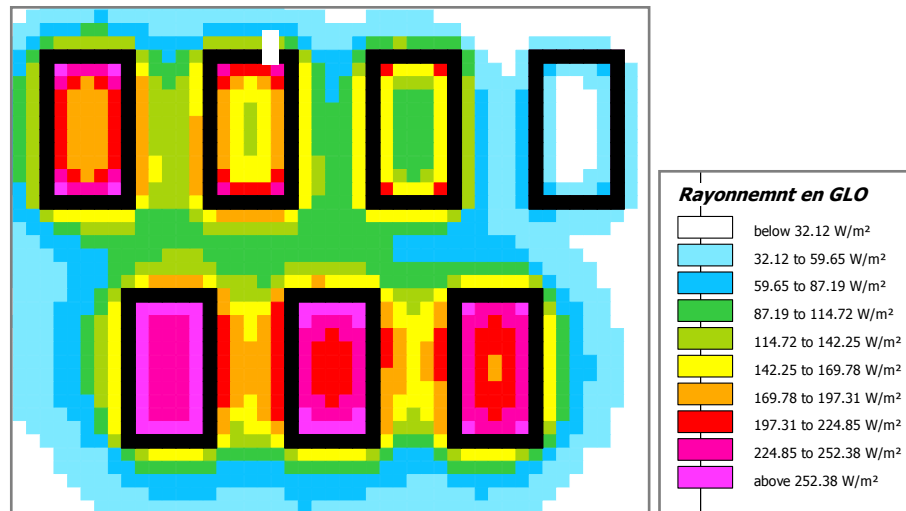


Fig. V.13 : Rayonnement en GLO dans les stations simulées pour le 21/12 à 16h (Auteur).

Une très faible corrélation négative de 1 % a été trouvée entre la géométrie décrite par le H/W (voire nulle avec le SVF) et les températures surfaciques.

Ces résultats trouvent leur explication dans les différences entre être en situation d'exposition au soleil ou être à l'ombre et les inégalités en vitesses du vent (Gulyas et al., 2006).

-d- Evaluation du confort thermique piéton pour le 21/12

Après avoir analysé les différentes interactions des géométries des places avec les paramètres microclimatiques, une estimation du confort humain résultant de ces conditions microclimatiques s'avère nécessaire pour pouvoir déterminer laquelle des stations répondra le mieux aux attentes des usagers de l'espace urbain.

L'analyse et la discussion du confort thermique dans les stations d'études se baseront sur l'estimation de la température moyenne radiante T_{mrt} et les indices thermo physiologiques de confort :

- ✚ PET pour évaluer la sensation thermique réelle, calculé pour un individu habillé d'une tenue courante (0.9 Clo) et en activité sédentaire (80 w).

- ✚ mPET, une modification du premier, pour évaluer le confort thermique adaptif notamment par la tenue vestimentaire, où l'isolement par les vêtements de 1.5 ou 2 Clo est pris en charge dans l'évaluation de la sensation thermique.

Le traitement des outputs obtenus depuis la modélisation par Envimet 3.1 et introduits et traités par RayMan pro 3.1 a donné pour résultats :

d- 1 Condition de confort thermique dans la zone centrale de l'espace

La Tmrt, représente le paramètre clé dans l'évaluation de la sensation thermique dans les espaces extérieurs car elle influe considérablement sur le bilan énergétique humain et sur l'indice thermo-physiologique PET (cf. Chap. I).

Etant donné que le bilan radiatif dans les espaces ouverts est étroitement lié aux propriétés thermiques du sol (albédo, émissivité, conductivité et évapotranspiration) et aux vitesses du vent, l'examen des résultats de la **figure .V.14**, révèle une même logique de distribution des températures moyennes radiantes (**Tmrt**) que celle des températures au sol (cf. **Fig. V.11**).

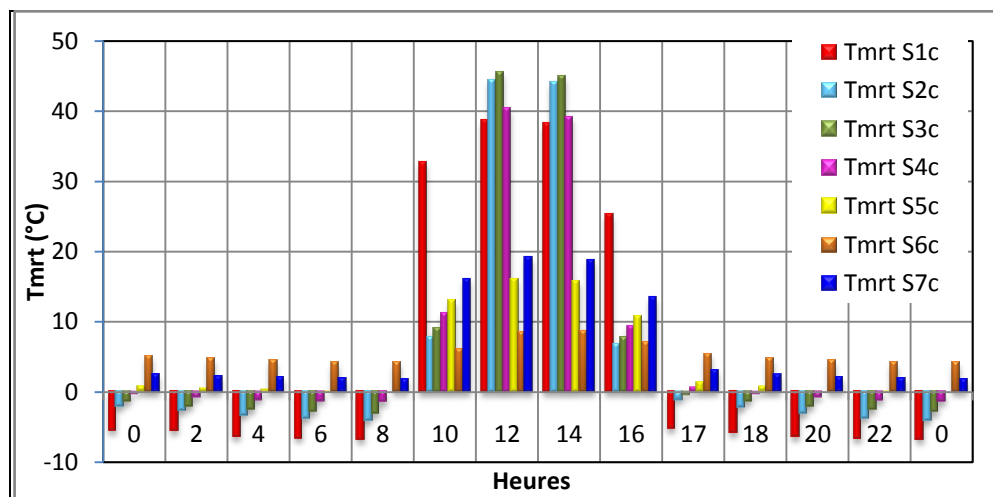


Fig. V.14: Variations de la Tmrt dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

En l'absence du rayonnement solaire dans les stations c.à.d. de 0 - 10h et au-delà de 16h, les résultats de la modélisation de la Tmrt ont montré une forte corrélation positive ($R^2 = 0.98$) avec le rapport d'aspect H/W (négative pour le SVF où $R^2 = 0.96$) comme prouvé par H .Andrade (2003) due à l'enclosure et la réduction des échanges entre le sol et le ciel. Ceci nous renseigne sur l'ambiance thermique par rapport à un espace grandement ouvert au ciel.

La Tmrt au niveau de la station S₄ (SVF 0.405) est la plus élevée, - 0.1°C avec une différence maximale de 5.8 °C avec la station S₁.

Ces écarts sont plus importants pour les stations S5, S6 et S7 où une différence maximale de 7.1°C entre S7 et S1 est enregistrée.

Un grand stress thermique est ressenti (cf. Fig.V.15). Les valeurs minimales sont observées une demi-heure après le levé du soleil (7h 45') et une heure avant son coucher (17h 18') où le bilan thermique devient négatif ceci explique les valeurs de la Tmrt en début et fin de journée.

A 8h une PET de -3.4, -0.2, -0.1 et 0.2 °C sont enregistrées respectivement dans S1, S2, S3 et S4 et -1.7, 2.4, 1.7 et 2.2 °C pour le même ordre de stations juste avant son coucher correspondant à un fort stress thermique dû au froid, si bien que même un isolement par l'habillement de 2 Clo ne pourrait instaurer la sensation de confort (cf. Fig. V.16).

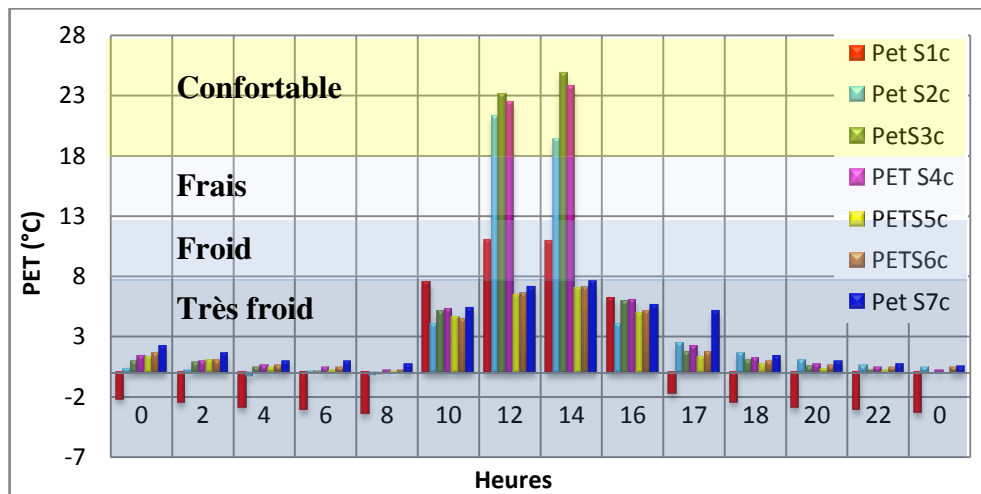


Fig. V.15 : Variations de la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

En ces deux périodes, les stations plus profondes S5, S6 et S7, moins ouvertes au rayonnement en grande longueur d'onde vers la voûte céleste, enregistrent des valeurs de PET supérieures mais sans pour cela atteindre le confort. La station la plus profonde S7 (SVF = 0.171) affiche une PET comprise entre 0.5 et 5.4 °C correspondant à un niveau de " très fort stress dû au froid".

L'isolement par le vêtement (2 Clo) améliore la sensation thermique d'un niveau mais sans atteindre le confort. La mPET est comprise entre 7.8 et 10.7 °C correspondant à une sensation thermique de "Froid" (cf. Fig. V.16).

Ces conditions critiques rendent incommode l'usage des espaces ouverts et nous renseignent sur l'environnement thermique nocturne aux abords des bâtiments.

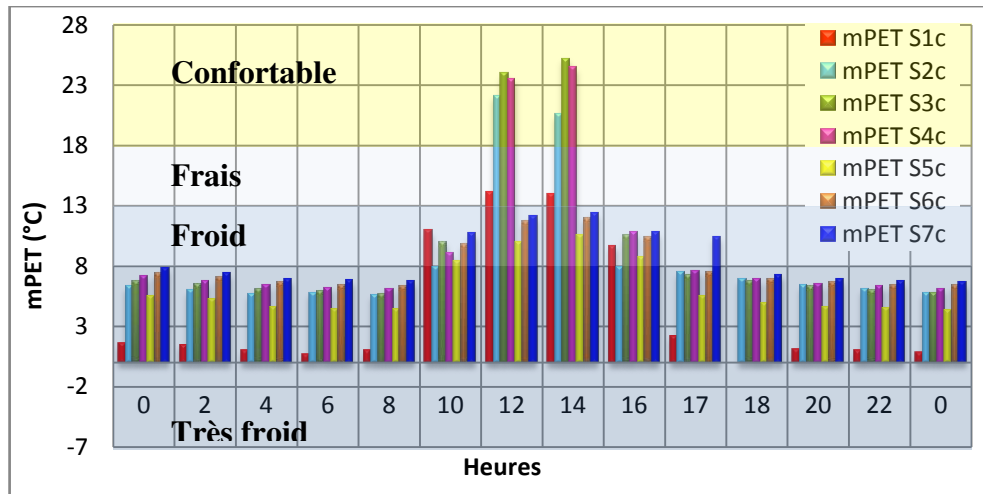


Fig. V.16 : Variations de la mPET dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

Ceci confirme nos résultats issus de notre analyse bioclimatique graphique par le biais du diagramme d' Olgyay (**cf.Chap.IV**).

A partir de 8h et jusqu'à midi, la T_{mrt} s'accroît rapidement dans les quatre stations S1 à S4 atteignant son maximum à midi. Sa valeur est de 40.4°C dans la station S4 (accroissement de 41.9°C), 45.5°C dans la station S3 (accroissement de 48.5°C), 44.4°C dans la station S2 (accroissement de 48.5°C) et 38.7°C dans la station S1 (accroissement de 45.5°C) soit une différence de 1.7°C avec la station S4.

Ces résultats sont contradictoires avec les quantités du rayonnement direct incident que reçoit S1 comparativement aux trois autres stations. Ils trouvent leur explication dans le réchauffement différentiel des surfaces au sol et aux vitesses du vent comme il a été déjà mentionné (**voir supra**) car la T_{mrt} est très sensible aux mouvements d'air (Gulyas et al. 2006 ; Kedissa, 2010 ; Chatzidimitriou et Yannas, 2016).

Dans les stations plus profondes, soumises seulement au rayonnement diffus, réfléchi et rayonnement en GLO, les valeurs sont beaucoup plus faibles que celles des précédentes. Une valeur maximale de la T_{mrt} , 19.2°C , est enregistrée au niveau de S7 avec un accroissement de 17.3°C .

L'après midi une décroissance rapide est provoquée par la projection des ombres des murs sur les récepteurs. Cette décroissance atteint à 17h en S1, S2, S3 et S4 respectivement 43.9 , 45.5 , 45.9 , et 39.8°C . Ceci nous renseigne sur la capacité de l'ombre projetée par les bâtiments (la géométrie) à diminuer la T_{mrt} et le pouvoir de refroidissement rapide des espaces à grands SVF.

La décroissance au niveau des stations plus profondes, souvent à l'ombre, est moins frappante. Elle ne dépasse pas les 15,8°C en S7.

La période de simulation diurne révèle une corrélation négative de la T_{mrt} et le rapport H/W d'où $R^2 = 0.8$ (pour le SVF, $R^2 = 0.83$) comme trouvé par un nombre de chercheurs (Shahab kariminia et al., 2015 ; Chatzidimitriou et Yannas, 2016 ; Ghaffarianhoseini et al.,2015 ; Talghani et al.,2014b).

En cette période d'usage des espaces ouverts, entre 11h et 15h, la sensation thermique dans les stations S2, S3 et S4, et avec seulement un niveau d'habillement de 0.9 Clo, se situe entre frais à confortable notamment entre 12 et 14h. Des valeurs, respectivement, de 26,5, 24,8 et 23,8 °C sont enregistrées qui correspondent à une période de confort absolu. Ces mêmes sensations sont obtenues pour la mPET (cf. **Fig. V.16**).

L'utilisateur de la station S₁, pourtant plus ouverte au rayonnement solaire direct, n'atteindra jamais le niveau de confort où on enregistre une mPET maximale de 11°C à 12h soit une différence de 5.1, 2.1 et 1.4 °C avec les stations S2, S3 et S4.

Ceci est dû comme déjà précité aux vitesses de vent supérieures à son niveau comparativement aux autres stations sachant que la T_{mrt} est très sensible aux mouvements d'air. D'où la nécessité de protéger l'utilisateur de l'espace urbain des effets thermiques du vent en période hivernale.

De même, en cette période, les stations S5, S6, S7 soumises uniquement à un rayonnement diffus, n'atteindront jamais le confort où une mPET maximale de 10.5, 12.1 et 12.4°C est respectivement enregistrée correspondant à un fort stress thermique dû au froid.

Le calcul révèle une bonne corrélation négative entre le SVF et la PET ($R^2 = 0.94$) à condition que les stations soient soumises aux mêmes conditions d'ensoleillement comme prouvé par Chatzidimitriou et Yannas (2016), Andrade (2003) et Kedissa (2010).

Ceci met en évidence l'intérêt des géométries à un SVF moyen pour le confort thermique humain en saison hivernale.

d -2 - Condition de confort thermique dans la zone Nord de la place

Les zones au Nord (Façade sud des bâtiments) de chaque station sont exposées à une durée d'ensoleillement plus longue, sauf en S7, comparativement à leur centre (cf. **Fig. V.12**).

Si les conditions de confort sont les mêmes que pour la zone centrale, pour les stations S1, S2, S3 et S4, la zone de confort s'étend à 12h pour englober les stations S5 et S6 où l'utilisateur bénéficie d'une PET de 27°C correspondant à un niveau de confort élevé sans avoir à réajuster le niveau d'habillement (cf. Fig. V.18, 19).

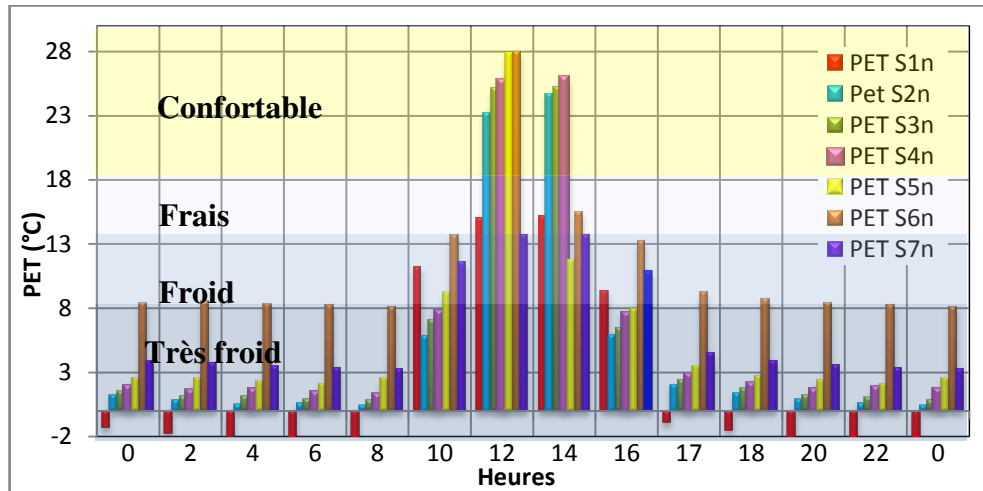


Fig. V.18 : Variations de la PET dans la zone Nord des stations simulées pour un 21/12 (Auteur).

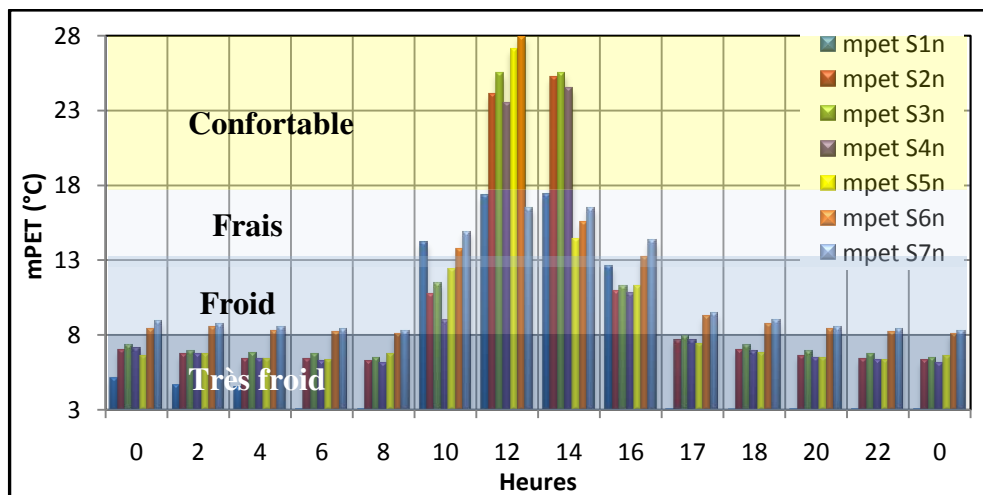


Fig.V.19 : Variations de la mPET dans la zone nord des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

d-3 - Condition de confort thermique dans la zone Sud

Toujours à l'ombre, l'ambiance thermique dans la zone sud des places (Façade nord des bâtiments) est très défavorable tout au long de la journée.

La T_{mrt} présente une corrélation négative très significative avec le SVF ($R^2 = 0.98$) due à un rayonnement réfléchi et un rayonnement en GLO plus importants pour les géométries fermées en cette zone (cf. Fig. V. 13, et annexe E).

Les valeurs de la PET comprises entre 8.5 et 13.5 °C pour les stations S2 à S7 dans les heures les plus significatives indiquent un fort stress thermique dû au froid.

La station S1 en cette période offre une ambiance glaciale où la PET ne franchira pas les 3°C. La mPet en cette période est comprise entre 12.8 et 14.9°C. Ceci dit que même avec un réajustement de l'habillement à 2 Clo la sensation de confort ne sera pas atteinte. (cf. Fig. V.20, 21).

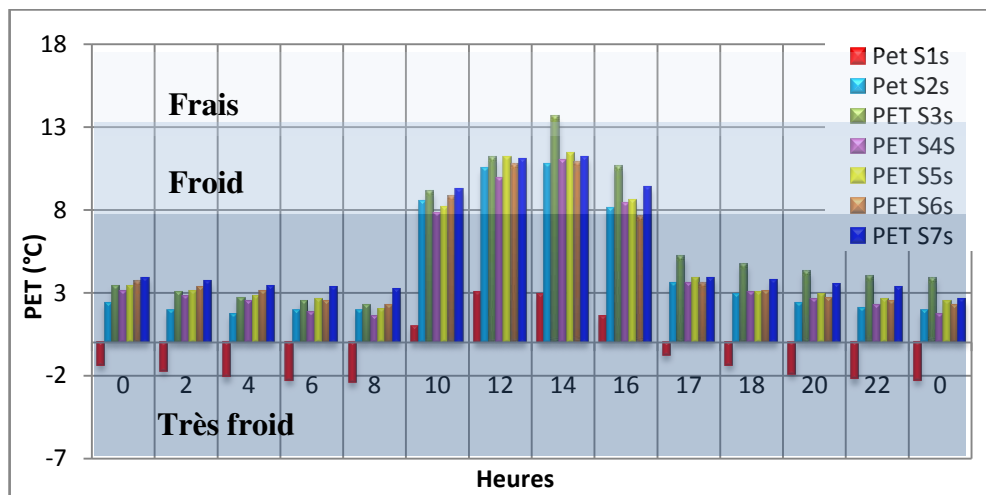


Fig. V. 20: Variations de la PET dans la zone sud des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

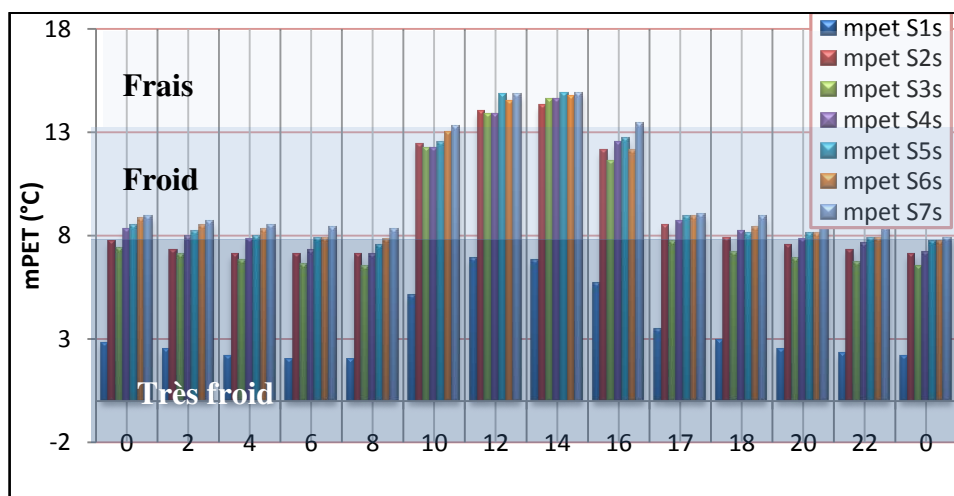


Fig. V.21 : Variations de la mPET dans la zone sud des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

e- Diversité des ambiances thermiques dans les stations de mesures

Les écarts entre les zones au soleil et à l'ombre restent très significatifs ou des valeurs qui dépassent les 10°C en mPET (ou PET) sont obtenues pour plus de 4h pour les stations S1, S2, S3 et S4. Donc ces espaces offrent des ambiances thermiques variées en leur sein garantant d'une plus grande fréquentation car l'utilisateur aura le choix de s'installer selon ses préférences (Zacharias et al. 2001, 2004 ; Lin, 2009 ; Westerberg, 1984). Contrairement aux stations S5, S7 où la sensation thermique froide règne sur toute la surface durant toute la période de simulation. Exception faite pour la station S6 qui présente des écarts homogènes sauf à midi où la différence maximale est de 17,2 °C en PET, 13.4°C en mPET.

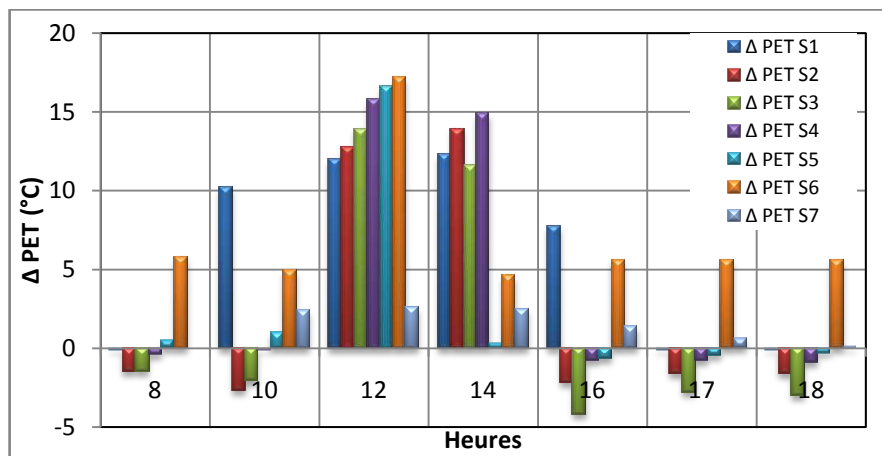


Fig.V.22: Ecarts de la PET entre zones à l'ombre et zones au soleil des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

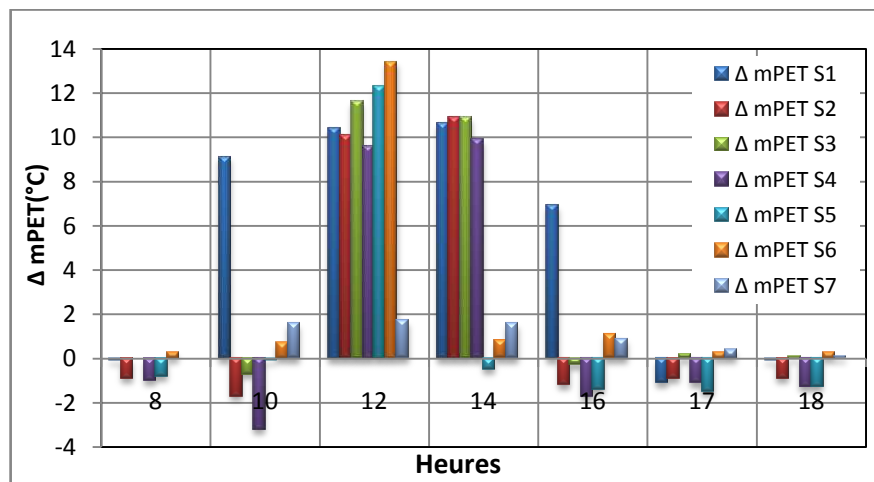


Fig.V.23 : Ecarts de la mPET entre les zones à l'ombre et zones au soleil dans les stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

Ces écarts montrent aussi qu'en absence des rayons solaires, les zones qui se trouvaient à l'ombre dont la vue du ciel est obstruée par les bâtiments ont des degrés en plus par rapport à ceux ouverts au ciel.

V-5- 2- Journée du 23/12

Pour la deuxième journée, les quatre stations S1, S2, S3 affichent des conditions qui dépassent même la sensation de neutralité thermique à chaud et fortement chaud pendant plus de 4h de temps en cette journée ensoleillée d'hiver avec un habillement courant de 0.9 Clo.

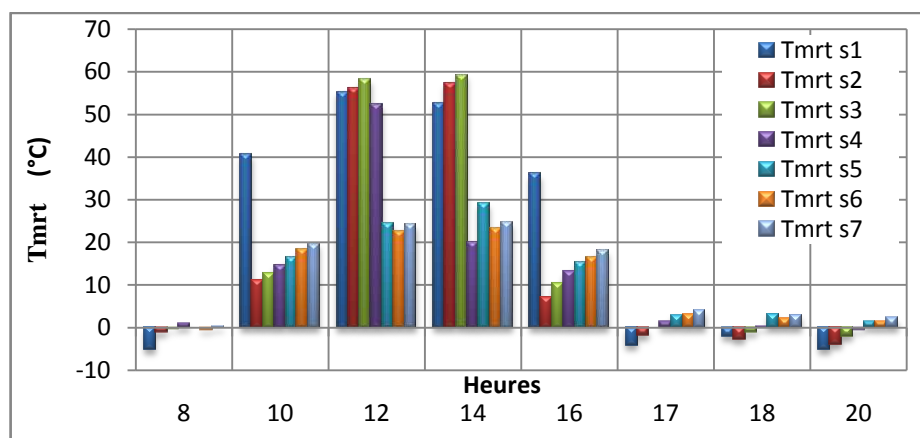


Fig. V.24 : Variations de la Tmrt dans la zone centrale des stations simulées pour le 23/12 (Auteur).

Des valeurs de PET qui dépassent les 28°C sont enregistrées, contrairement aux stations plus profondes qui offrent des conditions toujours froides même à 12h où le soleil frappe leurs axes perpendiculairement. La station S4 se distingue pour être confortable pendant seulement 2h de temps. A 14h son récepteur central est déjà à l'ombre (**cf. annexe E**).

D'où une première validité de l'intervalle dégagé $0.4 < SVF \leq 0.5$ et l'intérêt des géométries des stations moyennement profondes pour le confort thermique des usagers des espaces urbains en période froide.

Il faut noter que la station S2 (H/W 0.4, SVF 0.569) qui se trouve hors intervalle présente les mêmes performances que la station S3 (H/W 0.5, SVF 0.47), son comportement estival permettra de trancher en sa faveur ou l'inverse.

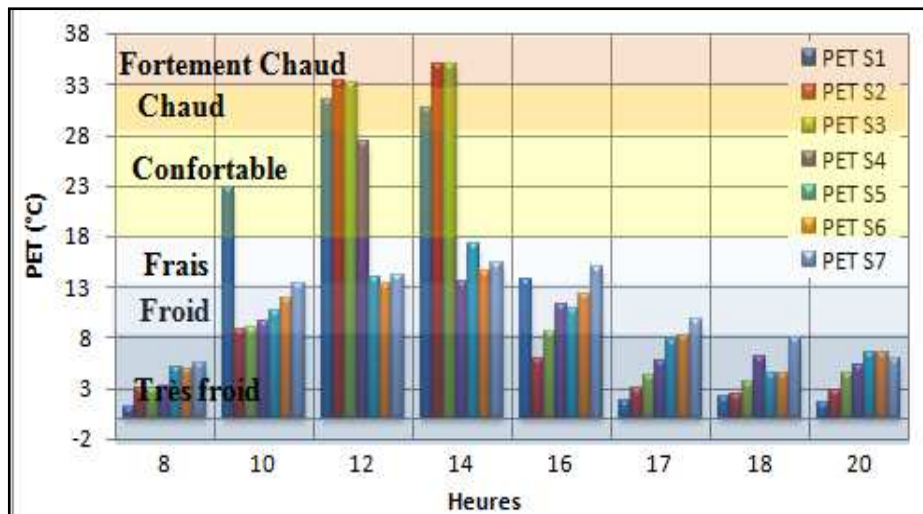


Fig. V.25 : Variations de la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 23/12 (Auteur).

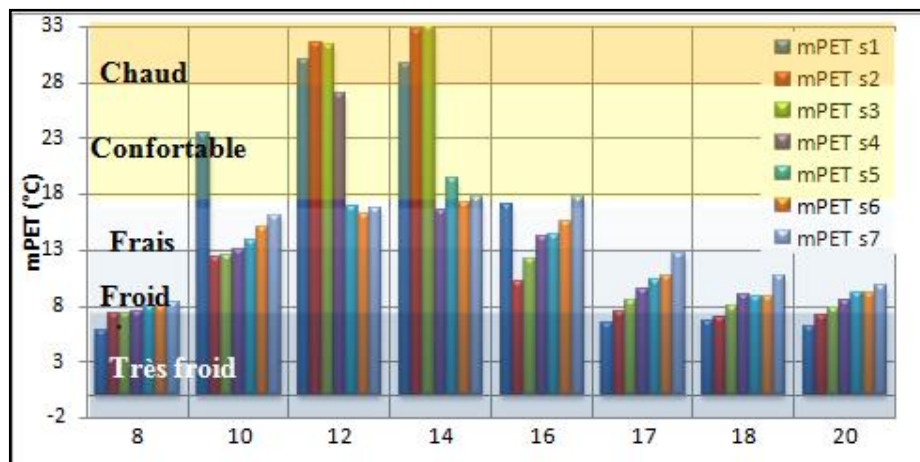


Fig. V.26 : Variations de la mPET dans la zone centrale des stations simulées pour le 23/12 (Auteur).

V-6- Résultats des simulations pour le solstice d’été :

Une journée type d’été (21/06) et une deuxième caniculaire (26/06) ont été simulées (cf. chapitre IV).

Comme pour la période hivernale, des faibles variations des températures de l’air sont relevées pour la journée du 21/06, journée type d’été.

En l’absence du rayonnement solaire direct, la station S1 (SVF 0.938) enregistre la température la plus basse de 19.8°C (15.5°C pour la journée caniculaire) à 6h, soit une différence maximum d’environ 1.3 °C avec les trois autres stations (2.7°C pour la

journée du 26/06). Ceci met en évidence le rôle des géométries même moyennement fermées au ciel dans la formation de l'îlot de chaleur urbain.

En cette période, une corrélation négative de 0.9 entre la température de l'air et le SVF a été soulevée.

Entre 8h et 16h, la station S1 représentant un plus grand accès solaire enregistre une température de l'air maximale de 31.3 °C, soit une différence de 1.3° C avec la station S4.

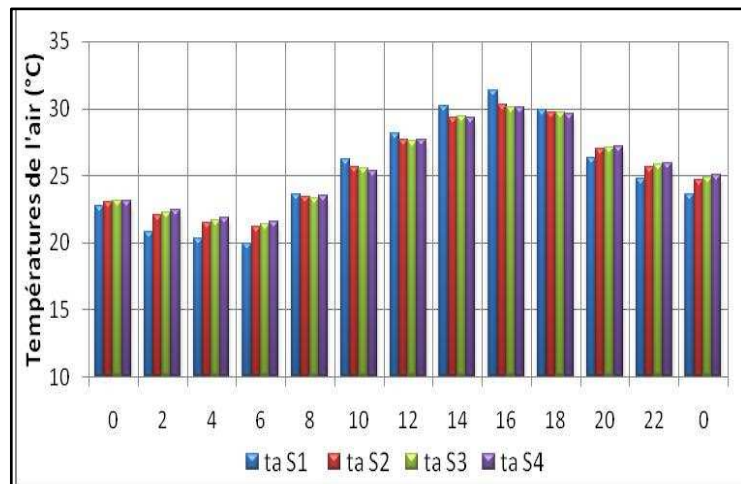


Fig. V.27 : Variations de la Température de l'air dans la zone centrale des stations simulées pour la Journée type d'été 21/06 (Auteur).

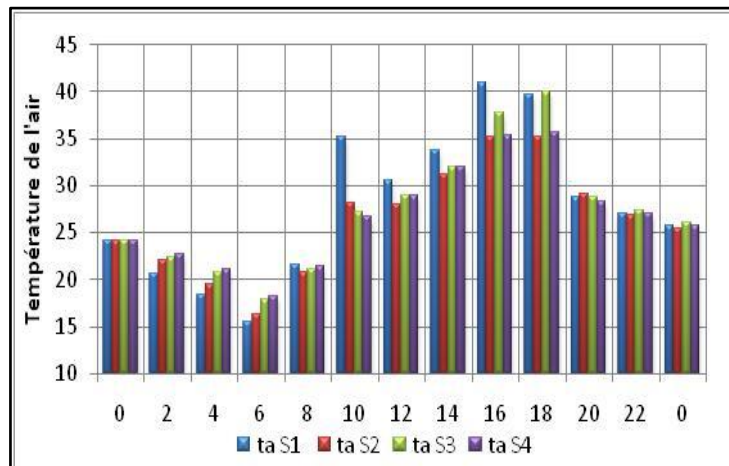


Fig. V.28 Variations de la Ta dans la zone centrale des stations simulées pour le 26/06 (Auteur).

Après 16h, ce comportement s'inverse et les températures de l'air les plus élevées sont relevées dans les stations aux SVF moyens.

Déjà à l'ombre (cf. **annexe. E**), leur bilan radiatif devient négatif alimentant l'espace en flux sensible d'où l'élévation de la température.

La corrélation entre le SVF et la température de l'air durant la période diurne, 8h – 20h est positive et assez significative ($R^2 = 0.97$), ceci indique l'intérêt des géométries à faible ouverture au ciel à réduire les températures extrêmes.

Pour la journée caniculaire (26/06), contrairement à la précédente, les variations de la température de l'air sont plus compliquées dues à un vent de direction variable.

Quand l'angle d'attaque dévie de $\pm 30^\circ$ (cf. **Fig. V.29**) le mouvement devient turbulent sans effet de refroidissement par la combinaison des effets thermiques et mécaniques (Doulos et al., 2004),

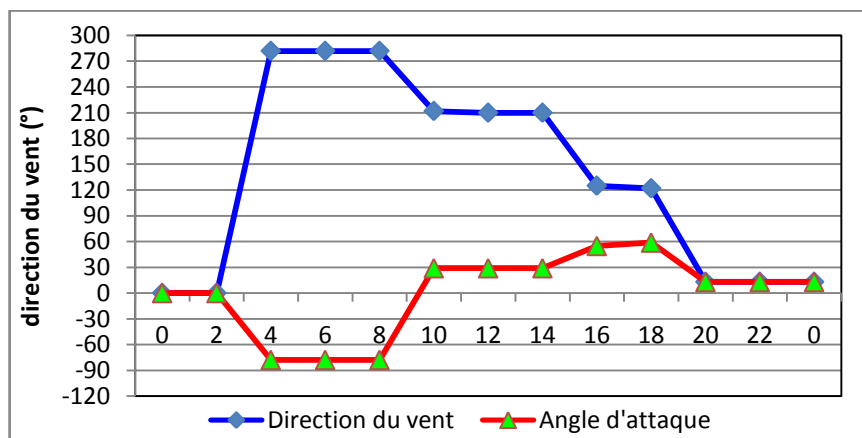


Fig. V.29 : Déviations du vent par rapport à l'orientation de l'espace le 26/06 (Auteur).

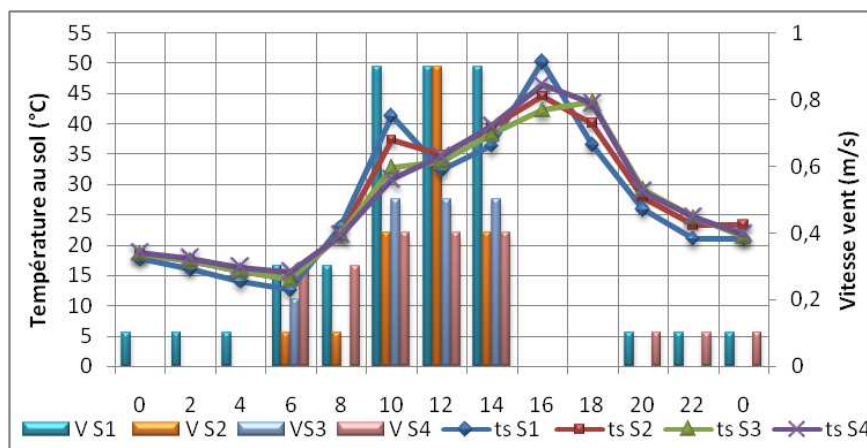


Fig. V.30 : Variations de la température au sol en fonction des vitesses du vent dans la zone centrale des stations simulées pour un 26/06 (Auteur).

ainsi la chaleur s'accumule (Bozonnet, et al., 2002) d'où l'accroissement de la température de l'air au niveau de S1 à 10h de 13.6°C par rapport à 8h. Les températures surfaciques augmentent même en présence de convection (**cf. Fig. V.30**).

Cette progression est plus lente dans les espaces plus fermés où on enregistre une augmentation maximale de 7.4°C au niveau de S2 et minimale de 5.3°C au niveau de S4 soit un écart très significatif de température de 8.3°C avec S1.

Suivant toujours l'angle d'attaque, les températures de l'air décroissent ou croissent atteignant un maximum pour S1 à 16h de 40.9°C, et à 18h pour S3, S4 et S2 respectivement de 39.9, 35.7 et 35.1°C dont le processus de refroidissement des surfaces s'est amorcé car les récepteurs sont déjà à l'ombre depuis 16h. La différence maximale durant cette période est de 5.8°C entre S1 et S2.

La corrélation entre le SVF et la température de l'air durant la période diurne, 8h – 20h est positive et assez significative ($R^2 = 0.77$).

Donc l'angle d'incidence du vent sur l'axe d'orientation de la place peut compromettre une ventilation efficace des espaces d'où l'intérêt de la combinaison orientation aux vents et orientation au soleil.

L'examen des résultats de la **figure V. 31** révèle une même logique de variation des températures moyennes radiant (Tmrt) que celle des températures au sol d'où une corrélation positive très forte d'une valeur de $R^2 = 0.98$ (0.99 pour le jour caniculaire).

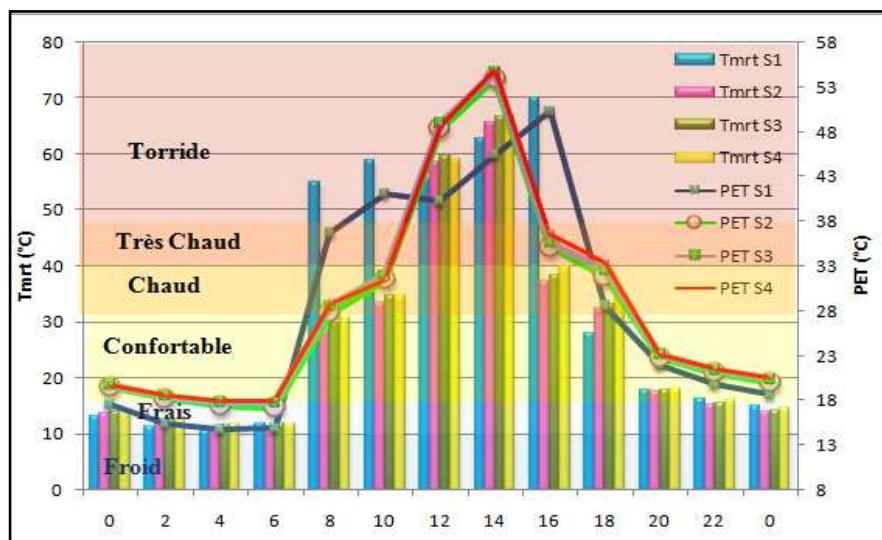


Fig. V.31 : Variations de la Tmrt et la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/06 (Auteur).

Les résultats de la modélisation de la T_{mrt} ont montré également une grande corrélation positive ($R^2 = 0.84$) entre le SVF et la T_{mrt} pour toute la période de mesure, elle augmente à 0.89 pour le jour caniculaire.

La corrélation est de 0.94 pour la période de l'usage de l'espace (10h-20h). Résultat de la fermeture partielle au rayonnement solaire.

En absence des rayons solaires, la différence de la T_{mrt} au niveau des quatre stations est très faible d'où l'on enregistre le plus grand écart à 2h du matin soit 1.3°C entre S1 et S4 et seulement 0.4°C avec S2 et S3.

Ces différences sont beaucoup plus conséquentes pour la journée caniculaire, où on observe une différence de 3.6°C entre S1 et S4 à 6h.

En cette période, la valeur maximale de la PET obtenue en S1 est de 22°C (19.5°C pour le jour caniculaire) et une moyenne de 23°C (20.1°C pour le jour caniculaire) pour les trois autres stations à 22h. Ceci correspond à une sensation de confort. La minimale est obtenue à 6h du matin avec un écart maximum d'environ 3°C pour les deux journées entre S1 et S4 correspondant à une sensation de légèrement frais (cf. Fig. V.31).

L'adaptation de l'utilisateur de son habillement étend les heures de confort pour les stations S1, S2 et S3 d'où les valeurs de la mPET se situent entre 18.9 et 19.8°C . L'ambiance reste toujours fraîche en S1 avec une valeur de mPET (15.9°C), (cf. Fig. V.32).

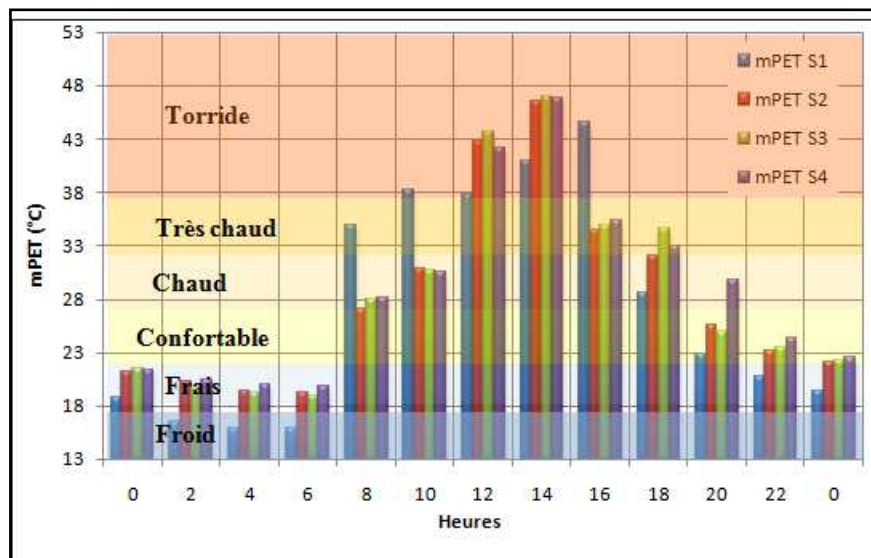


Fig. V.32 : Variations de la mPet dans la zone centrale des stations simulées pour le 21/06 (Auteur).

Ceci dit que ces géométries moyennement fermées au ciel offre des conditions de confort thermique acceptables en période nocturne.

L'adaptation de l'usager diminue le niveau de stress thermique mais sans atteindre le confort. Les valeurs de la mPET se situent entre 13.2 -16.2°C (Fig. V.32, 30).

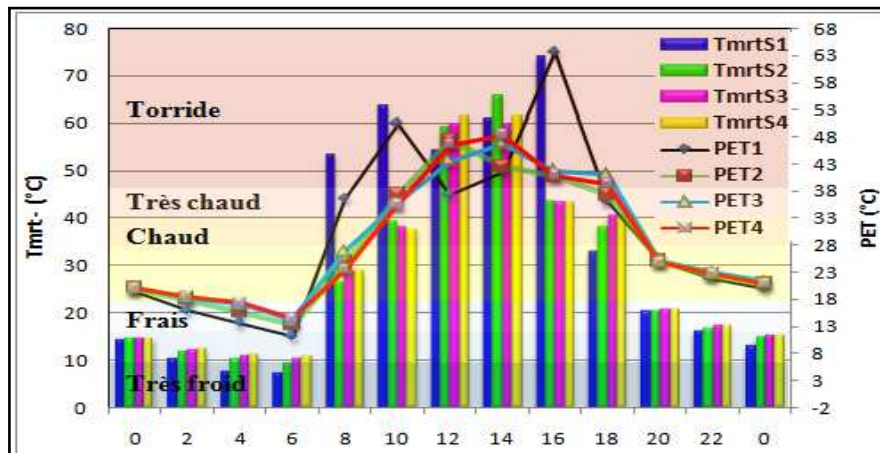


Fig. V.33 : Variations de la Tmrt et la PET dans la zone centrale des stations simulées pour le 26 /06 (Auteur).

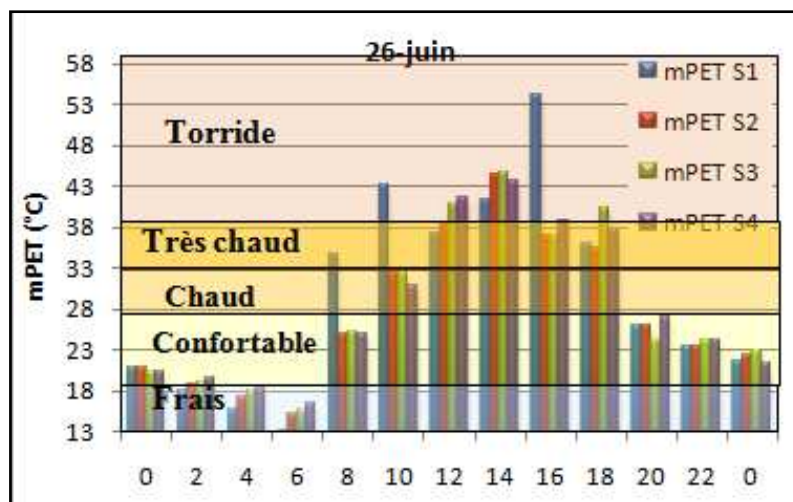


Fig. V.34 : Variations de la mPET dans la zone centrale des stations simulées pour le 26 /06 (Auteur).

A 8h la Tmrt croit rapidement en S₁ qui enregistre un écart de 26.6 °C avec les autres stations. Plus profondes, leurs centres sont encore à l'ombre. Elle culmine à 16h avec une valeur de 70.1°C (73.8°C pour le jour caniculaire) soit un accroissement de 58.3°C (66.4 °C pour la journée du 26 / 06).

Cet accroissement ne s'amorce dans les trois autres stations qu'à partir de 10h pour atteindre son maximum à 14h (cf. **Fig. V.31, 33**), conséquence d'un piégeage du rayonnement infrarouge assez important à partir de 13h qui s'amplifie par manque de ventilation efficace, $V = 0$ m/s (De souza,2005, Eliasson,1996).

La valeur de la T_{mrt} est de 66.9°C dans la stations S_4 (accroissement de 54.9°C) soit une différence de 4°C avec S_1 , 66.7°C dans la stations S_3 (accroissement de 54.9°C), 65.7°C dans la stations S_2 (accroissement de 54.6°C).

Pour le jour caniculaire, la plus grande valeur de la T_{mrt} est relevée au niveau de S_3 66.9°C avec pratiquement le même degré d'accroissement que le jour précédent.

La station S_3 enregistre la plus faible valeur vue sa faible ouverture ainsi que sa faible ventilation.

Durant la période critique de 12h -14h (cf. **Fig. V.31 et 33**), la T_{mrt} est plus faible au niveau de S_1 soit 5.5°C (6.9°C pour le 26/6) que les autres stations.

Ce résultat semble contradictoire avec la quantité du rayonnement solaire incident en son centre. Ceci s'explique par le réchauffement différentiel des températures surfaciques et les vitesses du vent plus puissantes que les influences radiatives (**voir supra**). En cette période S_4 atteint une valeur maximum de 48.3°C durant le jour caniculaire correspondant un état d'extrême surchauffe. La comparaison à la valeur maximale de 63.3°C enregistrée par S_1 à 16h avec un vent de 0.7 m/s révèle la capacité des géométries plus profondes à réduire les changements extrêmes dans la sensation thermique (cause de stress).

En cette période de surchauffe, les valeurs de la m_{Pet} enregistrées au centre des espaces affichent un fort stress thermique où les valeurs dépassent les 38°C ceci correspond à une sensation thermique « Torride » d'où la nécessité de se retirer vers les espaces intérieurs ou prévoir des dispositifs d'ombrages comme cela a été déjà déterminé par le diagramme d'Olgay, (cf. **Chap.III**).

Néanmoins les différences en PET entre les zones à l'ombre et au soleil (**Fig. V.35**) sont quasiment réduites à 2.1°C pendant la période de surchauffe pour S_1 par comparaison à 20°C pour les trois autres stations comme trouvé par Berkovic et al., (2012).

Les écarts de m_{PET} à 14h entre les zones à l'ombre et les zones au soleil sont considérables, ils atteignent en S_3 les 15°C à 14h.

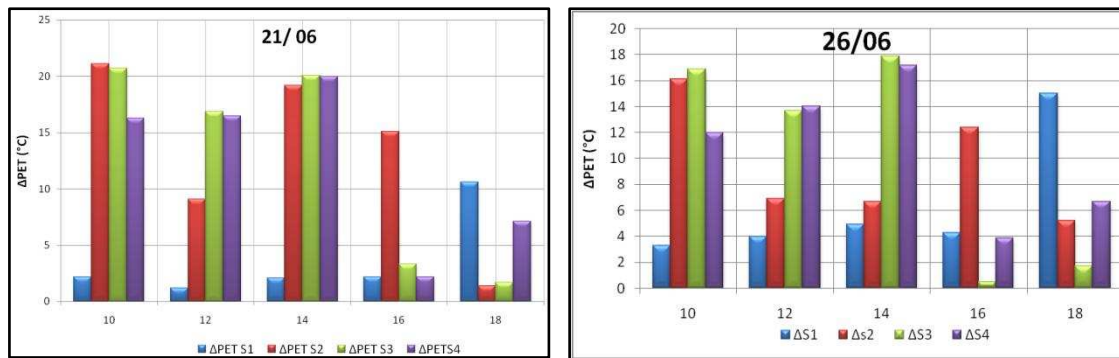


Fig. V.35 : Les écarts de la PET entre les zones à l'ombre et au soleil pour les deux journées d'été simulées (*Auteur*).

Ceci donne de la validité à notre intervalle $0.4 < SVF < 0.5$ pour les espaces extérieurs hiver comme été de par la diversité des ambiances que ces géométries offrent.

Après 14h sous l'effet des ombres, une décroissance rapide est observée atteignant au coucher du soleil 22,25.7, 27.7 et 40.8 °C au niveau de S2, S3, S4 et S1 par comparaison à leurs sommums, faisant passer la sensation thermique dans les stations d'extrêmement chaud à confortable. Ceci illustre la capacité de l'ombre à diminuer la T_{mrt} et le refroidissement rapide des géométries grandes ouvertes au ciel même par manque de ventilation.

Pour la période nocturne, la corrélation entre le SVF et la PET négative pour les deux journées est très forte, $R^2 = 99\%$. En période diurne cette corrélation redevient positive avec une valeur de 60%.

V- 7- Orientation Nord ouest-Sud est

L'inclinaison de l'axe d'orientation d'une place d'une forme rectangulaire d'un angle ϑ compris dans l'intervalle $0^\circ \leq \vartheta \leq 15^\circ$ permet de réduire le temps d'ensoleillement en été et également augmente la surface ensoleillée en hiver.

Pour vérifier ce résultat, une comparaison avec une place d'orientation N-S est effectuée pour la journée ensoleillée d'hiver (23/12) et la journée caniculaire (26/06).

✚ En saison hivernale pour un 23/12, la sensation thermique dans le centre des stations S2, S3 et S4 passe entre 12- 14h d'un niveau de sensation " Chaud" (28_33°C) en orientation N-S à un niveau supérieur qui va jusqu'à l'inconfort du à un stress thermique élevé « " torride " compris entre " 38 et 48°C" (cf. Fig . V. 36). Ceci rend

cette orientation bénéfique pour la longue saison hivernale où les besoins en chaleur sont requis aussi bien dans les espaces extérieurs qu'intérieurs.

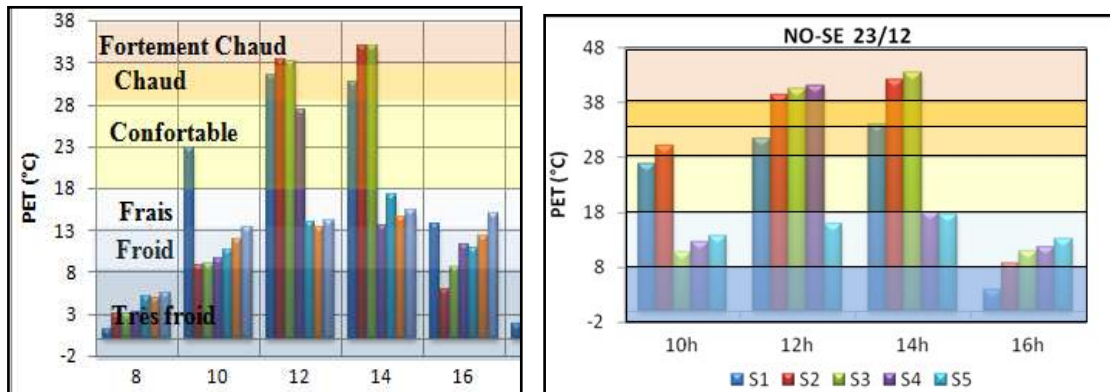


Fig. V.36 : Comparaison du confort thermique dans une place d'orientation N-S et une autre d'orientation NO-SE (15°) pour la saison hivernale (*Auteur*).

✚ En saison estivale, pour une journée caniculaire 26/06, la sensation thermique dans les centres des stations S2, S3 et S4 passe entre 10 - 16h d'un niveau de sensation "torride" (38- 48°C) en orientation N-S à un niveau inférieur "très chaud" compris entre "33 et 38°C" et en deçà à 18h (cf. **Fig. V.37**) en orientation NO-SE. Ceci va allonger le temps de pratique de l'espace et rend compte des bénéfices sur le refroidissement des bâtiments attenants.

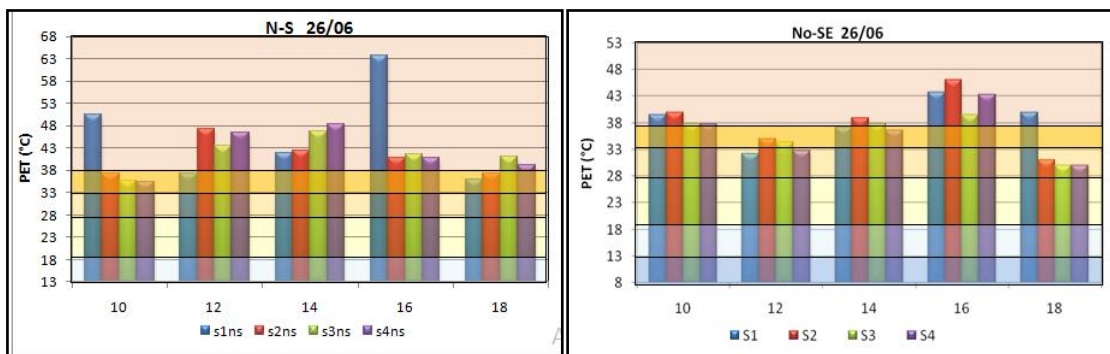


Fig. V.37 : comparaison du confort thermique dans une place d'orientation N-S et une autre d'orientation No-Se (15°) pour la saison estivale (*Auteur*).

V. 8. Evaluation de la consommation énergétique

Pour répondre à notre première hypothèse : *hiver comme été la combinaison confort extérieur et économie d'énergie et possible le choix judicieux des géométries des espaces publics ouverts aux abords des bâtiments*, une évaluation de la consommation

en énergie annuelle est effectuée par le logiciel TRNSYS 17 en utilisant les données d'une année type (TMY) fournies par le logiciel Météonorme avec une température de consigne de 26°C pour la climatisation et 21°C pour le chauffage.

Ces espaces sont considérés sans ouvertures pour évaluer uniquement l'effet de la géométrie et d'éviter les disparités quant à l'exposition des parois transparentes.

Les résultats affichés sur les graphiques de la **figure. V.38** sont la moyenne de chaque étage formé des quatre barres entourant la place.

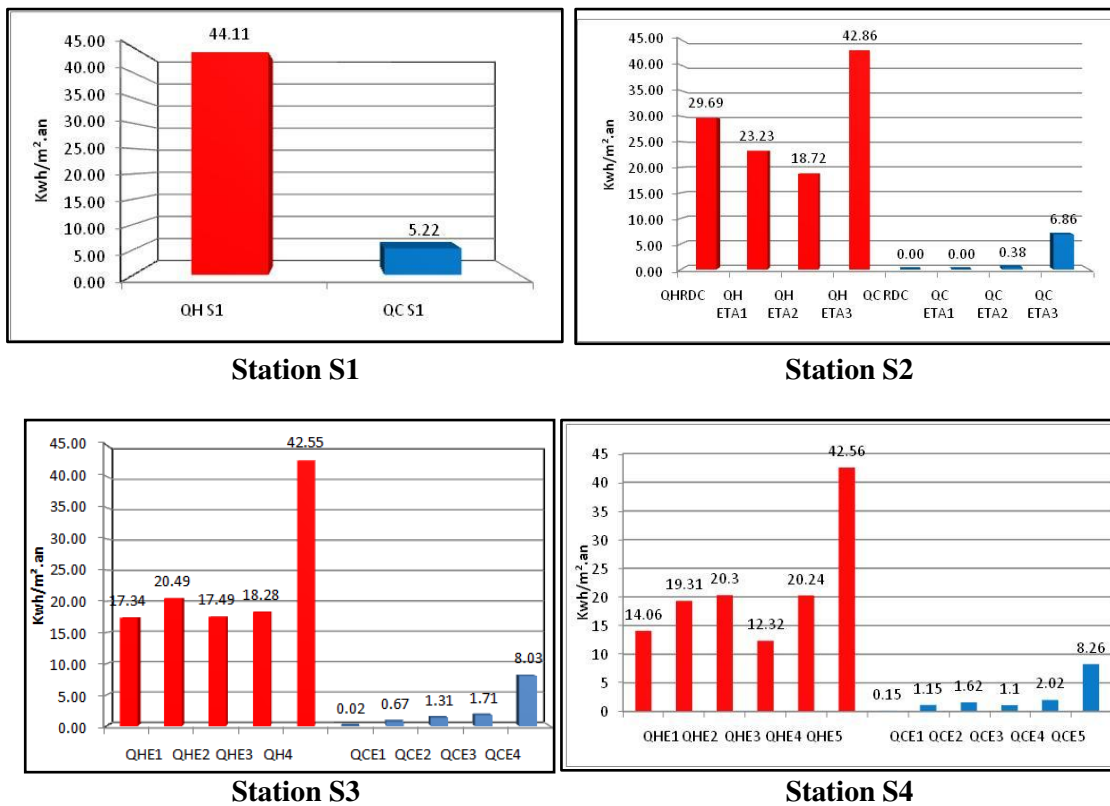


Fig . V.38 : Graphiques pour les besoins en énergie des quatre stations (*Auteur*).

L'examen de ces graphiques révèle que l'étage supérieur ne bénéficie pas de l'effet de la géométrie, il est soumis à un stockage et des déperditions de chaleurs plus que les autres niveaux, tel est le cas de la station S1.

Pour ces derniers, les besoins en chauffages diminuent à fur et à mesure que l'espace s'approfondit dû à des déperditions moindres en hiver. Ceci s'interprètent par des besoins en climatisation en stations S3 et S4 supérieur à ceux de S2 (**cf. Fig. V.38**).

Mais ce qui est à remarquer que la demande en chauffage en hiver est compensée par une demande en climatisation insignifiante en été.

Quand on évite les extrêmes les étages intermédiaires affichent des besoins en chauffage inversement proportionnels au nombre d'étage et une climatisation qui augmente avec le nombre d'étage. Les deux stations **S3** et **S4** présentent les meilleures performances. Ceci valide nos résultats quant à l'intervalle dégagé et valide notre hypothèse sus-citée.

Une évaluation plus fine de l'incidence de la place sur la consommation énergétique des bâtiments aux alentours en divisant chaque barre par zone intérieure à la cour et zone extérieure à la cour (int cour / ext cour) (**Fig . V.39**)

Si le comportement de la station S1 est pareil à celui d'un bâtiment isolé pour la zone Nord (sud de la place), ses besoins en chauffage pour la zone sud intérieure se trouvent augmentés à cause de l'ombrage causé par les barres (les ailes) Est et Ouest qui masquent le soleil. Ces deux ailes peuvent provoquées la surchauffe due à un effet de double dièdre et les multi- réflexions qu'ils engendrent.

Donc la demande en chauffage est causée par la zone sur cour aux températures surfaciques verticales plus faibles que leur opposées. La saisie des températures des parois, depuis les outputs d'Envimet en période hivernal au niveau Rez-de chaussée. pour chaque orientation confirme cette conclusion (**cf. Fig . V. 40**).

Conclusion

La géométrie urbaine est en discordance quant aux niveaux de confort thermiques saisonniers : avec une demande de compacité à la fois en été pour se protéger du soleil et empêcher la surchauffe et une demande d'ouverture en hiver pour garantir une exposition aux rayons solaires et une énergie gratuite pour lutter contre le froid.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer des indicateurs géométriques et tridimensionnels pour notre champs d'investigation "les places urbaines" qui nous permettrons d'estimer l'ambiance thermique en leur sein et de dégager des recommandations quant à la conception des places utiles pour les architectes et les urbanistes.

En supposant des conditions d'exposition solaire raisonnables de l'espace ouvert hiver comme été, des formes quadrilatères et circulaires ont été simulés.

Des marges des rapports géométriques entre les trois dimensions de la place ont été définies selon le degré d'exposition, en surface ou en durée, désirée.

L'orientation nord- sud où qui dévie du nord de 15° a été identifiée comme orientation

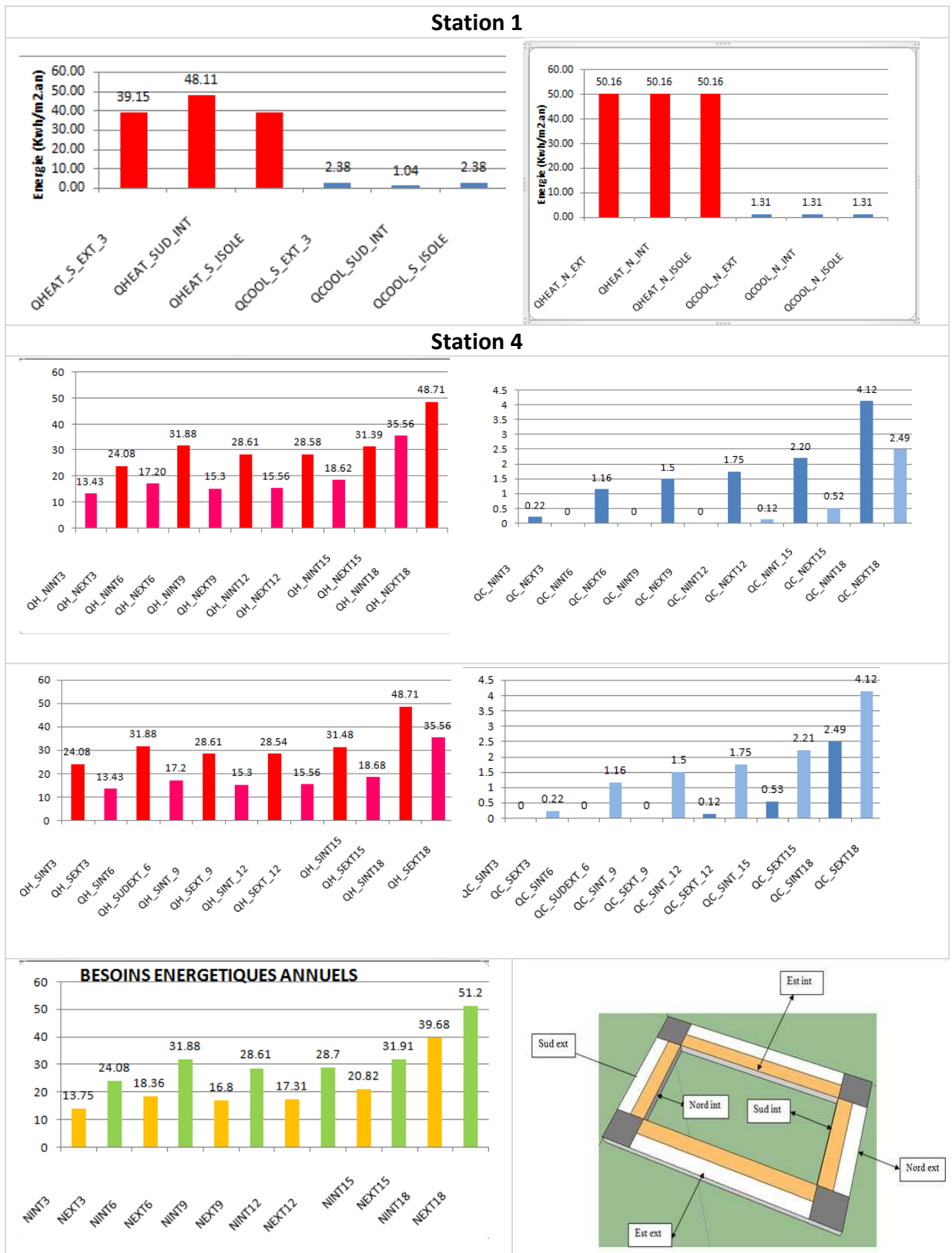


Fig. V. 39 : Graphiques pour les besoins en énergie exprimés en KWH/m² pour les orientations sur la place et les orientations à l'extérieur. (Auteur).

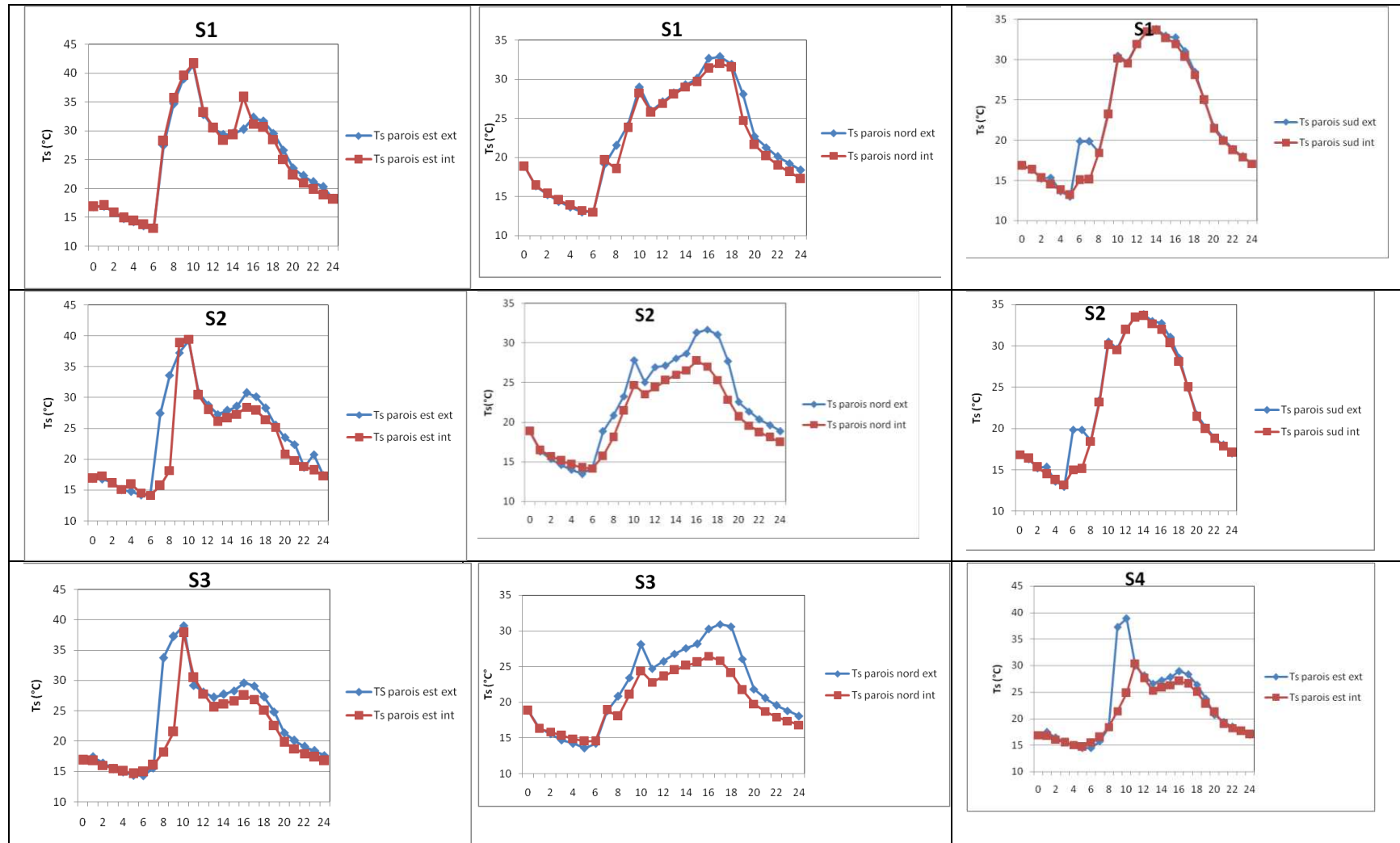


Fig. V. 40 : Graphiques de comparaison des températures des parois selon leur orientation sur la place ou extérieur à la place (Auteur).

optimale.

Les deux indicateurs géométriques H/W et SVF se sont avérés insuffisants pour prédire ou expliquer à eux seuls le comportement thermique des places.

La comparaison des environnements thermiques des géométries dégagées, moyennement profondes, avec l'environnement thermique fourni par un espace urbain peu profond, a établi que les espaces moyennement profonds sont efficaces pour garantir de bons niveaux de confort thermique en hiver. Cependant, ce serait difficile d'offrir un confort thermique optimal en été pendant la période de surchauffe. Néanmoins, le confort thermique offert par la diversité des tâches d'ombre et de soleil sur l'espace garanti sa fréquentation même en périodes critiques pour le confort humain. Ces espaces exposés à la surchauffe d'été ne sont efficace qu'avec une bonne ventilation de l'espace ceci confirme notre deuxième hypothèse, qui non seulement affecte le confort humain mais aussi la consommation énergétique des bâtiments aux alentours. Une durée thermiquement confortable pourrait être sensiblement augmentée une fois que la performance de l'espace est optimisée par la porosité au vent et des solutions dynamiques telles que les arbres, des jets et bassins d'eau comme il a été prouvé par plusieurs recherches à travers le monde (**cf.chap.II**).

Chapitre VI:

Investigation in situ optimisation et validation

"..... le vent tend à diversifier à l'infini les microclimats suivant que les bâtiments jouent le rôle de paravent vis-à-vis de certaines zones ou créent au contraire des sortes de canalisations où le vent s'engouffre, réduisant ainsi à néant tous les montages d'une bonne exposition solaire."

Auzelle .R (1950)

Introduction

Les conditions microclimatiques sont une composante essentielle pour la vie ou la mort d'un espace urbain. Les recherches dans le monde s'y focalisent afin de promouvoir la vie sociale, prolonger la durée de leur praticabilité, mesurer leur impact sur les conditions de confort intérieur et d'une façon générale améliorer le climat urbain.

Dans le chapitre précédent, on a dégagé des indicateurs géométriques en réponse à nos objectifs de l'étude. Ces indicateurs ont été projetés numériquement sur les places de la nouvelle ville Ali Mendjeli pour prouver de leur validité quand au confort thermique du piéton et de l'habitant.

Dans ce chapitre, on va essayer d'optimiser les géométries des stations précédentes pour un meilleur ensoleillement et meilleure ventilation. Puis on se rapprochera plus du contexte urbain par l'analyse des données de la campagne de mesures et la comparaison des résultats avec ceux de la simulation.

VI.1. Optimisation de l'inégale répartition de l'ensoleillement sur la place :

Le confort thermique sur une place d'orientation nord- sud est inégalement réparti :

- une zone nord très ensoleillée qui peut être source de surchauffe même en hiver due à un effet de double dièdre (**cf.chap.V**).
- Une zone sud toujours à l'ombre aux conditions thermiques très froides (**cf. Fig. VI.1**).

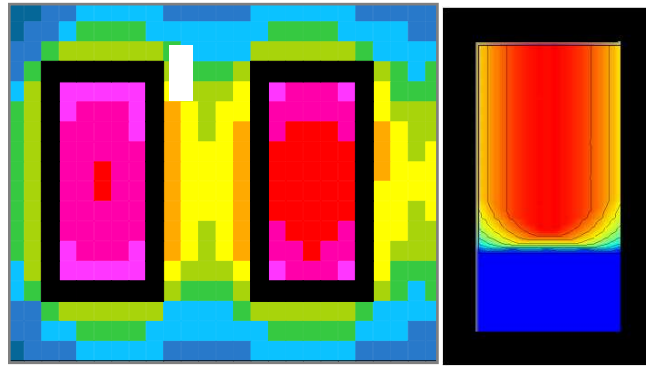


Fig. VI.1 : Conditions thermiques dans les cours (*Auteur*).

En utilisant le diagramme stéréographique additionné de la course solaire, on pourrait "sculpter" les hauteurs des bâtiments selon la course solaire annuelle désirée sans perdre de vue les intervalles dégagés préalablement.

En utilisant les résultats pour le rapport $H/W = 0.6$ des bâtiments plus élevés peuvent être édifiés au nord pour soustraire le soleil d'été, diminuer la hauteur des bâtiments au sud pour permettre une meilleure pénétration des rayons solaires durant la période froide.

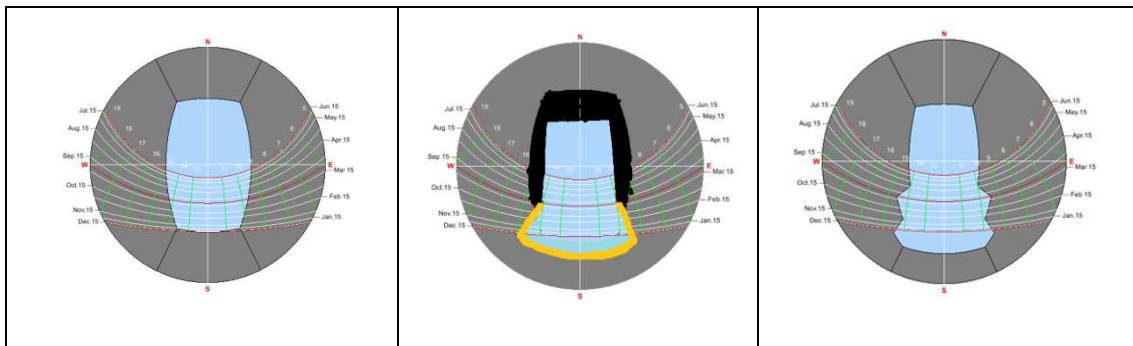
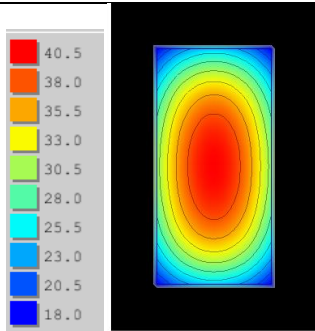
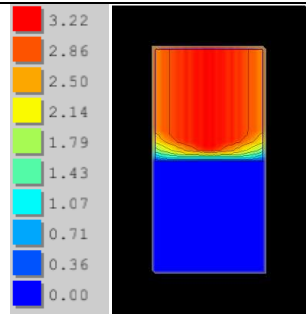
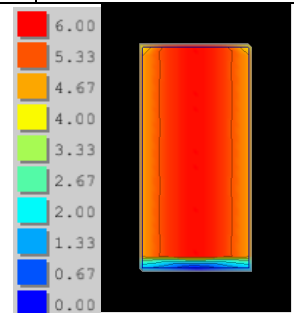
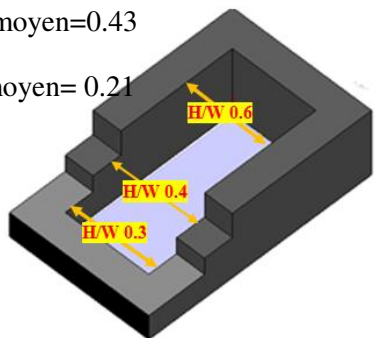
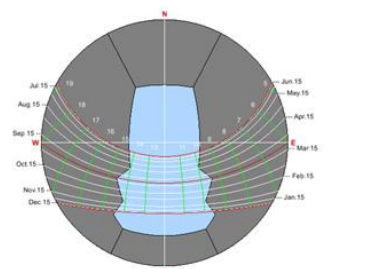
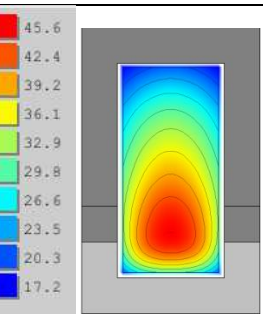
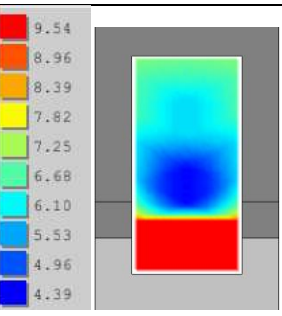
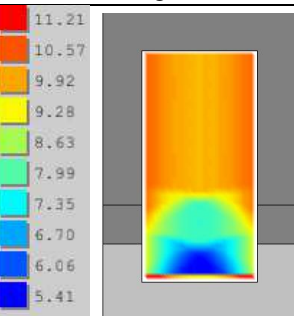
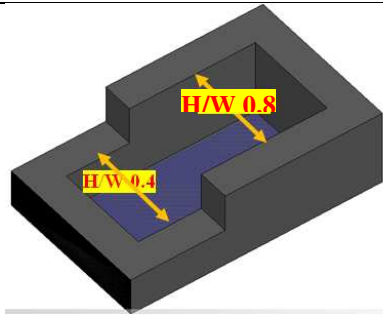
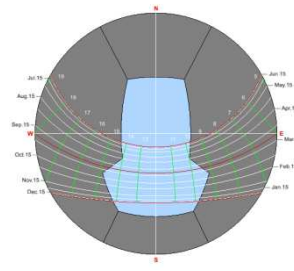


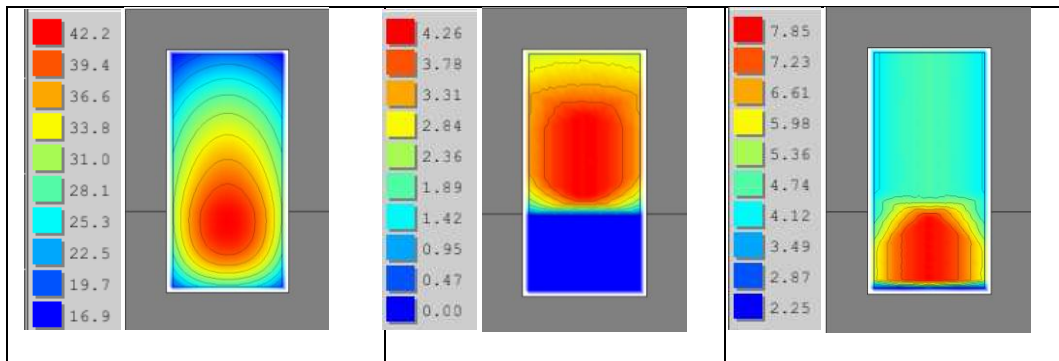
Fig.VI.2 : Amélioration des conditions d'ensoleillement par l'action sur la course solaire (*Auteur*).

Le logiciel Townscope est utilisé pour définir la (ou les) variante qui répondra à nos objectifs.

Les résultats sont récapitulés dans **tableaux VI.I** (sectionné sur plusieurs pages)

Tabl. VI.I : Optimisation de la répartition des tâches solaires sur la surface de la place (Auteur)

Cas de base		
SVF	21 Décembre	21 Juin
		
Géométrie 1		
<p>H/W moyen=0.43 H/L moyen= 0.21</p> 		
SVF	21 Décembre	21 Juin
		
<p>Nette amélioration de l'ensoleillement en zone sud en hiver et sur l'ensemble de la place, qui se traduit par une augmentation de plus de 3h d'ensoleillement en été. Le rapport H/W =3 est quasiment rejeté.</p>		
Géométrie 2		
		
<p>H/w moy = 0.4 et H/L moy = 0.2</p>		

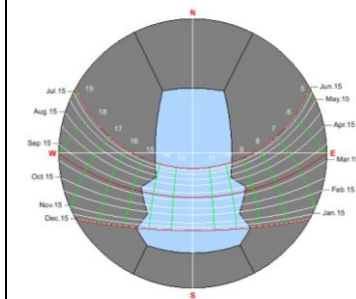
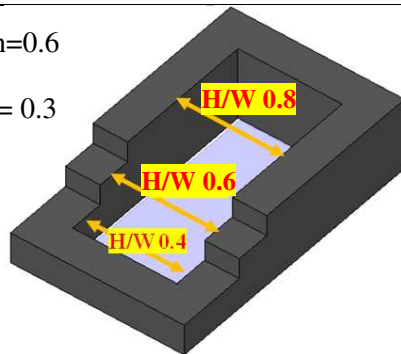


La zone sud demeure ombrée en hiver, et augmente de presque 2h en été donc diminuer la hauteur en zone sud n'est guère la bonne solution.

Géométrie 3

H/W moyen=0.6

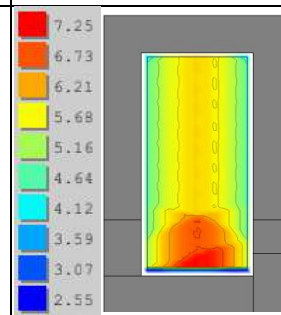
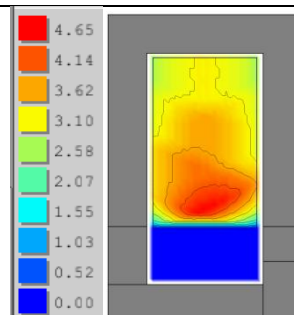
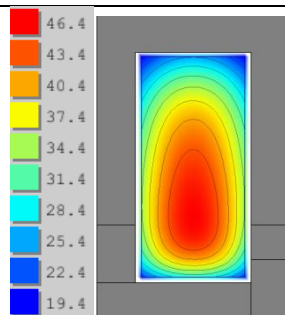
H/L moyen= 0.3



SVF

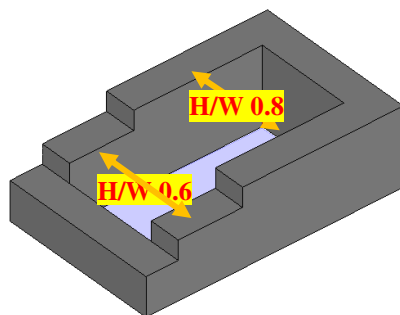
21 Décembre

21 Juin

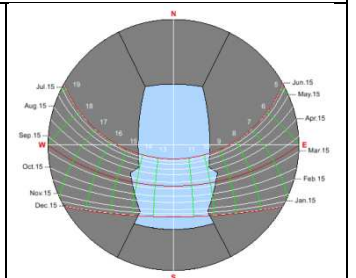


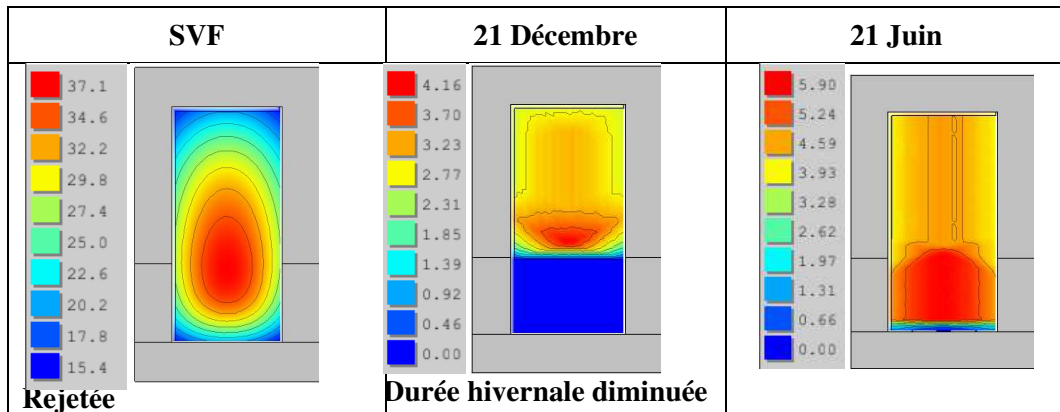
Très bonne amélioration en surface et en durée. La durée additionnelle en été peut être diminuée en plantant des arbres à feuilles persistantes pour diminuer l'inconfort en hiver et maintenir la zone fraîche en été.

Géométrie 4

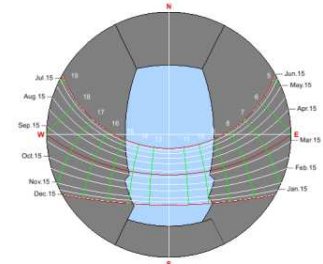
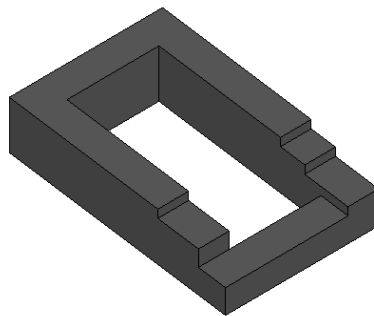


H/W moyen=0.6 H/L moyen= 0.3

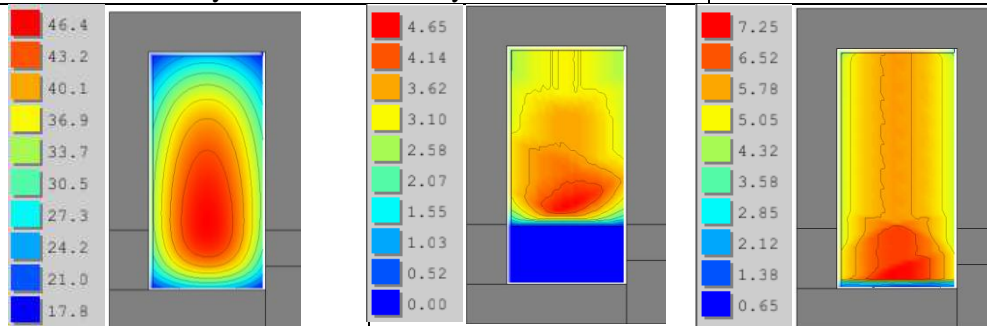




Géométrie 5

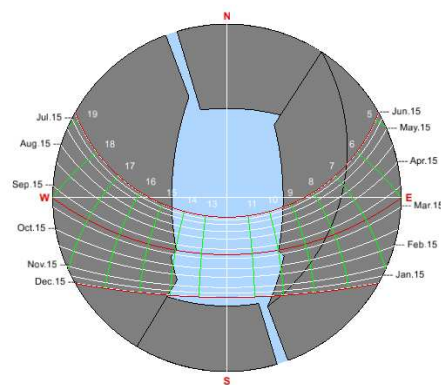
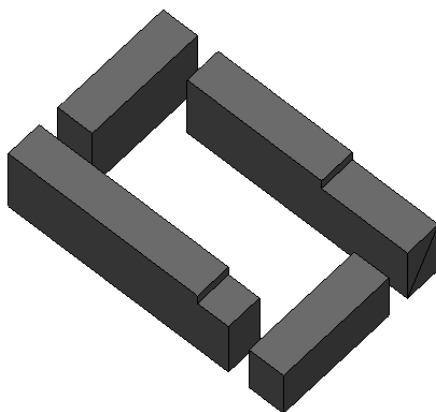


H/W moyen=0.45 H/L moyen=0.22

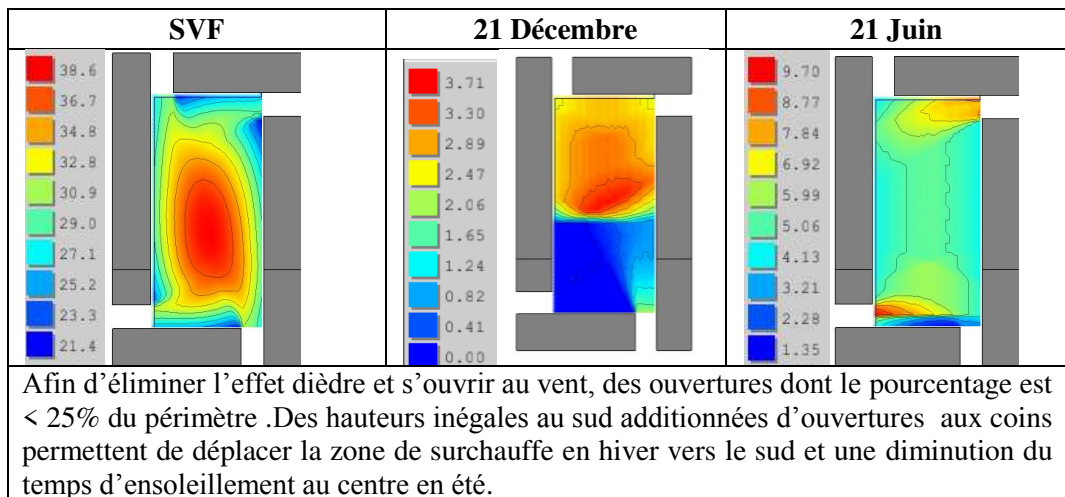


Des hauteurs élevées au nord et inégales au sud .Même conclusion que la géométrie 3. la zone chaude s'est déplacée vers le sud.

Géométrie 6



H/W=0.6 H/L=0.3



Donc en jouant sur la hauteur, et le percement du volume, on pourra obtenir une meilleure répartition des tâches solaires.

VI-2- Optimisation de la ventilation de la place :

Comme on a constaté au **chapitre V**, le vent est pratiquement absent d'une place trop fermée, cause de surchauffe et de confinement d'air.

Pour se rapprocher plus de la réalité, puisque la place est une pièce dans un tissu urbain on essaiera de la situer dans ce tissu avant d'entreprendre des améliorations de son comportement aéraulique où plusieurs configurations s'offrent à nous : ouvertures aux coins, passages couverts, etc .

On situera la place entre 4 voies, deux d'orientation nord sud avec un rapport d'aspect $H/W= 1.2$ et deux autres d'orientation Est -ouest avec un rapport d'aspect $H/W=1$ déterminés selon la littérature (**cf.chap. III**).

Afin de trancher en faveur d'hauteurs inégales entourant la place, ou une hauteur homogène une simulation est effectuée avec le logiciel **Envimet 3.1** pour la journée caniculaire du 26/06.

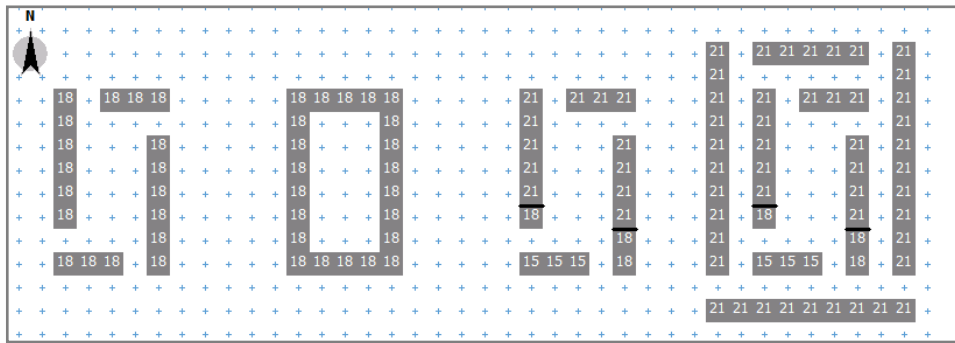


Fig.VI. 3. Géométries simulées en quête d'une ventilation meilleure de la place (Auteur)

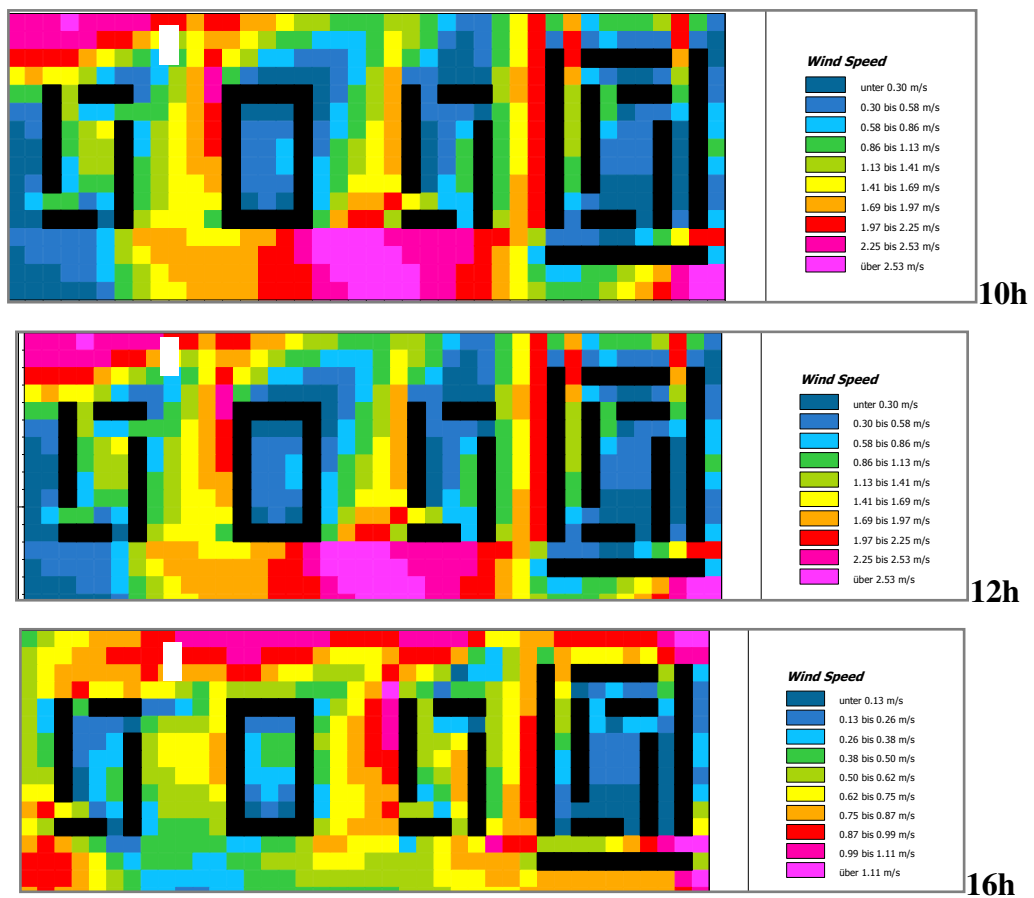


Fig.VI. 4. vitesses du vent dans des places d'hauteurs homogènes et d'hauteurs hétérogènes (Auteur).

L'examen des graphiques de la **figure VI.4** montre que les vitesses du vent sont tantôt en faveur de l'homogénéité et tantôt en faveur de l'hétérogénéité. Ceci dit que pour trancher en faveur d'une géométrie où une autre exige une étude plus pointue pour expliquer ce comportement tant le vent est imprévisible.

Mais ce qu'on peut affirmer que l'insertion de cette pièce dans un tissu urbain diminue

de ses vitesses du vent.

L'examen d'autres combinaisons de configurations indique que le seul moyen efficace de ventiler une place est sa perméabilité.

La perméabilité de la place aux vents peut être réalisée par l'offre de voies de passage pour canaliser le vent en sa direction. (cf. Fig. VI.5)

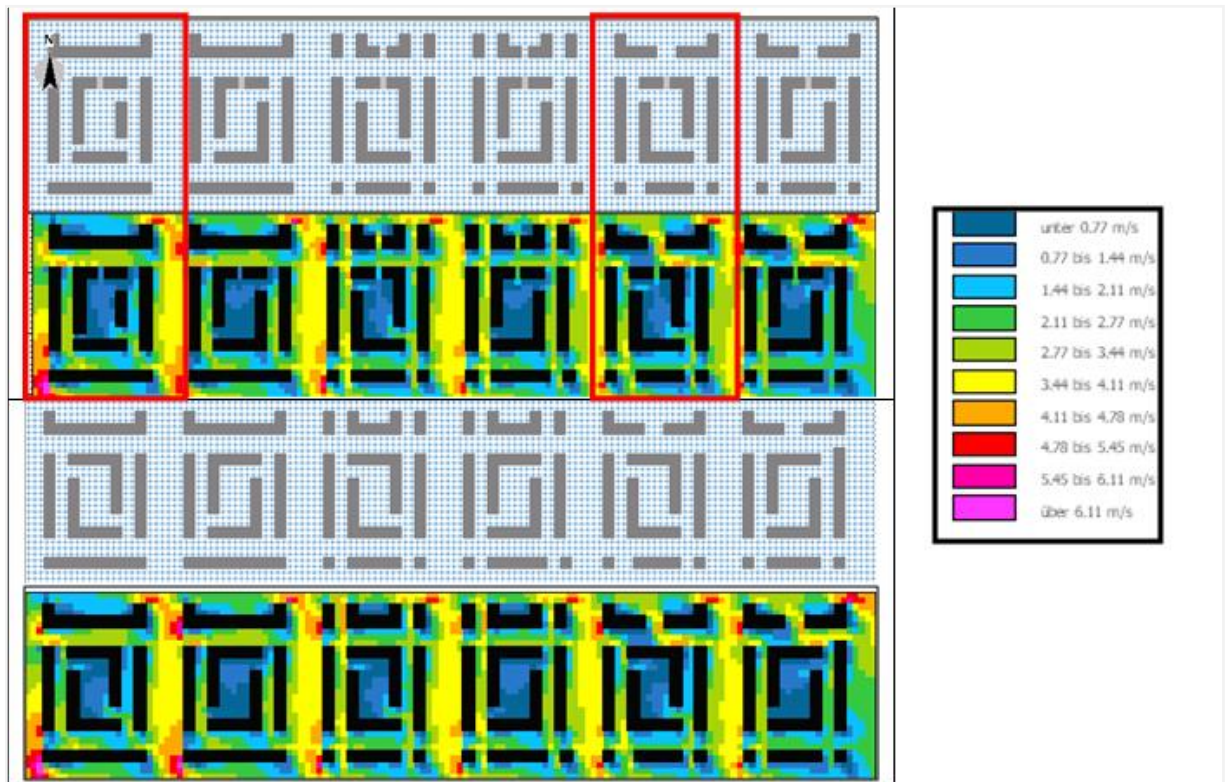


Fig. VI.5 : Examen de la ventilation des places selon différentes configurations (Auteur).

Solution à prendre avec précaution vue les sur-ventilations que cela peut engendrer

D'où la conclusion que l'étude du microclimat d'une place repose essentiellement sur son ensoleillement prévisible, plutôt que de son comportement aérodynamique imprévisible.

VI-3- Investigation

Le volet pratique de ce travail a pour objectif de :

- Mettre en évidence l'influence de la géométrie urbaine sur le microclimat et le confort thermique estivale au niveau des places urbaines.

- Vérifier la concordance des résultats trouvés concernant des géométries jugées optimales pour la combinaison confort thermique extérieur estival et hivernal sous le climat semi aride.
- Vérifier son impact sur le confort thermique intérieur et par extension sur la consommation énergétique pour le chauffage où le refroidissement.

La comparaison des différentes morphologies sera abordée sur la base d'une investigation sur terrain dont le site retenu est la ville nouvelle Ali Mendjeli (cf. **Chap. IV**).

Il faut rappeler les proportions de chaque espace pour valider nos résultats.

Tab. VI.2. Proportions des enclos simulés (*Auteur*).

station	L/W	H/L	H/W	SVF	Forme au plan	Orientation
A	2	0.26	0.55	0.504	Rectangulaire	NO-SE
B	1.03	0.32	0.33	0.514	tend vers le carré	N-S
C	1.18	0.29	/	0.516	Forme en U	NE-SO

Il faut rappeler la marge optimale obtenue :

$$L/W = 2 \text{ avec } 0.4 < H/W \leq 0.6 \text{ et } 0.13 < H/L \leq 0.3$$

D'après les critères dégagés, on s'attend à ce que la station **A** présentera les meilleurs performances contrairement à la station **B**.

VI-3-1- Mise en évidence du phénomène de l'ICU :

La journée du **19/ 7/ 2014** est retenue pour l'étude comparative, puisqu' elle présente un temps clair et vent calme, ainsi que ses précédentes (www.wather data.org), " *cette situation illustre le cas le plus fréquent des forts ICU, avec un renforcement possible de son intensité dû à un emmagasinement calorifique durant plusieurs jours consécutifs de "beau temps" (effet cumulatif). où la chaleur solaire a pu s'accumuler dans les matériaux. Ainsi, à la faveur d'une éclaircie nocturne le différentiel ville/campagne est encore très marqué.*" (Cantat, 2004).

Les valeurs microclimatiques recueillies au niveau des stations de mesures ont été comparées avec les données de la station météorologique de référence, située à l'aéroport local, afin de souligner les différences thermiques entre un secteur urbain et suburbain et prospecter l'existence du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU).

L'observation de la **figure VI.6** illustre en clair les différences de températures de l'air entre les quatre stations et la station météo, parfois dans le sens positif, ceci décèle un ICU diurne ou nocturne comme décrit par les différents chercheurs. Parfois cette différence est négative. Elle met en évidence un îlot de fraîcheur.

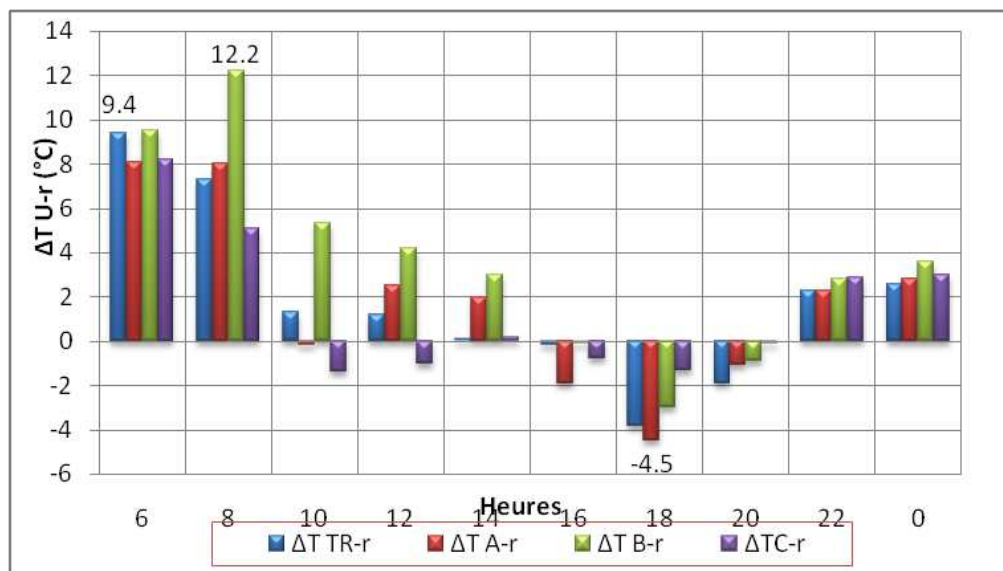


Fig.VI.6. : Ecart de températures entre la station rural (météo) et les stations urbaines pour le 19/07/2014 (Auteur).

Cette différence varie selon la course solaire dans les différentes stations d'où l'on observe 4 phases :

- **6h- 8h** : soit une demi-heure après le lever du soleil (5h 30). En ce moment, dans le site rural, la température de l'air passe par un minimum, une demi-heure après le lever du soleil, car suite à l'obliquité des rayons le bilan radiatif reste négatif durant 0.5 à 1h après le lever du soleil et redevient négatif environ 1h avant son coucher. C'est en ce moment là que l'intensité de l'ICU atteint son maximum.

Les trois stations urbaines baignent encore dans l'ombre (**cf. Fig. VI.7- 9**) et leur bilan radiatif reste encore négatif. De ce fait, elles sont soumises à :

- ✓ L'émissivité de leurs matériaux, car en l'absence des rayons solaires, elle est le facteur prédominant qui détermine leur équilibre thermique (Synneffa et al., 2006).

Les températures des surfaces au sol (TS) sont à leur minimum (**cf. Fig. VI.10**), donc on estime que les matériaux ont restitué toute leur chaleur.

✓ Les vents à l'échelle synoptique où local sont calmes et de vitesse 0 m/s.

Cette situation a induit à un confinement de la chaleur restituée par les minéraux au niveau des espaces ouverts, voire à la l'échelle de la ville. "Car quand les vitesses au dessus des toitures sont inférieures à 4m/s les effets thermiques et mécaniques rendent l'écoulement chaotique. On observe alors la formation des zones non ventilées où la chaleur s'accumule (Santamouris et al., www.leme.ulg.org).

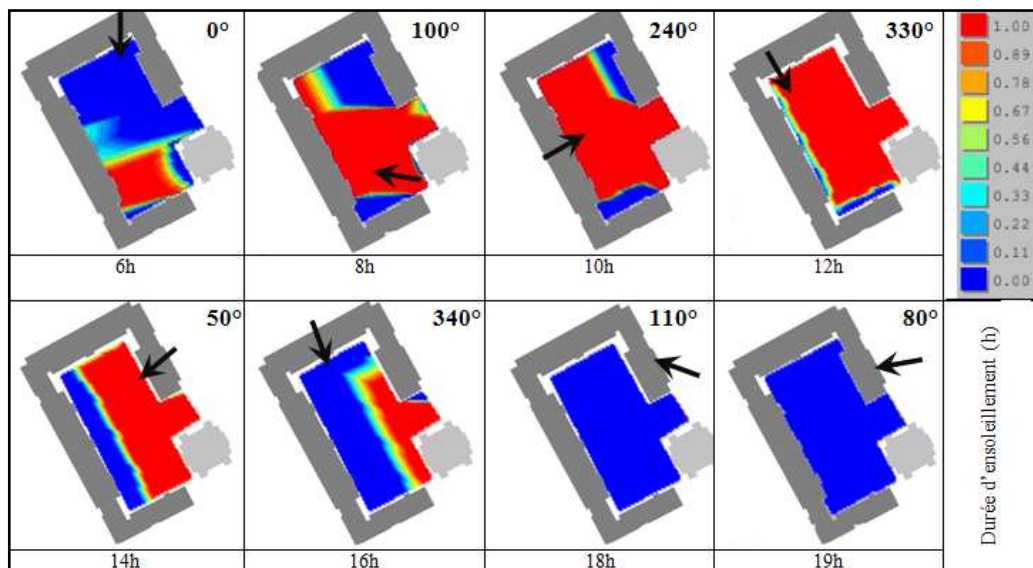


Fig.VI.7 : Evolution de l'ombre dans la station A pour 1e 19/07(Auteur).

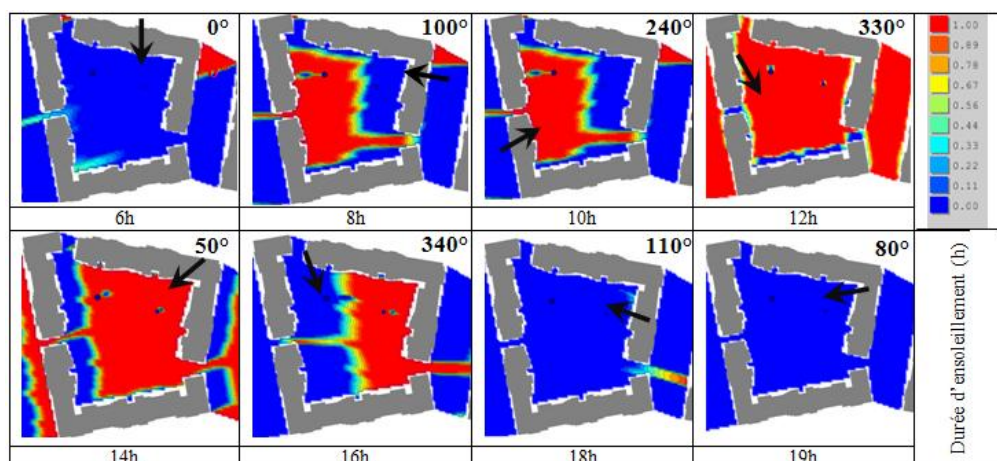


Fig.VI.8: Evolution de l'ombre dans la station B pour 1e 19/07(Auteur).

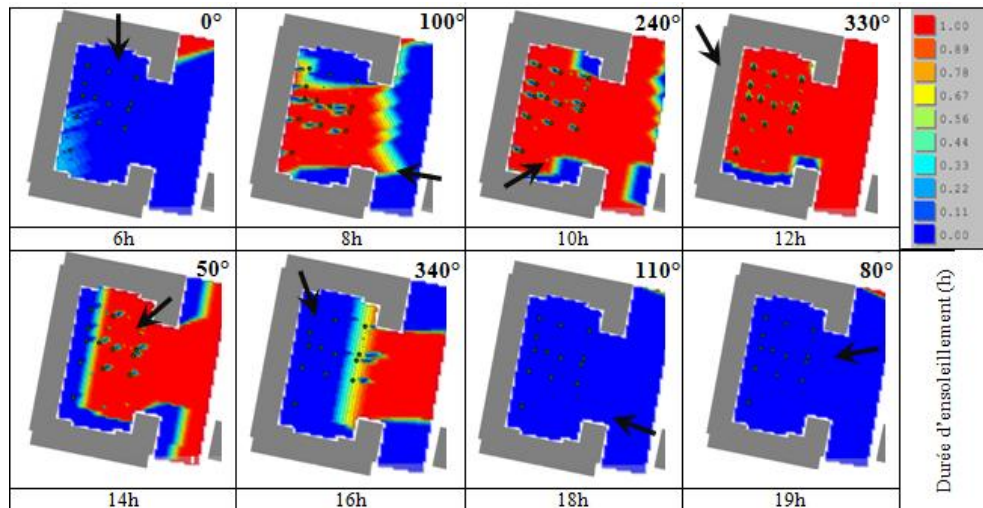


Fig.VI.9: Evolution de l'ombre dans la station C pour le 19/07(Auteur).

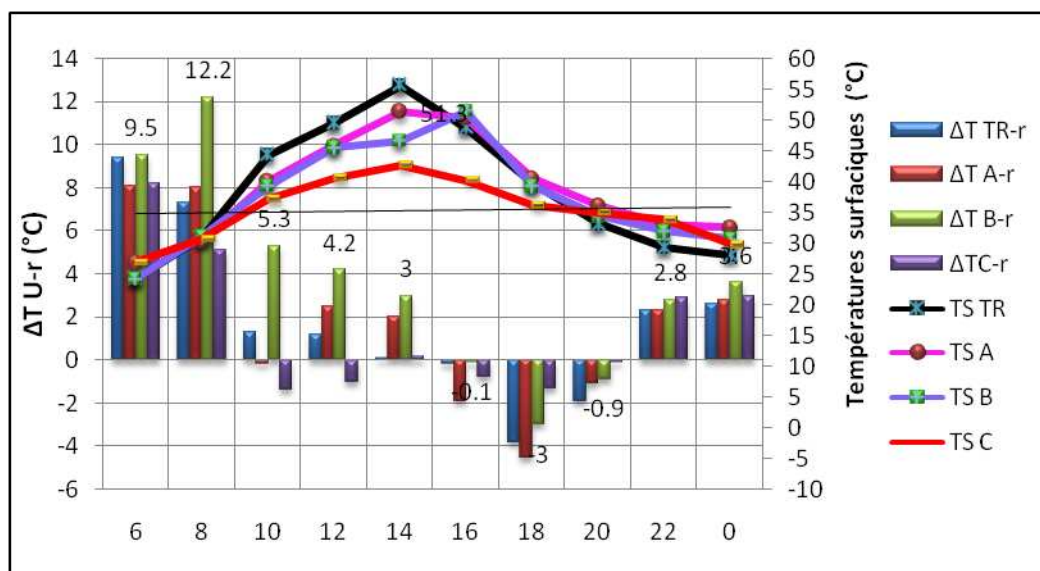


Fig.VI.10 : Comparaison des températures des surfaces au sol aux écarts avec la station rurale pour le 19/07/2014 (Auteur).

Le terrain vague (sol naturel à émissivité 0.91), grand ouvert au ciel, et à tous les vents enregistre une intensité considérable $\Delta T_{TV-r} = 9.4^{\circ}\text{C}$. Cette différence se résorbe à fur et à mesure que les températures de l'air de la station rurale augmentent et les vitesses des vents au niveau de TV augmentent.

Pareils comportements et intensités sont obtenus avec les stations urbaines à revêtement minéral, (asphalte à émissivité 0.90 -95 pour A, et béton de ciment à émissivité 0.71 - .90 pour B et C).

La station **B** enregistre la plus grande intensité, ($\Delta T_{B-r} = 12^\circ\text{C}$), Ceci est le résultat de sa forme géométrique au sol, sa complète fermeture au vent, notamment par ses obstacles proches (cf. chap. IV, p.228). A cela s'ajoutent, les rejets chauds des climatiseurs qui alimentent en plus le flux sensible.

- **De 8h jusqu'à 16h** : période où les trois stations sont vues par le soleil (cf.fig.7-9)

Elles sont soumises à la combinaison des deux phénomènes :

- ✓ thermiques dus au réchauffement du sol et des parois ;
- ✓ aéraulique sous forme de brises locales (mouvements convectifs) dues aux différences de température entre les différentes surfaces minérales et aux différences de pression entre zones à l'ombre et au soleil.

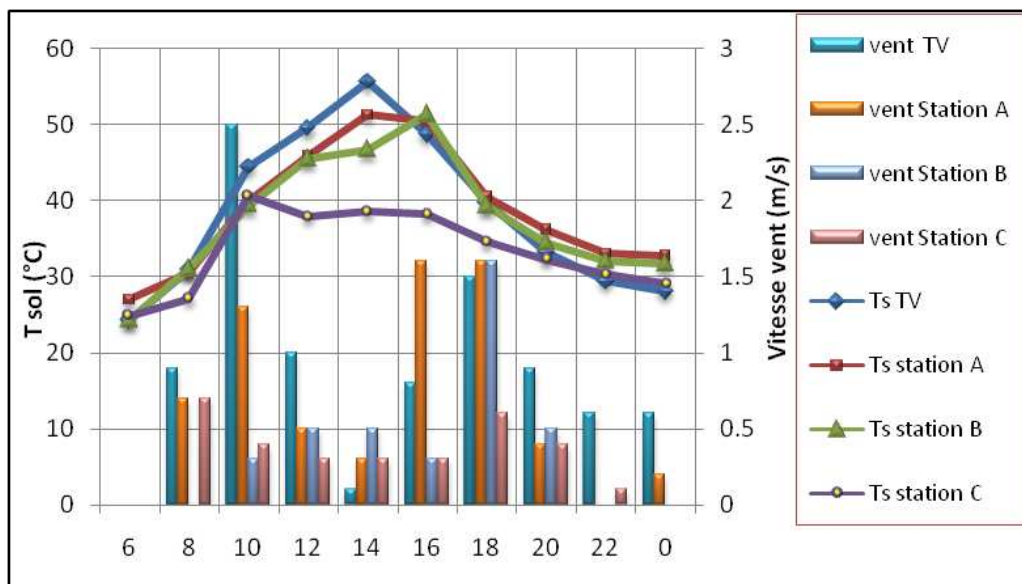


Fig.VI.11. Température de surface (Ts) en fonction des vitesses du vent dans les stations de mesures (*Auteur*).

- ✓ la direction et la vitesse des vents synoptiques et leurs interactions avec les obstacles selon leur rugosité et leurs différentes configurations, D'où la variation spatiale et temporelle des écarts de température entre l'espace urbain et la station météorologique.

L'intensité maximale de l'îlot de chaleur **diurne** est proportionnelle aux températures surfaciques du sol et inversement proportionnelle à la vitesse du vent. Elle se produit lorsque :

✓ Les températures surfaciques sont à leur maximum et les vitesses du vent sont à leur minimum (Escourrou, 1991).

✓ La vitesse des vents d'origine convective favorise une convection rapide avec les surfaces minérales chaudes dont la chaleur sera restituée à l'air d'où l'augmentation de la température de l'air au niveau de l'espace et donc réduction de l'écart ville /campagne.

• A **10h**, la station **B** enregistre la plus grande valeur de l'intensité d'ICU, à cause du cumul de chaleur dû à sa forme au sol, sa faible ventilation et le réchauffement de ses matériaux (cf. **Fig.VI.11**). En cette heure-ci la station **A** voit cette intensité s'annuler sous l'action des vitesses du vent (1,6 m/s) et la station **C** se trouve même plus fraîche ($\Delta T_{C-r} = -1.4^{\circ}\text{C}$) sous l'effet de l'ombre de ses arbres qui atténuent le flux solaire et empêchent le réchauffement rapide de ses surfaces au sol. Ces ombres ont pallié à l'influence de :

- son ouverture vers l'azimut qui réduit l'effet protecteur de sa géométrie (Alcafarado, 2003 ; Andrade, 2000)

- ses faibles vitesses de vent qui ne dépassent pas les 0.4 m/s.

Les valeurs de l'intensité maximale 5.5°C , 2.5°C et 1.3°C (cf. **Fig.VI.6**) sont obtenues pour respectivement les stations **B**, **A** et **TV (terrain vague)**.

Toutefois, la station **A** (au point central de mesure) se trouve encore plus chaude que le terrain vague à cause de son revêtement en asphalte, son ouverture vers l'azimut en plus elle est sujette aux multi-réflexions de ses parois transversales (cf. **annexe C**) accentuées par sa peinture blanche.

• **16h- 18h** : Les températures de l'air dans les trois espaces baissent à cause des projections de l'ombre sous l'effet de leur géométrie, et des mouvements d'air dus au réchauffement différentiel entre les différentes surfaces. L'écart devient considérable plus en se rapproche du coucher du soleil. Elles se retrouvent encore plus fraîches que le rural (-4.5°C et 1.6m/s) pour la station **A** et (-3°C , 1.6m/s) pour la station **B**.

Il est à noter que l'espace végétalisé enregistre la plus grande intensité car ses températures de l'air baissent plus lentement que les trois autres espaces vu l'obstruction du ciel par la canopée des arbres.

• **18 h- 00h** : l'écart devient considérable plus en se rapproche du coucher du soleil. Car l'air "*juste avant ou peu après le coucher du soleil l'air au voisinage du sol se refroidit rapidement*" (vaillant ,1979) la station rurale voit ces températures de l'air diminuer rapidement alors que celles des stations urbaines augmentent alimentées par le flux énergétiques des surfaces minérales qui se refroidissent.

Ceci fait que le cycle récurrent de l'ICU nocturne se déclenche. La station **B** enregistre la plus grande valeur à 00h (2.8°C, 0.6 m/s).

Donc on peut conclure que même pour un espace très ouvert dans la ville d'Ali Mendjeli dont le SVF =1, de surface au sol naturelle et par vent calme l'ICU existe puisque le bilan général est alimenté par le flux sensible de la ville.

L'intensité de l'ICU, alimentée par les températures des surfaces minérales se minimise sous l'effet de l'augmentation des vitesses d'écoulement du vent.

Tous ceci nous mène à conclure que "*l'îlot de chaleur urbain à l'échelle microclimatique est le résultat de la morphologie des bâtiments soit le mode d'occupation au sol et leur géométrie en intervenant sur les écoulements d'air par la diminution de leurs vitesses et en accentuant leurs turbulences.*" (Böhm , 2004)

Donc La ventilation urbaine est un bon moyen de lutter contre les îlots de chaleur urbains.

VI-3-2-Comparaison des paramètres microclimatiques dans les stations de mesures

Par la comparaison des quatre courbes des variations des températures de l'air dans les quatre stations de mesures, il est possible de constater une tendance de deux phases : avant 14h et après 14h. (cf. Fig.VI.12.):

A 6h, les vents sont complètement calmes, le comportement des températures de l'air est plutôt contradictoire. La station **TR** à plus grande ouverture au ciel (SVF 1) affiche la plus grande valeur de 27,4 °C au même titre que la station **B** (27.2°C) fermée au vent et sujette aux rejets anthropiques comme il a été déjà mentionné plus haut.

La station **A et C** ont enregistré une valeur de 26.1 et 26,2°C respectivement, soit une différence de -1.3 °C avec la station **TR**. Ces résultats ne trouvent d'explication que dans les valeurs des températures surfaciques, où les plus faibles sont enregistrées au niveau de **TR et B** (24.3°C). La restitution de la chaleur de leurs matériaux de surfaces

horizontales était plus rapide à leur niveau, mais l'absence de ventilation n'a fait que confiner l'air chaud.

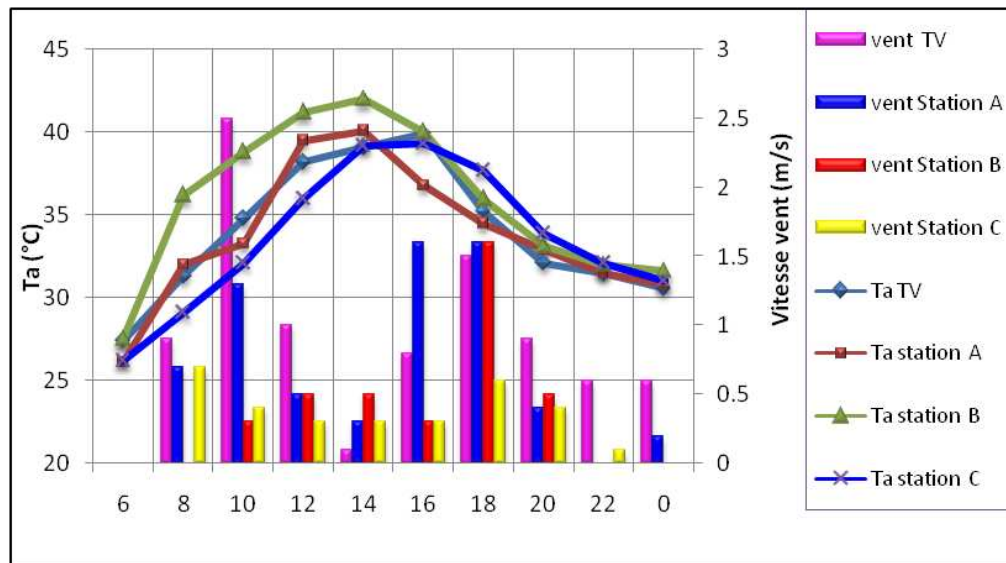


Fig.VI. 12- Température de l'air (Ta) en fonction des vitesses du vent dans les stations de mesures 19/07/2014 (Auteur).

Au delà de **6h** à **14h**, la station **B** enregistre les plus hautes températures de l'air jusqu'à culminer à 42°C , plus chaude que le terrain vague (41.2°C).

L'angle d'attaque des vents est perpendiculaire à son axe d'orientation (cf. Fig. VI .8), d'où une convection turbulente avec cumul de chaleur.

Elle ne commence à se refroidir qu'à partir de 16h ou les vents sont canalisés en son centre (angle d'attaque 0°C).

La station **C** d'orientation NE-SO dont l'ensoleillement est principalement l'après midi se trouve encore protégée par ses arbres malgré sa grande ouverture vers l'azimut. Elle enregistre les plus basses températures et culmine à 14h avec 39.2°C .

La station **A** d'orientation NO-SE dont l'ensoleillement est principalement le matin se trouve plus chaude que le terrain vague à cause de sa perte de protection par les ombres des bâtiments due aussi à une ouverture vers l'orientation Est. Elle culmine avec 40.1°C . Ses températures baissent dès que l'ombre commence à se déployer sur ses surfaces horizontales et le déclenchement de la convection entre zones à l'ombre et zones au soleil ($V=1.6\text{ m/s}$). Elle se trouve la plus fraîche. Ses températures baissent d'environ 7°C en deux heures de temps. D'où la validité de nos conclusions quant à l'orientation préférentielle des espaces urbains des pays chauds vers le NO-SE.

L'inverse est vrai pour la station **C** d'orientation opposée dont la ventilation est compromise par la présence d'arbres.

Les températures surfaciques se confondent presque pour les deux stations **A** (max 51.3°C et B max 51.4°C).

Les températures du sol en **C** sont plus stables (max 38°C). L'écart est de 13°C avec **A** et **B**. D'où l'intérêt de masquer les surfaces minérales avec des dispositifs d'ombrages naturels ou artificiels pour éviter leur surchauffe comme prouvé par plusieurs chercheurs (cf. chap. II).

VI-3-3- Evaluation du confort thermique dans les stations de mesures

L'examen des résultats de la **figure VI.13** révèle une même logique de variation des températures moyennes radiantés (**Tmrt**), issue de la modélisation par **Envimet 3.1**, que celle des températures au sol mais la corrélation se trouve trop faible ($R^2 = 0.22$) due à un réchauffement différentiel entre l'asphalte et le béton de ciment d'une part, le réchauffement des surfaces exposées au soleil ou sous l'ombre, les multi-réflexions en **A** ainsi que les différences en convection.

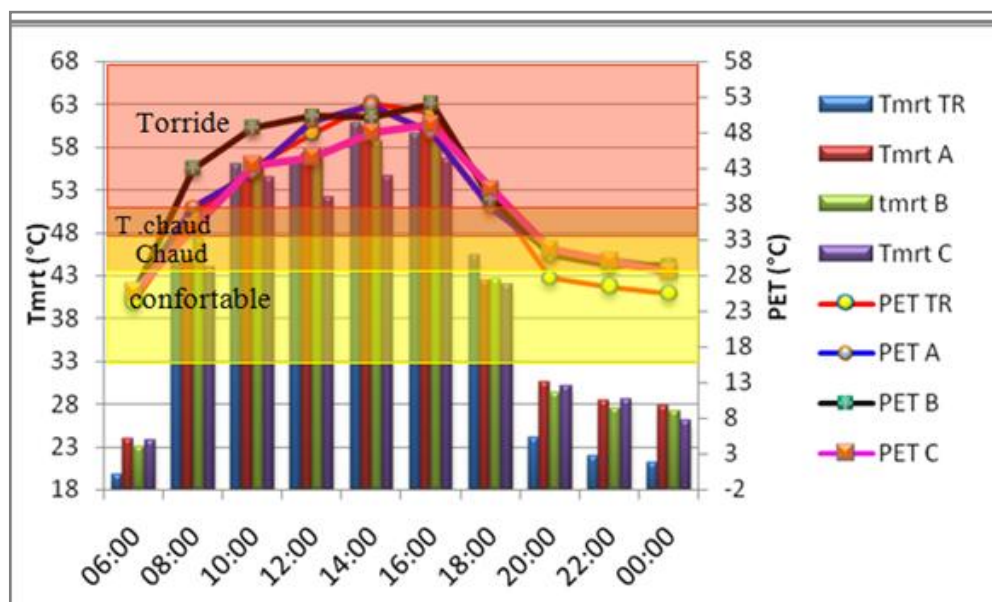


Fig. VI.13 : Variations de la Tmrt et la PET dans les stations de mesures le 19/07/2014 (Auteur).

Les résultats ont montré également une faible corrélation négative ($R^2 = 0.36$) entre le SVF et la Tmrt. Les écarts de la Tmrt entre les quatre stations sont très faibles d'où l'on enregistre le plus grand écart à 16h soit 5°C entre **B** et **C**.

Une corrélation positive assez significative ($R^2 = 0.70$) est enregistrée entre la Tmrt et la PET.

La valeur minimale de la PET obtenue à 6h dans les trois stations urbaines est de 25°C correspondant à une sensation de confort.

De 8h à 16h la sensation thermique varie de **Très chaud** à **torride** où elle culmine à 51.8°C en **A** (couverture en asphalte).

La station **C** en présence d'arbres enregistre une moyenne d'environ 42°C mais la sensation thermique demeure la même. D'où l'intérêt de ce protéger dans les intérieurs plus frais comme indiqué dans l'étude bioclimatique (cf. **Chap. IV**).

Les écarts entre zone à l'ombre et zone au soleil sont pratiquement nuls la matinée, mais demeurent assez significatifs pour les stations **A** et **C** à partir de 14h. Ils atteignent 7°C à 16h en **A**.

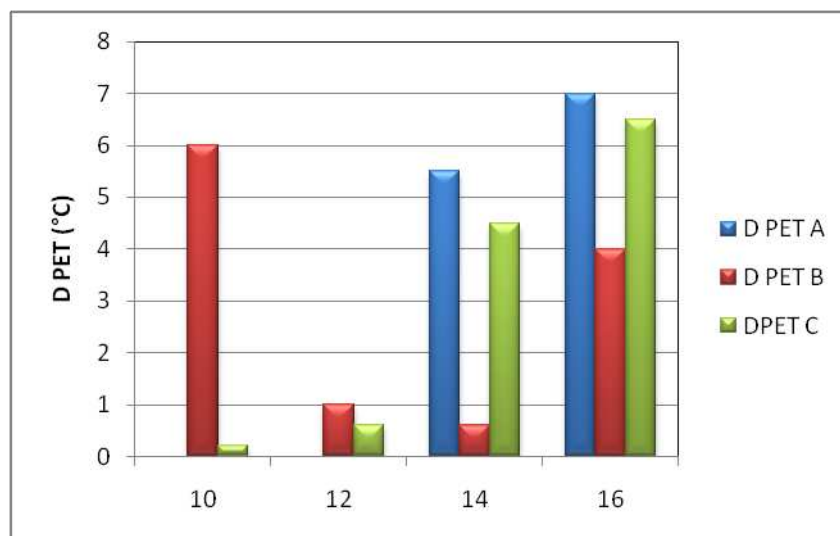


Fig. VI.14 : Ecart de la PET entre zone à l'ombre et zone au soleil pour les trois stations de mesure (*Auteur*).

D'où la nécessité de se retirer vers les espaces intérieurs ou prévoir des dispositifs d'ombrages comme cela a été déjà déterminé en chapitre IV.

Afin de confronter les résultats obtenus pour le confort extérieur à ceux de l'intérieur, Nous avons procédé à des mesures simultanées pour les intérieurs qui donnent sur la station **A**

- un local commercial niveau **RDC**.
- une pièce de 12 m² à l'étage intermédiaire et au dernier étage qui donnent sur la cour dont les persiennes sont tenues fermées toute la journée à cause de la chaleur et le grand vis-à-vis.*

Les propriétés thermiques des matériaux de construction sont celles utilisées pour la simulation.

- il a été recommandé de ne pas user de la climatisation.



Fig. VI.15 : Position des locaux de mesures (*Auteur*)

Des études récentes montrent que le confort des personnes à l'intérieur des bâtiments ventilés naturellement suit un modèle « adaptatif » pour lequel la zone de confort est plus large que celle habituellement utilisée dans la norme ISO 7730. Ainsi, en tenant compte de l'adaptation des occupants, la température opérative idéale dans les bâtiments ventilés naturellement ne suit pas le modèle de Fanger mais dépend plutôt de la température extérieure (De Dear et Brager, 2002) :

* Les différentes tentatives pour obtenir le plan de l'appartement étaient vaines, car ils ont été égarés lors des déménagements des locaux.

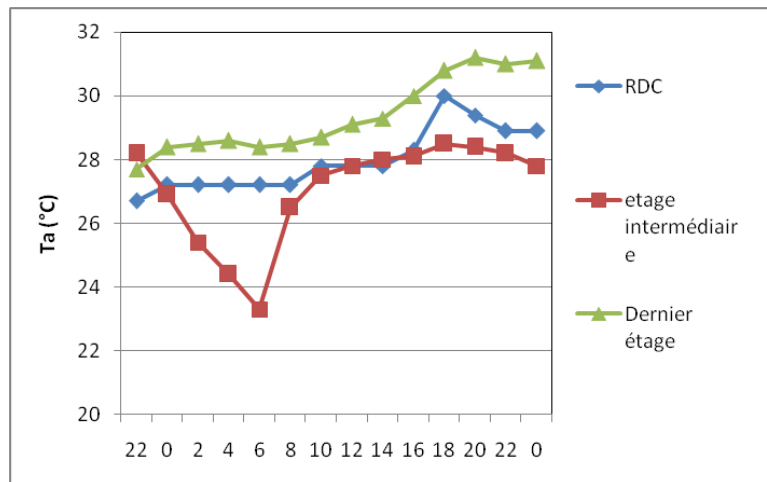


Fig. VI.16: évolution de la température de l’air dans les locaux donnant sur la station A orientation NO/SE (Auteur)

$$Top = 17.8 + 0.31 Te \dots \dots \dots \text{Eq VI}$$

où **Top** est la température opérative idéale,

Te la température extérieure en moyenne mensuelle.

La bande de confort acceptable a été déterminée à partir de la méthode classique PMV-PPD de Fanger. L’intervalle d’acceptation pour 90% des occupants est de ± 2.5°C. Il s’élève à ±3.5°C pour assurer le confort de 80% des personnes.

Ce modèle adaptatif a été introduit dans la norme ASHRAE 55 pour les bâtiments ventilés naturellement dans lesquels les occupants ont un contrôle réel sur l’ouverture des fenêtres.

si on calcule la **To** pour notre cas on aura

$$Te \text{ juin} = 22.3^\circ\text{C}$$

$$Top \text{ juin} = 17.6 + (0.31 \times 22.3).$$

$$Top \text{ juin} = 24,51^\circ\text{C} \pm 2$$

$$\text{où } 24,51^\circ\text{C} \pm 3.5 \approx 28^\circ\text{C}$$

Donc comme on a vu au chapitre V l’étage supérieur subit d’autres sollicitations que les étages inférieurs. En se référant au modèle adaptatif on remarque que le RDC ne subit l’inconfort qu’à partir de 18h (mesures que j’ai prises moi-même), par contre les occupants de l’étage intermédiaire sont pratiquement à 100% d’heures de confort.

Ce qui donne de la performance en cette géométrie de pouvoir garder les locaux plus ou moins frais. (Pour le pic de 6h utilisation de climatiseur ?!)

VI-3-4- Mauvaise adaptation

Agir sur les propriétés thermiques des matériaux, augmenter le flux latent, masquer le soleil, planter des arbres sont des stratégies qui ont prouvé leur efficacité.

Cependant ces éléments doivent être introduits d'une manière intelligente sinon ils donneront l'effet contraire

On pensant avoir meilleurs résultats en fermant l'ouverture vers l'azimut de la station A par le biais d'une rangée d'arbres à feuilles caducs. L'effet contraire c'est produit à cause du ralentissement du vent ce qui a entraîné une augmentation de la Tmrt.

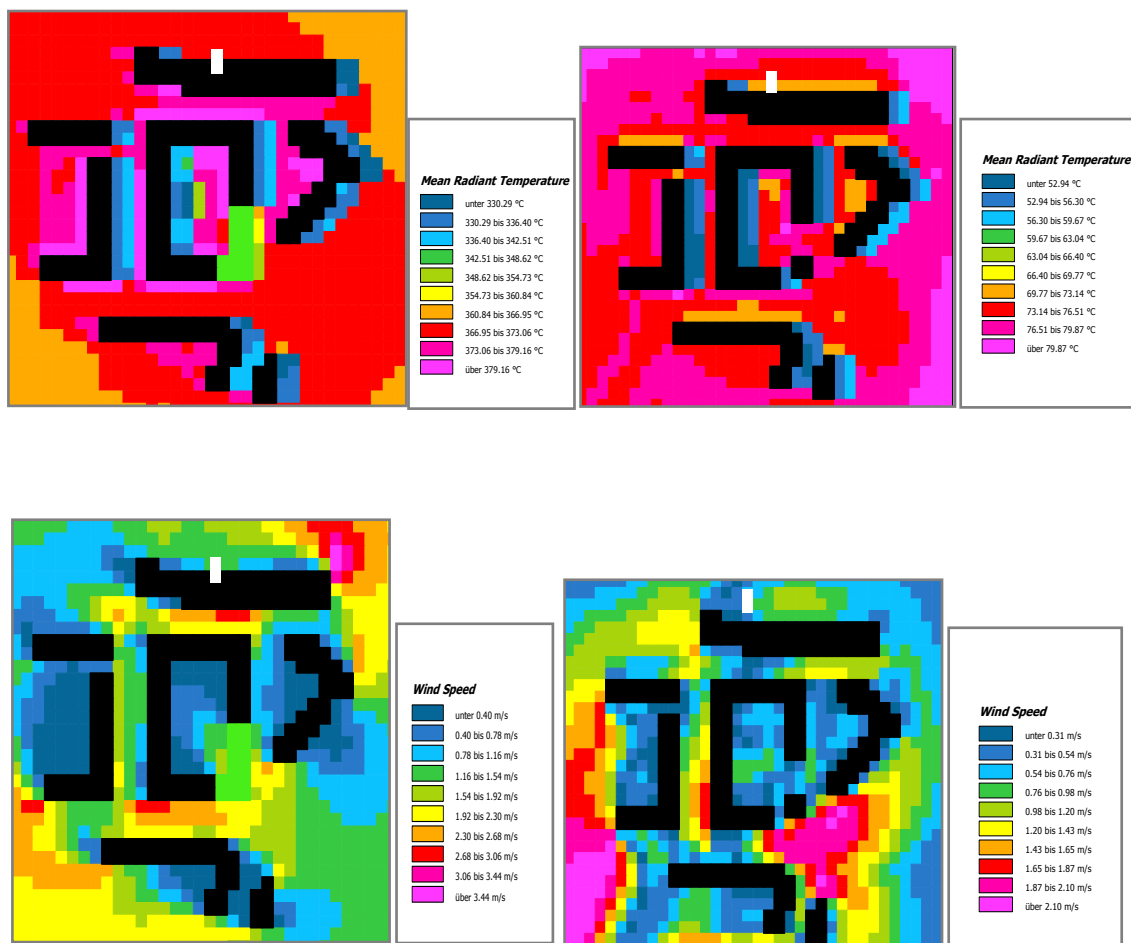


Fig. VI.17 : Conséquences de la fermeture de l'azimut par une rangée d'arbres sur le confort thermique humain (*Auteur*).

Conclusion

A travers ce chapitre, on a essayé de trouver la meilleure façon de concevoir une place publique pour un meilleur ensoleillement et une meilleure ventilation.

L'action sur la géométrie urbaine fortuite, peut améliorer le confort thermique pour une période de l'année et le contrer pour une autre.

Donc la meilleure manière d'instaurer le confort thermique, nécessite une étude très détaillée par la combinaison des tailles et des proportions que par la simple action sur la hauteur ou la largeur.

Si l'intervention sur la course solaire usant des diagrammes solaires permet d'ajuster les tâches solaires au niveau de l'espace, l'action sur sa ventilation demeure limitée tant l'écoulement du vent est imprévisible. Tout ce qu'on peut dire, c'est d'essayer de canaliser les vents vers son centre et d'éviter une incidence qui dévie de $\pm 30^\circ$ sur son axe d'orientation.

L'espace urbain extérieur par sa morphologie et sa configuration au sol en interaction avec les différentes caractéristiques des ses surfaces naturelles et artificielles, et son intervention sur le comportement aérodynamique de nature dynamique ou thermique, est le siège de différentes ambiances thermiques pour ses usagers. Sur terrain, contrairement aux simulations la mise en évidence du rôle du seul paramètre « géométrie » ayant pour indice le **SVF** s'avère très compliquée dans des espaces préétablis où règnent les différents facteurs précités.

Toutefois, par nos indicateurs dégagés on a pu prédire que le comportement de la station **A** serait meilleur que la station **B**. Ceci dit que travailler avec des règles, et des lois rapprochera les concepteurs de ces espaces urbains plus de la réalité microclimatique.

L'étude sur terrain a dégagé la présence de l'ICU même dans les terrains vagues de la ville par manque de ventilation.

Elle a dégagé d'autres paramètres à prendre en considération dont l'ouverture vers l'azimut qui fait perdre l'effet protecteur de la géométrie, la fermeture d'horizon par les immeubles adjacents, station **B**, confine la meilleure des géométries.

Les multi-réflexions entre parois transversales ou longitudinale devraient être pris dans les calculs des distances entre immeubles.

Comme déjà prouvé par mesures in situ et par simulations dans une recherche antérieure (Kedissa, 2010), l'emploi des matériaux de pavage à haute réflectivité améliore d'une manière très significative le niveau du confort thermique. Cependant, l'emploi des matériaux poreux permettant une évapotranspiration, même à plus faible albédo donne les mêmes résultats sinon meilleurs.

L'ombrage par les groupements d'arbres denses dans les emplacements adéquats constitue la meilleure stratégie de par la réduction du flux thermique entrant. Stratégie

qui anéantit l'effet des matériaux frais au sol. Mais comme fournie par la littérature, l'emploi de ces derniers permet une bonne croissance des arbres, une bonne évapotranspiration et leur évite le stress thermique.

D'une façon générale, l'augmentation du flux latent et l'amélioration des propriétés thermiques des surfaces au sol en combinaison à l'implantation des arbres à larges couronnes employés comme obstacles aux rayons solaires, avec une bonne orientation aux vents dominants surtout pendant les heures de surchauffe constituent des bons outils pour palier aux grands désagréments causés au confort thermique principalement par des géométries urbaines à grandes ouvertures au ciel, et afin d'augmenter le temps d'utilisation de l'espace public urbain et d'éviter la surchauffe des locaux.

*Conclusion générale
et recommandations*

Le réchauffement global de la planète et le dérèglement météorologique vont croître considérablement d'ici la moitié du 21^{ème} siècle. La ville n'échappera pas à l'influence de ces changements climatiques voire même elle y participe.

La ville est tout d'abord un milieu « fabriqué » dont les matériaux et les formes influent sur la relation entre la couche atmosphérique et le sol. En effet, la minéralisation excessive de l'espace, l'albédo plus faible qu'en milieu rural d'une manière générale, la capacité calorifique des matériaux, le piégeage radiatif dû à l'arrangement des bâtiments, ou encore l'imperméabilisation des sols et le manque de végétation et d'eau dans les espaces ouverts pour ne citer que ceux-là, ont augmenté d'une manière significative le flux sensible dans l'environnement urbain modifiant les caractéristiques environnementales de la ville dont la manifestation la plus observable est l'îlot de chaleur urbain.

Ce phénomène est caractérisé par une hausse parfois assez considérable des températures de l'air dans les centres urbains par rapport à leur périphérie.

La géométrie urbaine est déterminante de l'intensité d'un îlot de chaleur urbain car elle modifie la vitesse et l'écoulement du vent, commande l'exposition des surfaces horizontales et verticales au réchauffement solaire et le refroidissement radiatif.

Les interventions sur la forme urbaine, le couvert naturel, l'architecture et les matériaux constituent de véritables leviers d'action pour l'aménagement urbain. Elles sont déterminantes de l'habitabilité des villes, car à l'échelle urbaine elles contribuent à améliorer les microclimats et à l'échelle architecturale à créer des espaces intérieurs confortables sans recourir aux systèmes mécaniques et électriques.

La géométrie urbaine à cette échelle s'avère plus importante que le comportement thermique des matériaux, car les recherches concluent que l'ombre est plus importante que l'augmentation de l'albédo et que l'ombre des bâtiments est plus appropriée que l'ombre des végétaux. Le rayonnement solaire possède une influence sur la *t_{mrt}* et la *P_{et}* plus que les vitesses du vent.

L'interaction complexe entre diverses variables dans les espaces publics, où les conditions sont moins contrôlables est le principal défi pour les chercheurs dans le contrôle du confort thermique extérieur. Les recherches récentes diminuent de ce défi car lors de la conception d'espaces urbains ouverts, il est important de se rappeler qu'il est préférable de créer une variété de conditions environnementales adaptées à une plus large gamme de préférences

personnelles qui peuvent prendre jusqu'à 50% de l'évaluation globale et assurent la pérennité des ces espaces.

Les deux démarches principales de conception urbaine en fonction des conditions microclimatiques pour assurer l'équilibre thermique physiologique des piétons sous un climat contrasté sont d'une part de profiter du vent et se protéger du soleil lorsque la sensation de chaleur s'élève, d'autre part profiter du soleil et se protéger du vent lorsque la sensation de froid prend le dessus.

C'est principalement en agissant sur les paramètres vent et soleil qu'on modifiera la qualité de confort thermique des usagers des espaces publics.

L'évaporation est utile lorsque les températures sont élevées mais sèches. C'est ainsi que les fontaines et la végétation participent largement à la création d'un microclimat confortable lorsque le climat devient chaud et sec.

La forme bâtie et sa densité sont des éléments critiques pour l'ensoleillement et la ventilation des espaces publics urbains. La morphologie d'un espace dont le rapport hauteur/largeur est élevé réduit fortement l'exposition directe de ses surfaces. L'orientation des espaces a aussi son importance dans la question de l'ensoleillement.

Aussi le vent peut être freiné par les obstacles urbains comme il peut être canalisé dans les rues.

La présente recherche a pour objectif fondamental de trouver un compromis entre confort thermique extérieur, confort thermique intérieur et économie d'énergie garantis par la géométrie urbaine.

L'étude des paramètres d'ambiance a nécessité le recours à la simulation numérique et des mesures in situ pour une collecte de données mesurables relatives aux facteurs physiques des ambiances thermiques extérieures, ambiances thermiques intérieures et consommation d'énergie.

Les espaces publics extérieurs concernés par cette recherche sont les places publiques. Ce sont des lieux à la fois clos et ouverts qui favorisent le séjour autant que le passage.

La qualité de ces dernières présente un intérêt majeur pour contribuer à la bonne qualité de vie en milieu urbain, dépendamment de l'environnement physique qui les constitue.

Ce vide urbain est caractérisé par sa hauteur, sa longueur, sa largeur ainsi que son tracé.

Elle devrait procurer le sentiment d'enclosure caractéristique importante pour une ambiance paisible et un sentiment d'intimité et de sécurité.

Ce travail de recherche propose une méthodologie de conception des géométries urbaines et l'étude de leurs impacts sur le microclimat urbain et la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle de l'îlot. Une classification des formes des places ainsi que des indicateurs morphologiques représentatifs de ces formes est proposée afin d'étudier leur association avec les conditions climatiques locales.

A partir de simulations, les rapports entre la géométrie urbaine et le microclimat urbain sont explorés de manière à mettre le jour sur les liens entre la géométrie de l'espace urbain et les indicateurs morphologiques. Enfin, des intervalles qui régissent les rapports entre géométrie de la place, performance solaire et consommation énergétique des bâtiments sont proposés.

La performance solaire d'une configuration urbaine est un aspect principal à étudier. Les durées journalières de cet ensoleillement et le potentiel surfacique de cette durée sont en rapport avec les proportions de la place qui définissent ainsi des indicateurs géométriques qui permettent un diagnostic rapide des avantages d'une forme urbaine et de la performance solaire des espaces urbains et bâtiments.

Nous rappelons que cette recherche a nécessité deux parties : une partie théorique issue d'une analyse bibliographique entamée par une définition des caractéristiques du microclimat urbain. On a procédé à une analyse approfondie des composants du bilan thermique d'un milieu urbain. Afin de déterminer les causes de la défaillance de son équilibre dont l'îlot de chaleur urbain est la conséquence la plus apparente et la géométrie urbaine paraît la cause principale de sa génération.

Les effets aérodynamiques, et hygrothermiques ont été également traités dont l'objectif était de comprendre les modifications qu'ils subissent par le milieu urbain. Les stratégies d'amélioration du microclimat urbain ont été aussi abordées.

Ensuite, on a défini le concept place pour situer cette pièce parmi tant d'autres espaces urbains ouverts et dont on a défini les différents critères auxquels elle doit répondre. Les indicateurs de la géométrie urbaine ont été abordés.

La deuxième partie pratique est entamée par une analyse climatique et bioclimatique de la région de Constantine afin de définir le contexte climatique de notre recherche. Cette analyse climatique sur la ville de Constantine nous a permis la classification de son climat, ainsi que d'aboutir à des orientations et des recommandations qui peuvent éventuellement dicter des principes de base de la conception urbaine bioclimatique. Cette approche s'est basée sur des méthodes d'analyse climatique et bioclimatique universelles.

Cette analyse a révélé une dualité des besoins entre ombre en été et ensoleillement en hiver aussi bien pour les espaces extérieurs qu'intérieurs. La demande en chauffage dépasse de loin les besoins en climatisation pour assurer le confort des occupants. D'où l'intérêt d'un chauffage passif gratuit en exploitant le potentiel d'ensoleillement tout en pensant à s'en protéger l'été par des dispositifs d'ombrage.

Plus de la moitié de l'année l'ensoleillement est demandé. Cet ensoleillement intervient principalement entre 10h et 14h. Il doit être valorisé.

L'ombre aussi est demandé pour la moitié de l'année notamment pour la période de 10h à 17h, mouvement d'air et évapotranspiration sont recommandés pour atteindre le confort à condition que les températures de l'air ne dépassent pas les 35°C sinon il faut se retirer dans les espaces fermés.

D'où les deux conditions imposées pour profiter d'un maximum d'ensoleillement en hiver où le potentiel surfacique d'ensoleillement est de plus 50% est imposé et une durée journalière raisonnable en été qui constitue la moitié de la durée d'ensoleillement pour le solstice d'été.

Après avoir exposée la méthode d'approche qui consiste en une partie simulation où différentes formes et proportions des places ont été définies afin de dégager des indicateurs géométriques H/W et SVF.

La deuxième approche concerne en une investigation sur un tissu urbain existant par la mesure sur site dans le but de vérifier les résultats issus de la simulation, appareils de mesures et protocoles de la campagne in situ ont été décrits.

Dans le cinquième chapitre les résultats des simulations ont été exposés en mettant à l'épreuve de nos deux conditions les deux indicateurs géométriques H/W et SVF et les deux formes géométriques rectangle et carré (cercle...).

Les simulations ont été faites pour deux jours types et deux jours extrêmes pour chaque saison.

✚ Pour les formes géométriques, le rectangle permet une surface ensoleillée plus que le carré. Ce dernier possède un comportement tout à fait contradictoire : il possède une faible pénétration en soleil d'hiver, et une faible protection en été.

D'où la conclusion que cette forme ne convient pas pour le climat d'Ali Mendjeli (Constantine).

Pour les places rectangulaires, l'orientation du grand axe joue un rôle important dans la pénétration des rayons solaires. Si la place est longue et étroite, le soleil va la pénétrer plus profondément pour une orientation nord-sud.

✚ Le rapport H/W avec l'orientation commandent la durée d'ensoleillement d'une place. Cette durée est indépendante de l'élongation de la place. Elle est pareille pour tous les espaces et elle est la plus longue au solstice d'hiver.

Les rapports L/W et H/L commande le potentiel surfacique de cette durée. Plus $L > W$

Plus grande est la surface ensoleillée. H/L commande le pourcentage de cette surface

✚ Pour un même rapport H/L le pourcentage de surface ensoleillé pour deux espaces différents est le même.

Donc la durée journalière d'ensoleillement journalière et le potentiel surfacique de cette durée nécessite d'introduire 2 autres indicateurs géométriques dont le facteur de forme L/W et le rapport H/L.

Les places d'orientation Nord-Sud sont recommandées pour le climat d'Ali Mendjeli tout en pensant à bien choisir les fonctions qu'abriteront les deux bâtiments Est et Ouest pour éviter la surchauffe d'été. Elles sont suivies des places d'orientation NO-SE qui déploient leur ombre l'après midi ce qui convient parfaitement pour une période de surchauffe de 10h à 17h. L'inverse est valable pour l'orientation NE-SO.

L'orientation Est- Ouest a la plus petite surface ensoleillée. Elle conviendrait donc pour des cœurs d'îlot d'habitations.

En appliquant nos deux conditions précitées tout en prenant en compte l'aspect esthétique et psychologique de l'espace place relevés dans la littérature, il en ressort que les places qui répondent à nos critères sont comprises dans les intervalles : $1.5 < L/W \leq 2$

Avec un rapport $0.4 < H/W \leq 0.6$ et $0.13 \leq H/L \leq 0.3$.

Soit un SVF compris dans l'intervalle $0.4 \leq \text{SVF} < 0.5$.

Donc le rapport H/W et le SVF sont insuffisant pour décrire l'interaction des rayons solaires avec la géométrie d'une place.

✚ Pour une orientation NO-SE / NE-SO, l'inclinaison de l'axe d'orientation d'un angle $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ permet de réduire le temps d'ensoleillement d'été et de se faire pénétrer par le soleil d'hiver plus qu'une orientation à 45° .

La relation entre les géométries urbaines dégagées et le microclimat a été analysée à travers une étude corrélacionnelle. Cette étude permet de démontrer la nature de la relation entre le SVF et les facteurs microclimatiques en milieu urbain.

Les résultats montrent des corrélacions entre le SVF et les paramètres microclimatiques plus ou moins significatives. Toutefois, ils montrent deux types de corrélacions : positives et négatives.

Une forte corrélacion positive entre la T_{mrt} et les températures de surface au sol. Donc le confort thermique des places est lié aux propriétés thermiques du sol.

La comparaison des environnements thermiques des géométries dégagées avec l'environnement thermique d'une station peu profonde a établi que les espaces moyennement profonds sont efficaces pour garantir un bon niveau de confort en hiver.

Cependant garantir un confort estival pendant la période de surchauffe reste difficile. Néanmoins la diversité des ambiances fournies par les tâches d'ombre et de soleil sur l'espace garantit sa fréquentation même en périodes hostiles pour le confort thermique humains. Seule la ventilation peut redresser le confort ceci confirme notre deuxième hypothèse qui non seulement affecte le confort humain mais aussi la consommation énergétiques des bâtiments aux alentours.

Pour une meilleure répartition de l'ensoleillement sur la surface au sol de cette pièce maitresse du tissu urbain, garder le rapport H/W = 0.4 dans la zone sud et ne jamais aller au dessous et augmenter la hauteur au nord donnerait une meilleure répartition.

Des hauteurs élevées au nord et inégales au sud déplacent la zone de surchauffe vers le sud. Des arbres à feuilles caduques sont recommandés pour cette zone afin de se protéger du soleil d'été.

En jouant sur l'inégalité des hauteurs au sud et l'élimination de l'effet dièdre, l'étude des phénomènes aérauliques en ces milieux ouverts s'est révélée complexe par l'ensemble des phénomènes mis en jeu par la géométrie.

Les données sur l'environnement thermique, hygrothermique et aéraulique de trois enclos urbains assez conséquents, situés dans la ville nouvelle d'Ali Mendjeli de la région de Constantine à climat contrasté ont été mesurées. Des appareils portatifs de mesure des ambiances physiques durant une journée type d'été ont été utilisés.

L'analyse s'est faite selon trois orientations différentes ayant pour objectif de fixer la géométrie et de palper d'autres paramètres influents sur le microclimat d'un espace urbain.

L'étude sur terrain a dégagé la présence de l'ICU même dans les terrains vagues de la ville par manque de ventilation.

L'analyse des données de la micro climatologie urbaine a révélé le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU). La forme carrée présente les conditions les plus défavorables et l'orientation **NO-SE** présente la meilleure orientation. Ceci valide nos résultats et l'intervalle $0.4 \leq SVF \leq 0.5$ est maintenu.

L'analyse in situ a dégagé d'autres paramètres à prendre en considération lors de la conception d'un espace urbain : l'ouverture vers l'azimut qui fait perdre de l'effet protecteur de la géométrie ; la fermeture d'horizon par les immeubles adjacents confine la meilleure des géométries, l'angle d'attaque du vent sur l'axe longitudinal ; les multi-réflexions entre parois transversales ou longitudinales devraient être pris dans les calculs des distances entre les immeubles.

Il nous faut donc compléter le paramètre SVF de manière à prendre en compte d'autres facteurs. nous souhaitons cependant insister sur le fait qu'il ne s'agit pas ici de réduire toute la complexité et la richesse des formes urbaines à un jeu de valeurs et seuils numériques. Les différents indicateurs que nous avons proposés ne peuvent avoir qu'une valeur limitée et même provisoire leur contestation doit toujours rester possible de manière à ouvrir leur définition à des nouveaux développements. Dans cette optique l'analyse de la consommation énergétique, l'éclairage naturel dans les espaces publics.....

En conclusion, les objectifs précédemment tracés ont été atteints et les hypothèses mises en place ont été largement vérifiées. D'autres axes de recherche s'ouvrent et

beaucoup d'interrogations peuvent trouver leur réponse du moment que la planification urbaine peut se servir des outils graphiques ou de simulation pour tester la façon dont la forme urbaine influencera le microclimat urbain et le confort humain. D'autres paramètres liés à la microclimatologie urbaine peuvent être aussi testés et évalués. Ces outils devraient donc être simples et faciles à utiliser pour aider les architectes et les urbanistes à adhérer à un urbanisme bioclimatique.

Limites de la recherche

Les objectifs de la recherche ont été atteints. Cependant, quelques limites liées à la méthodologie doivent être exposées :

- La période des relevés ne tient pas en considération la saison d'hiver. Il serait plus pertinent dans un climat contrasté comme celui de Constantine, d'intégrer les relevés d'hiver afin de permettre une comparaison plus exhaustive entre les différentes géométries en termes de confort thermiques.
- Le couplage entre les logiciels donne plus de fiabilité et permet des études paramétriques, des gains en temps et en énergie nécessite des connaissances approfondies en programmation que malheureusement nous ne détenons pas.

Recommandations :

Les différents résultats rassemblés de la présente recherche, nous incitent à fournir des recommandations afin de bénéficier du contrôle de l'ambiance thermique que peut fournir la géométrie des espaces urbains ayant pour indicateurs le H/W, H/L le L/W et le degré d'ouverture au ciel (SVF), Ceci encouragera une conception des places urbaines en parfait accord avec leur contexte climatique.

Pour optimiser la contribution des surfaces nues à l'amélioration du microclimat :

- Employer les matériaux de couleur claire de haut-albédo qui ne dépassent pas les 50% de réflectivité.

- L'utilisation des matériaux poreux permettant une évapotranspiration diminue aussi d'une manière égale les températures surfaciques. Puisque l'albédo diminue par vieillissement, constitue un apport en plus dans la T_{mrt} et engendre le phénomène d'éblouissement, ils seraient préférables aux premiers.
- Limiter les effets des surfaces au sol pavées et foncées à faible albédo peut être réalisé en fournissant l'ombre par l'utilisation de la végétation. Le rapport végétation/ espace bâti de 60/40 et plus est recommandé; plus il est important meilleur est le refroidissement.
- Choisir un dallage imperméable, planter des arbres et prévoir des bassins d'eau, des cascades et des rigoles puisque l'eau en mouvement a un effet plus bénéfique, de bien les disposer en direction des vents dominants pour augmenter la valeur moyenne de l'humidité et par conséquent le confort thermique.

La ventilation de l'espace s'avère un paramètre essentiel dans le contrôle de l'effet de la géométrie, de l'évapotranspiration, de la T_{mrt} et la PET. Il est donc impératif de :

- Bien orienter les espaces publics en direction des brises d'été.
- Favoriser les mouvements d'air locaux par la juxtaposition d'espace à grand SVF et un autre à faible SVF avec des ouvertures l'un sur l'autre.

Pour un confort psychologique, il serait préférable que les places soient

- de dimensions restreintes, favorisant ainsi les sentiments de sécurité et d'enclosure ;
- qu'elles aient des différences de niveau, tout en pensant à sa ventilation, pour inviter à la découverte et combattre le sentiment d'ennui.
- Créer de l'animation en leur sein en prévoyant par exemple des espaces de consommation tels que les café – terrasses placés du côté nord pour bénéficier d'un ombrage permanent en saison chaude, des espaces de jeux pour adultes et enfants.
- Favoriser une architecture Bioclimatique des bâtiments autour des places.

Axes de recherches futures

L'ensemble du travail réalisé dans le cadre de cette recherche ouvre de nombreuses perspectives de recherche :

- L'étude des effets microclimatiques générés par la juxtaposition de différentes morphologies urbaines tels que les mouvements d'air locaux.
- Une étude plus fine concernant les indicateurs géométriques de la place et la consommation énergétique des bâtiments en rapport avec ces indicateurs pourrait également compléter cette étude.
- L'étude de la ventilation dans la ville répondant aux deux saisons dans les villes au climat contrasté pourrait être la solution au déséquilibre climatique urbain.
- Microclimats urbains et opportunités d'adaptation des utilisateurs sont interdépendants. Cette interdépendance mérite d'être explorée.

L'intégration de ces nouveaux paramètres permettrait une meilleure intelligibilité de la relation entre la morphologie urbaine, microclimats et le confort thermique extérieur et intérieur. L'étude de cette relation fournirait des éléments objectifs et subjectifs essentiels à la conception des espaces publics extérieurs en vue de contribuer au développement durable de nos villes.

Bibliographie

Ouvrages :

1. **Akbari. H, Davis. S, Dorsano. S, Huang. J et Winnett. S**, 1992, Cooling Our Communities: A Guidebook on Tree Planting and Light Colored Surfacing, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
2. **Allain. R**, 2004, Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville, Paris, A. Colin, coll. U Géographie, 254 p.
3. **Alexander. C, Ishikawa. S, Silverstein. M and al**, 1977, A Pattern Language. Towns. Buildings. Construction, Oxford University Press, New York.
4. **Beltrando. G**, 2011, Les climats : Processus, variabilité et risques, Collection U, Editeur Armand Colin.
5. **Bernard. M.J et Listowski. H**, 1984, Les places dans la ville. Les pratiques de l'espace, édition Dunod.
6. **Bottema. M**, 1992, Wind climate and urban geometry, Eindhoven, press University of technology.
7. **Brown. G and DeKay. M**, 2000, Sun wind and light: architectural design strategies, 2nd Edition John Wiley & Sons Inc.
8. **Chatelet. A, P. Fernandez, Lavigne. P**, 1998, Architecture climatique une contribution au développement durable. Tome 2 : Concepts et dispositifs, EDISUD, Aix-en-Provence.
9. **Conrado. M**, 2004, La maison écologique, édition de Vecchi, Paris.
10. **Erell. E, Pearlmutter. D, Williamson. T**, 2011, Urban Microclimate. Designing the spaces between Buildings, Earthscan Ltd, London, UK.
11. **Escourrou. G**, 1991, Le climat et la ville, édition Nathan.
12. **Gartland. L**, 2010, Heat islands: understanding and mitigating heat in urban, édition Routledge, UK.
13. **Depecker. P, Izard. JL, Traisnel. J.P**, 1989, Qualité thermique des ambiances, Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture, AFME, Paris.
14. **Fanger. P.O**, 1972, Thermal Comfort, Düsseldorf-New York-London: McGraw Hill Book Company.
15. **Gandemer. J**, 1975, Inconfort du au vent aux abords des bâtiments: Etude aérodynamique du champ de vitesse dans les ensembles bâtis, Etude complémentaire. CSTB, France.
16. **Gandemer. J**, 1976, Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti: Guide méthodologique et conseils pratiques. Ministère de l'équipement, Direction de l'aménagement foncier et de l'urbanisme : diffusion, La documentation française.
17. **Gauthiez. B**, 2003, Espace urbain: Vocabulaire et morphologie, Edition du patrimoine.
18. **Gehl. J**, 1987/2011, Life between buildings: Using public space, Washington-Covelo London: Island Press.
19. **Gehl. J**, 2010, Cities for People, Washington-Covelo-London: Island Press.
20. **Gibberd. F**, 1972, Composition urbaine, Edition Dunod, Paris.
21. **Giedion. S**, 1941, Space, Time and Architecture, Harvard, Cambridge Univ. Press.
22. **Givoni. B**, 1978, l'homme, l'architecture et le climat, Edition Moniteur.
23. **Givoni. B**, 1994, Passive and low energy cooling of buildings, John Wiley et Sons INC, USA.
24. **Givoni. B**, 1998, Climate Considerations in Building and Urban Design, Edition John Wiley et sons INC, New York.

25. **Guyot. G**, 1999, Climatologie de l'environnement, Edition DUNOD.
26. **Gymbal. J**, 1996, Histoire de l'architecture de l'antiquité à nos jours, Edition Könmann, Cologne.
27. **Izard J.L**, 1979, Archibio, Edition parenthèses.
28. **Johnston. J, Newton. J**, 2004, Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements. Edition Ecology Unit, London.
29. **Littlefair P.J, Santamouris, M, Alvarez.S, Dupagne.A, Hall.D, Teller J, Coronel J.F., Papanikolaou. N**, 2000, Environmental Site Layout Planning: Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas, Building Research Establishment, London.
30. **Kingsbury Dunnett. N**, 2008, Planting green roofs and living walls. 2nd Ed., Tim Press.
31. **Koenisberger. O.H, Ingersoll. T.G, Mayhew. A et Szokolay. S.V**, 1973, Manual of tropical Housing and building.Part:1 ,Climate design, Edition Longman group, New York.
32. **Krier. R**, 1980, L'espace de la ville, théorie et pratique, Edition archive d'architecture moderne, Bruxelles.
33. **Landsberg. H.E**, 1981, the Urban Climate, Academic Press Inc., New York, US.
34. **Lavoy. F, Boeuf. F, Thellier.F**, 2015, Qualité des ambiances dans les bâtiments, Le confort thermique de l'habitant, Presses des Mines, Collection développement durable.
35. **Liebard. A, De Herde. A**, 1996, Guide de l'architecture bioclimatique, Edition Système Solaire, Observer, Paris.
36. **Liebard. A, De Herde. A**, 2005, Traité d'architecture bioclimatique, Edition observ'ER, Paris.
37. **Liebard. A, Menard, J.P et Piro. P**, 2007, Le Grand Livre de l'Habitat Solaire: 110 Réalisations en France, Le Développement Durable à la Portée de Tous, Edition Le Moniteur, Paris.
38. **Maouïa. S**, 2000, Éléments d'introduction à l'urbanisme, Histoire, méthodologie, réglementation, Edition Casbah, Alger.
39. **Müller. D.G**, 2001, Architecture écologique, Edition le Moniteur, Paris.
40. **Nicholas. J**, 2014/2015, De paysage en architecture : Le paysage comme projet urbain. Architecture et matérialité, Ecole nationale supérieure d'Architecture de Lyon, France.
41. **Noilhan. J**, 1980, Contribution à l'étude du microclimat au voisinage d'un bâtiment, CSTB, Nantes, France.
42. **Sacre. C**, 1983, Climatologie urbaine et climatologie de site, Ecole d'Architecture de Nantes.
43. **Oke. T.R**, 1987, Boundary Layer Climates, Methuen, New York. USA.
44. **Olgay. A et Olgay. V**, 1957, Solar control and shading devices, Princeton university press, Princeton, NJ.
45. **Olgay. A et Olgay. V**, 1962, Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism, Princeton university press, Princeton, NJ.
46. **Olivia, J-P et Courgey, S**, 2006, La conception bioclimatique des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation, Edition Terre Vivante, France.
47. **Osborne. W.C, Turner. C.G**, 1969, Woods guide pratique de ventilation, Edition Dunod, Paris.
48. **Perrault, M**, Les dix livres d'architecture de Vitruve, édition Pierre Mardaga, Liège 1996, le cinquième livre d'architecture, P .148

49. **Recknagel**, 1986, Manuel pratique du génie-climatique, Pyc édition, gebundene Ausgabe , germany
50. **Roogers .R et Gumuchjian. P**, 2000, Des villes durables pour une petite planète, Edition Le Moniteur, Paris.
51. **Sablet. M**, 1980, Des espaces urbains agréables à vivre, Edition Le Moniteur, Bruxelles.
52. **Salat. S**, 2015, De la ville Blanche, verte et Bleue à la Forme urbaine Bioclimatique,_ Collection la ville en train de se faire, Editions Parenthèses, France.
53. **Santamouris. M**, 2001, Energy and climate in the urban built environment, Edition James & James Ltd, London, UK.
54. **Sitte. C**, 1980, L'art de bâtir les villes, Edition L'équerre, Paris.
55. **Terrin. J.J**, 2015, Villes et changement climatique, Collection la ville en train de se faire, Edition Parenthèses, Marseille, France.
56. **Vaillant. J.R**, 1978, Utilisation et promesse de l'énergie solaire, Edition Eyrolles, France.
57. **Watson. D, Camous. R**, 1986, L'habitat bioclimatique, de la conception thermique à la construction, Edition L'étincelle, Montréal.

Rapports d'études et articles publiés

1. **Ado. H-Y**, 1992, "*Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze* ", Journal of Applied Meteorology, 31 (10), pp. 1146–1164.
2. **Aggrwal. R**, 2006, "*Energy design strategies for city-center: An evaluation*", Passive and Low Energy Architecture, Genève, Suisse.
3. **Aha. M**, 2011, "*Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions*". Build Environ, 46, pp.2641–2656.
4. **Ahmad. K, Khare. M, Chaudhry. K**, 2005, "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections -A review", J. Wind Eng Ind Aerodyn, 93, pp: 697–717.
5. **Aida. M, Goth. K**, 1982, "*Urban albedo as a function of the urban structure*", Boundary layer meteorology, 23), pp. 405-415.
6. **Akbari. H, Bretz. S, Taha. H, Kurn. D et Hanford. J**, 1997, "*Peak power and cooling energy savings of high albedo roofs*", Energy and Buildings, Special Issue on Urban Heat Islands and Cool Communities, 25(2). pp.117–126.
7. **Akbari. H, Pomerantz. M et Taha. H**, 2001, "*Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas* ", Solar Energy, 70 (3).pp. 295-310.
8. **Alcofarado, M.J. Andrade, H. Lopes, A. Prior, V et Veira, H**. 2000. "*Nouvelles observation sur les températures de l'air et de surface à Lisbonne*". Climat et environnement, pp.3-8.
9. **Ali-Toudert. F et Mayer. H**, 2004, "*Planning-oriented assessment of street thermal comfort in arid regions*," 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, Netherlands.
10. **Ali-Toudert, F., M. Djenane, R. Bensalem, H. Mayer**, 2005, "*Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria*", Climat Research, 28(3), pp. 243-256.
11. **Ali-Toudert. F, Mayer, H**, 2005, "*Thermal comfort in urban streets with trees under hot summer Conditions*". Proc. 22th Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA), 13-16 Nov, Beirut, Lebanon. Vol. 2. pp. 699-704.

12. **Ali-Toudert. F, Mayer. H**, 2006, "*Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate*", Building and Environment, 14, pp. 94-108.
13. **Ali-Toudert. F et Mayer. H**, 2007 " *Effect of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons*", Solar Energy, 81(6), pp742-754
14. **Al-Masri. N, Abu-Hijleh. B**, 2012, "*Courtyard housing in midrise buildings: An environmental assessment in hot-arid climate*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(4), pp. 1892-1898
15. **Almhafdy. A, Ibrahim. N, Ahmad. S et Yahya. J**, 2013, "*Analysis of the courtyard functions and its design variants in the Malaysian hospitals*", Procedia Social and Behavioral Sciences (105), pp. 171–182.
16. **Alonso, M. Fidalgo, M et Labajo, J**, 2007, " *The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters* ", Climate Research, 34 (1), p.39.
17. **Alwetaishi, M-S**, 2016, "*Impact of courtyard position and height on indoor air temperature with reference to hot and dry climate in Riyadh*", International civil, architectural and environmental engineering research congress, Kuala Lumpur. Malaysia.
18. **Andrade. H**, 2003, "*Microclimatic variations of thermal comfort in Lisbon city district*". The 5th international conference on urban climate, Lodz, Poland.
19. **Arnfield. A-J**, 1990, "*Street design and urban canopy layer and climate*", Energy and Buildings, pp. 117-123.
20. **Arnfield. A-J**, 1990, "*Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: A simulation approach*", Physical Geography, 11(3), pp. 220-239.
21. **Arnfield. A-J**, 2003, "*Review two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*", International journal of climatology, 23, pp.1-26.
22. **Asaeda. T, Ca. V-T et Wake. A**, 1996, "*Heat Storage of Pavement and its Effect on the Lower Atmosphere*", Atmospheric Environment, 30 (3), pp.413-427.
23. **Auliciems. A, Szokolay. S-V**, 1997, "*Thermal comfort*", Passive and Low energy Architecture, Notes, PLEA and Department of Architecture, The University of Queensland Brisbane.
24. **Axarli. K, Chatzidimitriou. A**, 2012, "*Redesigning urban open spaces based on bioclimatic criteria: two squares in Thessaloniki, Greece*", PLEA- 28th conference, opportunities, limits & needs towards an environmentally responsible architecture, 7-9 November, Lima, Peru.
25. **Barles. S**, 2010, "*Événements climatiques extrêmes, réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux*", Institut de France académie des sciences, Rapport sciences et technologie , n°29, EDP SCIENCES.
26. **Ballinas. M et Barradas. V**, 2016, "*The urban tree as a tool to mitigate the urban heat island in Mexico City: A simple phenomological model*", J,Environ. Qual, pp. 45.157.
27. **Bencherif. M, Chaouche. S**, 2013, "*La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud*", Sécheresse, 24, pp.203-13.
28. **Berkovic. S, Yezioro. A et Bitan. A**, 2012, "*Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate*", Solar energy, 86(5), pp. 1173–1186.
29. **Bitan. A**, 1992, "*The high climatic quality city of the future*", Atmos. Envir, 26 (B), pp. 313-329.

30. **Błażejczyk. K, Bröde. P, Fiala. D, Havenith. G, Holmér. I, Jendritzky. G, Kampmann. B et Kunert. A**, 2010, "*Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale*". Miscellanea Geographica, 14, pp. 91-102.
31. **Blazejczyk. K, Epstein. Y et Jendritzky. G**, 2011, "*Comparison of UTCI to selected thermal indices*", International journal of biometeorology, 56, pp. 515–535.
32. **Błażejczyk. K, Epstein. Y, Jendritzky. G, Staiger. H, Tinz. B**, 2012, "*Comparison of UTCI to selected thermal indices*", International Journal of Biometeorology, 56 (3), pp. 515–535.
33. **Böhm. R**, 1998, "*Urban bias in geometry temperature time serie*", Climatic change, 38, Autriche, pp.113- 128.
34. **Bolund. P, Hunhammar. S**, 1999, "*Ecosystem services in urban areas*", Ecological Economics, Vol. 29, pp. 293-301.
35. **Bonggeun. S, Kyunghun. P**, 2015, "*Contribution of Greening and High-Albedo Coatings to Improvements in the Thermal Environment in Complex Urban Areas*", Hindawi Publishing Corporation Advance Meteorology. Article ID 792172, 14 pages
36. **Brahimi. A, Mansouri. B**, 2016, "*Indigenous architecture as a context-oriented architecture, a look at indigenous architecture of Shushtar*", Journal Fundamental applied Sciences, 8(2S), pp. 380-398.
37. **Bouchemal. S**, 2009, "*Faire la ville : par quelles pratiques et par quels projets*", actes du 1^{er}Séminaire international sur les techniques de gestion des villes, Oum El Bouaghi, Algérie.
38. **Bougiatioti. F**, 2006, "*Effect of urban geometry on surface temperatures of "skin" materials in Greek cities*", PLEA, the 23rd conference, 6-8 Septembre, Genève, Suisse.
39. **Bourbia. F et Awbi. H.B**, 2004, "*Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. Part 1: Air and surface temperature measurements*", Renewable Energy, 29, pp. 249–262.
40. **Bourbia. F et Awbi. H.B**, 2004, "*Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. Part 2: Shading simulations*", Renewable Energy, 29, pp. 291–301.
41. **Bourbia. F et Boucheriba. F**, 2010, "*Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate*", Renewable Energy, 35(2), pp. 343-347.
42. **Bozonnet. E, Wurtz. E, Belarbi. R et Allard. F**, 2002, "*Simulation thermo-aéraulique du microclimat urbain à l'échelle d'une rue canyon*", IBPSA: Méthodes, modèles et simulation des bâtiments, France.
43. **Brahimi. A, Mansouri. B**, 2016, "*Indigenous architecture as a context-oriented architecture, a look at indigenous architecture of Shushtar*", Journal Fundamental applied Sciences, 8(2S), pp. 380-398.
44. **Bröde. P, Fiala. D, Błażejczyk. K, Holmér. I, Jendritzky. G, Kampmann. B, Tinz. B, Havenith. G**, 2012, "*Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI)*", International Journal of Biometeorology, 56 (3), pp. 481-494.
45. **Bröde. P, Krüger. E, Rossi. F**, 2011, "*Predicting urban outdoor thermal comfort by the universal climate index UTCI-a case study in southern Brazil*", International journal of biometeorology, Germany.
46. **Brown. R, Gillespie T.J**, 1990, "*Estimating radiation received by a person under different specie of shade trees*", Journal of arboriculture, 16 (6), pp.158-161.

47. **Calfapietra. C, Fares. S, Manes. F, Morani. A, Sgrigna. G et Loreto. F**, 2013, "*Role of biogenic volatile organic compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review*", Environment Pollution, 183, pp.71–80.
48. **Chatzidimitriou. A, Chrissoumallidou. N, et Yannas. S**, 2006, "*Ground surface materials and microclimates in urban open spaces*", PLEA, the 2^{3rd} conference, 6-8 Septembre, Genève, Suisse.
49. **Chatzidimitriou. A, Yannas. S**, 2015, "*Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials*", Energy and Buildings, 108, pp. 156–174.
50. **Chatzidimitriou. A, Yannas. S**, 2016, "*Microclimate design for open spaces: ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer*", Sustainable Cities and Society, 26, pp. 27–47.
51. **Chen. Y-C, Matzarakis. A**, 2017, "*Modified physiologically equivalent temperature- basics and applications for western European climate*", Theoretical and Applied Climatology, 132, pp.1275–1289.
52. **Chen. L, Ng. E**, 2012, "*Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade*", Cities, 29(2), pp.118–125.
53. **Chen. Y-C, Lin. T-Z, Matzarakis. A**, 2014, "*Comparison of mean radian temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany*", Theoretical and Applied Climatology, 118, pp.535–551.
54. **Cheng. V, Steemers. K, Montavon. M, Compagnon. R**, 2006, "*Urban form, density and solar potential*", PLEA, the 23rd Conference on passive and low energy architecture, 6–8 September, Geneva, Switzerland.
55. **Chiesura. A**, 2004, "*The Role of Urban Parks for the Sustainable City*", Landscape and Urban Planning, 68, pp.129-138.
56. **Chudnovsky. A, Ben-Dor. E, et Saaroni. H**, 2004, "*Diurnal thermal behaviour of selected urban objects using remote sensing measurements*", Energy and Buildings, 36 (11), pp. 1063-1074.
57. **Cohen.P, Potchter.O, Matzarakis. A**, 2013, "*Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments*", Applied Geography, 37, pp: 1–10.
58. **Dain. J, Kyunghun. P, Bonggeun. S, Gyeongah. K, Chulhyun. Ch et Byunghyun. M**, 2015, "*Validation of ENVI-met PMV values by in-situ measurements*", 9 th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, July 20-24, Toulouse, France.
59. **De Freitas. C, Grigorieva. E**, 2014, "*A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices*", International journal of biometeorology.
60. **De Dear. R.J, Brager, G.S**, 2002, "*Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revision to ASHRAE Standard 55*", Energy and Buildings, 34, pp. 549-561.
61. **De Souza. L-C-L**, 2003, "*Implementing a Geometry-Related Environmental Indicator in a 3D-GIS*", the 5th international conference on urban climate, September, Lodz, Poland.
62. **De Souza. L-C-L, Rodrigues. D-S, Leme. F-T et Pedrotti**, 2005, "*Incorporating sun paths for solar analysis in the 3Dskyview extension.*", CUPUM, The 9th international conference, London.
63. **Dimoudi. A, Nikoloupoulou, M**, 2003, "*Vegetation in the urban environment, microclimate analysis and benefits*", Energy and buildings, 35(1), pp.69-76.

64. **Doulos. L, Santamouris. M et Livada. I**, 2004, "*Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials*", Solar Energy, 77 (2), pp.231-249.
65. **Eliasson. I**, 1990/91, "*Urban geometry, surface temperature and air temperature*", Energy and building, 15-16, pp. 141-145.
66. **Eliasson. I**, 1994, "*Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry*", Physical Geography Journal, 15, pp.1- 22.
67. **Eliasson. I**, 1996, "*Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use*", Atmospheric environment, Volume 30, N° 3, pp.379-392.
68. **Eliasson. I, Knez. I, Westerberg. U, Thorsson. S et Lindberg. F**, 2007, "*Climate and behavior in a Nordic city*", Landscape and Urban Planning, 82, pp. 72 -84.
69. **Emmanuel. R, Rosenlund. H, Johansson. E**, 2007, "*Urban shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka*". International Journal of technology, 27, pp. 1-18.
70. **Escobedo. F-J, T. Kroeger et Wagner. J-E**, 2011, "*Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices*", Environ. Pollut, 159, pp.2078–2087.
71. **Escobedo. F-J et Nowak. D-J**, 2009, "*Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest*", Landsc. Urban Plan, 90, pp.102–110.
72. **Fan. M et Jin. Y**, 2013, "*Do neighborhood parks and playgrounds reduce childhood obesity?*" Amer. J. Agric. Econ, pp. 96, 26–42.
73. **Farajzadeh. H, Saligheh. M, Alijani. B et Matzarakis. A**, 2015, "*Comparison of selected thermal indices in the northwest of Iran*", Natural Environment Change, 1 (1), pp. 61- 80.
74. **Fardaheb. F**, 1989, "*classification des techniques de rafraîchissement naturel dans l'architecture vernaculaire des pays du Moyen orient*", Troisième séminaire sur l'énergie solaire, 7-8 Mars, Tlemcen, Algérie.
75. **Fiala. D, Havenith. G, Bröde. P, Kampmann. B et Jendritzky. G**, 2012, "*UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation*", International journal of biometeorology, pp.429-41.
76. **Gagge. A-P**, 1980, "*The new effective temperature ET *- an index of human adaptation to warm, environments*", Environmental Physiology: Aging, Heat and Altitude, Amsterdam, Elsevier, pp. 59–77.
77. **Gagge. A-P, Fobelets. A-P et Berglund. L-G**, 1986 "*A standard predictive index of human response to the thermal environment*", ASHRAE Transaction Journal, Vol 92:2B; Conference: ASHRAE annual meeting, 22 January, Portland, OR, USA.
78. **Gago. E-J, Roldan. J, Pacheco-Torres. R et Ordoñez. J**, 2013, "*The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, pp.749-758.
79. **Gulyas. A, Unger. J et Matzarakis. A**, 2006, "*Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modling and measurements*", Building and Environment, 41, 2006, pp. 1713–1722.
80. **Doulos. L, Santamouris. M et Livada. I**, 2004, "*Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials*", Solar Energy, Volume 77, pp. 231-249.
81. **Fischetti. M**, 2008, "*Green roofs, living cover*", Scientific American, Volume 298, pp. 104-105.
82. **Ghaffarianhoseini. A, Berardi. U et Ghaffarianhoseini. A**, 2015, "*Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates*", Building and Environment, 87, pp. 154-168.

83. **Gulyas. A, Unger. J et Matzarakis. A**, 2006, "Assessment of the microclimatic and human comfort conditions in a complex urban environment: Modelling and measurements", Building and environment, 41, pp.1713- 1722.
84. **Gupta. R et Gregg. M**, 2012, "Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate", Building and Environment, 55 ,pp. 20-42.
85. **Hage. K-D**, 1975, "Urban-Rural Humidity Differences", Journal of Applied Meteorology, 14, pp.1277-1283.
86. **Hajat. S et Kosatky. T**, 2010, " Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity", J. Epidemiol Community Health, 64(9), pp.753–60.
87. **Havenith. G, Fiala. D, Blazejczy. K, Richards. M, Brode. P, Holmer. I, Rintamaki. H, Benshabat. Y et Jendritzky. G**, 2012, "The UTCI-clothing model", International journal of biometeorology, 56(3), pp. 461–470.
88. **Hartig. T, Mang. M et Evans. G-W**, 1991, "Restorative effects of natural environment experiences", Environ. Behav, 23, pp.3–26.
89. **Heisler. G.M**, 1977, "Trees modify Metropolitan climate and Noise", journal of arboriculture, volume 3 N° 11,
90. **Heisler. G-M, Grimmond. S, Grant. R-H et Souch. C**, 1994, "Investigation of the influence of Chicago's urban forests on wind and air temperature within residential neighborhoods: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project", McPherson. E-G, Nowak. D-J, and Rowntree. R-A, eds. General Technical Report , Northeastern Forest -186, pp. 19-40.
91. **Hidalgo. J, Masson. V, Baklanov. A, Pigeon. G et Gimenoa. L**, 2008, "Advances in urban climate modeling", Annals of the New York Academy of Sciences, pp. 354-374.
92. **Hidalgo. J, Masson. V et Gimeno. L**, 2010, " Scaling the daytime urban heat island and urban- breeze circulation ", Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49(5), pp. 889-901.
93. **Hirashima. S-Q-S, Katschner. A, Ferreira. D-G, De Assis. E-S et Katschner. L**, 2015, "Thermal comfort comparison and evaluation in different climates", 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), July 20-24, Toulouse, France.
94. **Holmer. B et Eliasson. I**, 1999, "Urban-rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands", International journal of climatology, 19, pp. 989– 1009.
95. **Hong. T, Chou. S-K et Bong. T-Y**, 2000, "Building Simulation: an Overview of Developments and Information Sources", Building and Environment, 35, pp. 347-361.
96. **Höppe. P**, 1993, " Heat balance modeling", Experientia, 49(9), pp.741–746.
97. **Höppe. P**, 1999, "The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment", International journal of biometeorology, 43(2), pp.71–5.
98. **Höppe. P**, 2002, "Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort", Energy and Buildings, 34, pp.661-665.
99. **Hoyano. A , He .J** ,2011, "Experimental study of practical applications of a passive evaporative cooling wall with high water soaking-up ability", Building and Environment, 46(1), pp.98-108 .
100. **Huang. J, Cedeno- Laurent. J-G et Spengler. J-D**, 2014, "City Comfort +: A simulation-based method for predicting mean radiant temperature in dense urban areas", Building and Environment, 80.

101. **Jaffal. I, Ouldboukhitine. S.E et Belarbi. R**, 2012, "*A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*", Renewable Energy, vol. 43, p. 157–164.
102. **Jaganmohan. M, Knapp. S, Buchmann. C-M et Schwarz. M**, 2016, "*The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas*", Journal Environment Quality, 45, pp.134–145.
103. **Jendritzky. G, Sönning. W et Swantes. H-J**, 1979, "*Une méthode d'évaluation objective pour décrire l'environnement thermique dans la planification urbaine et paysagère (Modèle Klima-Michel)*", Recherche Spatiale et Aménagement du Territoire, 28, Hanovre, Allemagne.
104. **Jendritzky. G, Menz. H, Schirmer. H et Schmidt-Kessen. W**, 1990, "*Méthode d'évaluation spatiale de la composante thermique dans le bioclimat de l'homme (Modèle KlimaMichel renforcé)*", Landesplan, 114 in J. Biometeorol, 43, 1999, pp. 76-84.
105. **Jendritzky. G, Bröde. P, Fiala. D, Havenith. G, Weihs. P, Batchvarova. E et De Dear. R**, 2010, "*The Universal Thermal Climate Index UTCI*", Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 20, pp.184-188.
106. **Jendritzky. G, Dear. R et Havenith. G**, 2012, "*UTCI: why another thermal index?*", International journal of biometeorology.
107. **Johansson. E**, 2006, "*Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco*", Building and Environment, 41, pp. 1326–1338
108. **Johansson. E, Rohinton. E et Thorsson. S**, 2012, "*Initial development of protocols for the study of outdoor thermal comfort*", 8th international conference on urban climates, Ireland.
109. **Johnson. G-T et Watson. I-D**, 1985, "*The determination of sky view factors in urban canyons*", Journal of climatology 23, pp.329- 335.
110. **Kalmany. Y, Pearlmutter. D et Erell. E**, 2013, "*Impact of Increasing the Height of Tel Aviv Buildings on Pedestrian Comfort and Building Energy Efficiency*", 29th International Conference Passive and Low Energy Architecture (PLEA), Sustainable Architecture for a Renewable Future, 10-12 September, Munich, Germany.
111. **Kántor. N et Unger. J**, 2011, "*The most problematic variable in the course of human- biometeorological comfort assessment—the mean radiant temperature*", Centeurjgeo, 3, pp. 90–100.
112. **Katzschner. L**, "*Urban bioclimate and open space planning*", 2003, The Fifth International conference on urban climate (ICUC), University of Lodz, 1-5 September Lodz.
113. **Katzschner. L**, 2004, "*Open space design strategies based on thermal comfort analysis*", 21st International Conference Passive and Low Energy Architecture (PLEA), 19–22 September, Eindhoven, Pays-Bas.
114. **Kitous. S**, 2006, "*Pour un urbanisme climatique des villes : Cas de la vallée du Mزاب*", acte de colloque, Gardaia, Algérie.
115. **Kleerekoper. L, Esch. M-V and Salcedo. T-B**, 2012, "*How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect*", Resources, Conservation and Recycling, 64, pp. 30-38.
116. **Kolokotroni. M**, 2007, "*The London heat island and building cooling design*", Solar Energy, 87, pp.102-110.

117. **Kondoh. A** et **Nishiyama. J**, 2000, "*Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan Area, Japan*", Advances In Space Research, 26 (7), pp. 1173-1176.
118. **Konopacki. S** et **Akbari. H**, 2001, "*Measured Energy Savings and Demand Reduction from a Reflective Roof Membrane on a Large Retail Store in Austin.*", Report number LBNL-47149, Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
119. **Korosec –Serfaty. P**, 1988, "*La sociabilité publique et ses territoires, Places et espaces publics urbains*", Architecture et Comportement, Vol. 4, n° 2, pp. 11 1-1 32
120. **Koppe. CH**, 2003, "*Les effets de la canicule 2003 sur la santé*", Rapport sur le changement climatique dans le service météorologique allemand.
121. **Kotzenn. B**, 2003, "*Investigation of shade under six different tree species of the Negev, Palestine*", Journal of Arid Environments ,55, pp 231–274.
122. **Kruger. E-L**, **Minela. F-O** et **Rasia. F**, 2011, "Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil", Building and Environment , 46, pp.621–655.
123. **Kuchelmeister. G-S** et **Braatz**, 1993, "*Nouveau regard sur la foresterie urbaine*", Unasylva n° 173, La foresterie urbaine et périurbaine.
124. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Revue internationale des forêts et des industries forestières, 1993 - Vol. 44 - .
125. **Lawson. T-V** et **Penwarden A-D**, 1975, "*The Effects of Wind on People in the Vicinity of Buildings*", in **Blocken. B**, **Carmeliet. J**, 2003, "*Pedestrian Wind Environment around Buildings*", Laboratory of Building Physics Leuven, Belgium.
126. **Lévy. A**, 2005, "*Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine*" , Espaces et sociétés, 4 (122), pp. 25-48.
127. **Lenzholzer. S**, **Koh. J**, 2010, "*Immersed in microclimatic space: Microclimate experience and perception of spatial configurations in Dutch squares*", Landscape and Urban Planning ,95 (1-2),pp. 1-15
128. **Lin. T-P**, 2009, "*Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions*", Build Environment, 44, pp.2017–2026.
129. **Lin. T-P** et **Matzarakis. A**, 2008, "*Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan*", International Journal of Biometeorology, 52, pp.281–290.
130. **Lin. T-Z**, **De Dear. R**, **Matzarakis. A** et **Hwang. R-L**, 2009, "*Prediction of thermal acceptability in hot-humid outdoor environments in Taiwan*", The seventh International Conference on Urban Climate, 29 June - 3 July, Yokohama, Japan.
131. **Lin. T-P**, **Yang. S-R** et **Matzarakis. A**, 2015, "*Customized rating assessment of climate suitability (CRACS): climate satisfaction evaluation based on subjective perception*", International Journal of Biometeorology, 59, pp.1825–1837.
132. **Lin. T-P**, **Yang. S-R**, **Chen.Y-C** et **Matzarakis. A**, 2018, "*The potential of a modified physiologically equivalent temperature (PET) based on local thermal comfort perception in hot and humid regions*", Theoretical and Applied Climatology, pp. 1-4.
133. **Lindberg. F**, **Thorsson. S** et **Holmer B**, 2008, "*SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings*", International Journal of Biometeorology, 52, pp.697-713.
134. **Littlefair. P**, 1998, "*Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city*", Renewable and Sustainable Energy Review, 2(3), pp.303-326.

135. **Livesley. S-J, Baudinette. B et Glover. D**, 2014, "*Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees: The impacts of canopy density and bark type*". Urban Green, 13, pp.192-197.
136. **Livesley. S-J, McPherson. E-G et Calfapietra. C**, 2016, "*The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale*", Journal of Environmental Quality, Vol. 45 n°1, p. 119-124.
137. **Liu.K., Bass. B**, 2005, "*Performance of green roof systems*", Cool Roofing Symposium, May 12-13, Atlanta, GA, pp. 1-18
138. **Lu. J**, 1997, "*A laboratory study of the urban heat island in a calm and stably stratified environment. Part I: Temperature field*", Journal of Applied Meteorology, 36 (10), pp. 1377–1391.
139. **Makaremi. N, Salleh. E, Jaafar. MZ et GhaffarianHoseini. A**, 2012, "*Thermal comfort conditions of shaded outdoor spaces in hot and humid climate of Malaysia*", Build Environment, 48, pp. 7–14.
140. **Malys. L, Musy. M, et Inard. Ch**, 2016, "*Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, Green Walls and Green Roofs*", Energies, 9, 32, pp.1-2.
141. **Martens. R, Bass. B, Alcazar. S-S**, 2008, "*Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance*", Urban Ecosyst, 11, pp.399-408.
142. **Martinelli. L, Matzarakis. A**, 2017, "*Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones*", Sustainable Cities and Society, 29, pp. 97–106.
143. **Masmoudi. S, Mazouz. S**, 2004, "*Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings. The case of arid region*", Energy and Buildings, 36, pp.710-719.
144. **Mathai. A, Rabadi. N, Grosland. N**, 2004, "*Digital Human Modeling and Virtual Reality for FCS*", Technical Report, n°.VSR-04.02, chapter 12.
145. **Matzarakis. A, Mayer. H**, 1997, "*Heat stress in Greece*", International Journal of Biometeorology, 41, pp.34–39.
146. **Matzarakis .A, Mayer. H, Iziomon. M-G**, 1999, "*Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature*", International Journal of Biometeorology, 43, pp.76-84.
147. **Matzarakis .A, Rutz. F, Mayer. H**, 2007, "*Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model*", International Journal of Biometeorology, 51, pp.323–334.
148. **Matzarakis. A, Rutz. F, Mayer. H**, 2006, "*Modeling the thermal bioclimate in urban areas whit the RayMan Model*", The 23rdConference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 September, Genève, Suisse.
149. **Matzarakis .A, Rutz. F, Mayer. H**, 2007, "*Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model*", International Journal of Biometeorology, 51(4).
150. **Matzarakis. A, Amelung. B**, 2008, "*Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans*", in: Thomson. MC, García, Herrera R, Beniston M, editors. *Seasonal forecasts, climatic change and human health*. Netherlands.
151. **Matzarakis. A, Matuschek. M, Neumcke. R, Rutz. F, Zalloom.M, Endler. C**, 2008, "*Tools for biometeorological and climatological studies*", Proceedings 18th International Congress on Biometeorology, 22-26 September, Tokyo, Japan.

152. **Matzarakis .A, Rutz. F, Mayer. H**, 2010, "*Modeling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model*". International journal of biometeorology, 54(2), pp. 131-139.
153. **Matzarakis. A, Stefan Muther. S, Rutz. F**, 2014, "*Application and comparison of UTCI and pet in temperate climate conditions*", Finisterra XLIX, 98, pp. 21-31.
154. **Mayer .H, Höppe. P**, 1987, "*Thermal comfort of man in different urban environments*", Theoretical and Applied Climatology, 38, pp. 43-49.
155. **Mayer. H**, 1993, "*Urban bioclimatology*", Experientia, 49, pp. 957 -63.
156. **Mayer. H, Matzarkis. A et Iziomon. M-G**, 2003, "*Spatio-temporal variability of moisture conditions within the urban canopy layer*", Theoretical and Applied Climatology, 76, pp.165–179.
157. **McPherson. G, Muchnick. J**, 2005, "*Effect of street tree shade on asphalt concrete pavement performance*", Journal of arboriculture, vol.31, n°6, pp. 303-310.
158. **McPherson. G, Simpson. J.R, Peper. P.J, Mco. S.E, Siao. Q**, 2005, "*Municipal forest benefits and costs in Five US Cities*", Journal of Forestry, Vol.103 n°8, pp.411-416.
159. **McPherson. G, Simpson. J.R, Xiao. Q et Wu. C**, 2011, "*Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment*", Landsc. Urban Plan, pp. 99:40.
160. **Memon. R.A, Leung. D.Y, et Liu. CH**, 2008, "*A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island*", Journal of Environmental Sciences, 20, pp. 120-128.
161. **Memon. R.A et Leung. D.Y**, 2010, "*Impacts of environmental factors on urban heating*", Journal of Environmental Sciences, 22(12), pp. 1903–1909.
162. **Mochida. A, Murakami. S, Ooka. R, et Kim. S**, 1999, "*CFD study on urban climate in Tokyo, -effects of urbanization on climatic change*", In Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering, 21–24 June, Copenhagen, Denmark, pp.1307–1314.
163. **Mohcen. M.A**, 1979, "*Solar radiation and courtyard house form II: Application of the model*", Building and Environment, Vol 14, pp. 185- 201.
164. **Morris. C, Simmonds. I, et Plummer. N**, 2001, "*Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city* ", Journal of Applied Meteorology, 40(2), pp. 169–182.
165. **Moonen. P, Defraeye. T, Dorer.V, Blocken.B, et Carmeliet. J**, 2012, "*Urban physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand*", Frontiers of Architectural Research, 1, pp. 197-228.
166. **Muhaisen. A.S**, 2006, "*Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions*", Build Environ, 41(12), pp.1731-41.
167. **Muhaisen, A.S, Gadi. M.B**, 2006, "*Shading performance of polygonal courtyard forms*", Build Environ, 41(8), pp.1050-9.
168. **Nadimi. M, Yaghoubzadeh. N**, 2014, "*Review article comparing climatic indices ; mahoney , evans, biker, effective temperature and givoni in rasht city*", 3, pp.684-698.
169. **Nakamura. Y, Oke. T.R**, 1988, "*Wind, temperature and stability conditions in an east west oriented urban canyon*", Atmospheric Environment, 22 (12), pp.2691-2700.
170. **Napoli M, Massetti. L, Brandani. G, Petralli. M et Orlandini. S**, 2016, "*Modeling tree shade effect on urban ground surface temperature*", Journal Environment Quality, 45, pp.146-156.
171. **Nasar. JL, Fisher. B, Grannies. M**, 1993, "*Proximate physical cues to fear of crime*", Landscape and urban planning, 26, pp.161-178.

172. **Nichol. J.E**, 1996, "*High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a Tropical city: a satellite-based study*". Journal of Applied Meteorology 35, pp.135–146.
173. **Nishimura. N, Nomura. T, Iyota. H et Kimoto. S**, 1998, "*Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology*", Solar Energy, 64(4), pp.197-207.
174. **Nazarian. N**, 2017, "*Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature*", Urban Climate.
175. **Nikolopoulou. M, Steemers.K**, 2003, "*Thermal comfort and psychological adaptation as guide for designing urban spaces*", Energy and Buildings, 35, pp.95-101.
176. **Nikolopoulou. M, Baker. N, Steemers. K**, 2004, "*Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter*", Solar Energy, 70(3), pp. 227-235.
177. **Nikolopoulou .M, Lykoudis. S et Kikira. M**, 2004, "*Thermal Comfort Models for Open Urban Spaces*", In: CEE, Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach, Centre for Renewable Energy Sources, Greece.
178. **Nikolopoulou. M, Lykoudis. S**, 2006, "*Thermal comfort in outdoor spaces: analysis across different European countries*", Build Environment ,41(11), pp. 1455–147.
179. **Nikolopoulou. M**, 2008, "*Architecture and outdoor thermal comfort*", Proceedings of the Workshop: Thermal Comfort in Urban Planning and Architecture under Consideration of Global Climate Change , 20-21 Fevrier, KASSEL Germany.
180. **Norton. B.A, Coutts. A.M, Livesley. S.J, Harris. R.J, Hunter. A.M et Williams. N.S.G**, 2015, "*Planning for cooler cities: A framework to priorities green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes*", Landsc. Urban Plan, 134, pp.127-138.
181. **Nowak. D.J, Crane. D.E et Stevens. J.C**, 2006, "*Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States*", Urban Green, 4, pp.115–123.
182. **Nunez. M, Oke.T.R**, 1976, "*Long-wave radiation flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere*", Boundary- Layer-Meteorology, 10, pp.121-135.
183. **Nunez. M, Oke. T.R**, 1977, "*The energy balance of an urban canyon*", Journal of applied meteorology, 16, pp.11-19.
184. **Ochoa De la Torre. J.M et Serra. R**, 1998, "*Microclimatic analysis of some urban scenarios*", Environmentally Friendly Cities, proceedings of PLEA, Lisbon, Portugal, pp.159-162.
185. **Oke. T.R, Maxwell. G.B**, 1975, "*Urban Heat Island Dynamics in Montreal and Vancouver*", Atmospheric Environment, 9, pp. 191-200.
186. **Oke. T.R, 1976**, "*The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands*", Atmosphere, 14(4), pp. 268-277.
187. **Oke, T.R**, 1988, "*Street design and urban canopy layer climate*", Journal of Energy and Buildings, pp.103-113
188. **Oke. T.R, Johnson. G.T, Steyn. D.G, et Watson. I.D**, 1991, "*Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night – part 2: Diagnosis and causation*". Boundary Layer Meteorology, 56 (3), pp. 275-294.
189. **Oke. T.R**, 2004 "*Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*", World Meteorological Organization, Instruments and observing methods, report n°81.

190. **Oke. T.R**, 2006, "*Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*", World Meteorological Organization, Report n°81, 1250.
191. **Oke. T.R, Yasa. E, Özgunler. M**, 2008, "*An experimental study of the effects of surface openings on air flow caused by wind in courtyard buildings*", Architectural science review, 51(3), pp.263–268.
192. **Oliveira. S, Andrade. H**, 2007, "*An initial assessment of the bioclimatic comfort in an outdoor public space in Lisbon*", International journal of biometeorology, 52, pp. 69–84.
193. **Parsons. R**, 1991, "*The potential influences of environmental perception on human health*", J. Environ. Psychol, 11, pp.1–23.
194. **Ratti. C, Baker. N et Steemers. K**, 2005, "*Energy consumption and urban texture*", Energy and Buildings, 37 (7), pp.762-76.
195. **Rempel. A.R, Rempel. A.W, Gates. K.R et Shaw. B**, 2016, "*Climate-responsive thermal mass design for pacific northwest sunspaces*", Renewable Energy, 85, pp. 981–993.
196. **Robitu. M, Inard. Ch, Musy. M et Groleau. D**, 2003, "*Energy balance study of water ponds and its influence on building energy consumption*", Eighth International IBPSA., August 11-14, Conference Eindhoven, Netherlands.
197. **Robitu. M, Musy M. Inard. Ch et Groleau. D**, 2006, "*Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate*", Solar Energy, 80, pp 435–447.
198. **Rosenfeld. A, Akbari. H et Bretz. S**, 1995, "*Mitigation of urban heat island: materials, utility programs, updates*", Energy and Buildings, 22, pp. 255-265.
199. **Rowan. A, Rowntree et David. J**, 1991, "*Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide*", Nowak Journal of Arboriculture, 17(10), pp.269-275.
200. **Penicaud. H**, 1978, "*Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments. Paris: Plan construction*", RAUC.
201. **Penwarden. A.D**, 1975, "*Wind environment around buildings*", Building Research Establishment Report, Department of the environment, Her Majesty's Stationery Office, London.
202. **Perini. k, Magliocco. A**, 2014, "*Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort*", Urban Forestry and Urban Greening, 13, pp. 495–506 .
203. **Plate. E. J et Kiefer. H**, 2001, "*Wind loads in urban areas.*" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(14-15), pp. 1233-1256.
204. **Picot. X**, 2004, "*Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy*", Energy and Buildings, 36, pp. 329-334.
205. **Pomerantz. M.B, Pon. B, Akbari. H et Chang. S.C**, 2000, "*The Effect of Pavements temperatures on Air temperatures in Large Cities*", Heat Island Group Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720.
206. **Ratti. C, Baker. N, Steemers.K**, 2005, "*Energy consumption and urban texture*", Energy and buildings ,37 (7), pp.762-776
207. **Rizwan. A. M, Dennis. L.Y.C et Liu. C**, 2008, " *A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island* ", Journal of Environmental Sciences ,20 (1), pp.120- 128.
208. **Rose. K.A, Morgan. I.G, Ip. J, Kifley. A, Huynh. S, Smith. W et Mitchell. P**, 2008, "*Outdoor activity reduces the prevalence of myopia in children*", Ophthalmology, 115, pp.1279–1285.

209. **Runnals. K.E, Oke. T.R**, 2000, "*Dynamics and Control of the Near-Surface Heat Island of Vancouver, British Columbia*", Physical Geography journal, 21, pp. 283-304.
210. **Salata. F, Golasi. I, de Lieto Vollaro. R, De Lieto Vollaro. A**, 2016, "*Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy*", Build Environ, 96, pp.:46–61.
211. **Sánchez de la Flor. F, Dominguez. S. A**, 2004, "*Modeling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings*", Energy and Buildings, 36, pp 403–413.
212. **Sanusi. R, Johnstone. D, May. P et Livesley. S.J**, 2016, "*Street orientation and side of the street greatly influence the microclimatic benefits street trees can provide in summer*", J. Environ. Qual. 45, pp.167–174.
213. **Santamouris. M, Papanikolaou. N, Livada. I, Koronakis. I, Georgakis. C, Argiriou. A, et Assimakopoulos. D.N**, 2001 "*On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings*", Solar Energy, 70 (3), pp. 201–216.
214. **Santamouris. M, Pavlou. C, Doukas. P, Mihalakakou. G, Synnefa. A, Hatzibiros. A et Patargias. P**, 2007, "*Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece*". Energy 32, pp.1781–1788.
215. **Santamouris. M**, 2013, "*Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island- A review of the actual developments*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, pp.224-240.
216. **Sasaki. K, Yumino. S, Mochida. A**, 2015, "*Influence of physical properties of vertical wall surfaces on human thermal sensation based on field measurements and microclimate simulation*", 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), July 20-24, Toulouse, France.
217. **Shahab Kariminia. A, Sabarinah. SH, Ahmad Reza Saberi. A**, 2015, "*Microclimatic conditions of an urban square: role of built environment and geometry*", Procedia - social and behavioral sciences, 170, pp. 718-727.
218. **Fairuz Shahidan. M, Jones. P.J, Gwilliam. J, Salleh. E**, 2012, "*An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of trees with ground materials*", building and environment, 58, pp.245-257.
219. **Sharmin. T, Steemers. K, Matzarakis. A**, 2015, "*Analysis of microclimatic diversity and outdoor thermal comfort perceptions in the tropical megacity dhaka, bangladesh*", building and environment, 94, pp.734-750.
220. **Shashua-Bar. L, Hoffman. M.E**, 2003, "*Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets whit trees*", Energy and Buildings, 35, pp. 61– 68.
221. **Shashua-Bar. L, Potchter. O, Bitan. A, Boltansky. D, et Yaakov. Y**, 2006, "*Climatic performance of urban trees under various building densities in the Mediterranean climate- an empirical and analytical study in Tel-Aviv*", Sixth International conference on urban climate, p 248.
222. **Shashua-Bar. L, Pearlmutter. D et Erell. E**, 2011, "*The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment*", Int. J. Climatol, 31, pp.1498–1506.
223. **Sharmin .T**, 2014, "*Harmonious accordance of indoor-outdoor thermal comfort and building energy performance by ameliorating urban microclimate in different urban block types in tropical climate*", 8th International Conference on Urban Climate, Venice.

224. **Shashua-Bar. L, Tsiros. I.X, Hoffman. M**, 2012, "*Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a Mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions*", Building and Environment, 57, pp.110-119.
225. **Shaviv. E, Yezioro. A, Capeluto. I.G**, 1996–1998, "*Climatic and energy aspects of urban design in hot humid region*", Technion Research and Development Foundation, Haifa, Palestine.
226. **Shimoda. Z**, 2003, "*Adaptation measures for climate change and the urban heat island in Japan's built environment*", Building Research & Information, 31 (3–4), pp. 222–23
227. **Shiraishi. Y, Kagawa. H, Nakano. J**, 2005, "*Evaluation of outdoor thermal environment for sustainable region planning in kitakyushu, Science and research park*", PLEA environment sustainability the challenge of awareness in developing societies, 13-16 November, Beirut, Lebanon.
228. **Shishegar .N**, 2013, "*Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons*", Journal of Clean Energy Technologies, vol.1, n° 1.
229. **Syrios. K et Hunt. G.R**, 2008, "*Passive air exchanges between building and urban canyon via openings in a single façade*", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol.29, pp. 364–373.
230. **Solecki. W.D, Rosenzweig. C, Parshall. L, Pope. G, Clark. M, Cox. J et Wiencke. M**, 2005, "*Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey*", Environ. Hazards, 6. Pp.39–49.
231. **Stanhill. G, Kalma. J.D**, 1995, "*Solar dimming and urban heating at Honk Kong*", International journal of climatology, 15, pp.933-941.
232. **Stemers K.A**, 1996, "*Low energy urban design, in Solar Energy in architecture and urban planning*", proceedins of 3th European conference on architecure, Florence ,Italy, pp.501-504
233. **Streiling. S, Matzarakis. A**, 2003, "*Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of city*," Journal of Arboriculture 29 (6), pp. 311- 316.
234. **Sugawara. H, Shimizu. S, Takahashi. H, Hagiwara. S, Narita. K, Mikami. T et Hirano. T**, 2016, "*Thermal influence of a large green space on a hot urban environment*", J. Environ. Qual, 45, pp.125–133.
235. **Stromann-Andersen. J et Sattrup. P.A**, 2011, "*The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains*", Energy and Buildings, 43, pp.2011–20.
236. **Sun.R, Chen.L**, 2012. "*How can urban water bodies be designed for climate adaptation?*" , Landscape and Urban Planning, 105 (1–2), pp.27-33.
237. **Svensson. M.K**, 2004, "*Sky view factor analysis- Implication for urban air temperature difference*", Meteorol.Appl, 11, pp 201- 211.
238. **Synnefa. A, Santamouris. M, Livada. I**, 2006, "*A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment*", Solar Energy, 80, pp. 968–981.
239. **Swaid. H**, 1992, "*Intelligent urban forms (IUF), A new climate-concerned, urban planning strategy*", Theoretical and Applied Climatology, 46, pp.179–191.
240. **Taha. H, Akbari. H, Rosenfeld. A, Huang. J**, 1988, "*Residential Cooling Loads and the Urban Heat Island the Effects of Albedo*", Building and Environment, 23(4), pp. 271-283.

241. **Taha.H, Konopacki.S, Gabersek.S**, 1996, "*Modeling the meteorological and energy effects of urban heat islands and their mitigation: a 10 region study*", report LNBL-44222. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.
242. **Taha. H**, 1997(a), "*Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat*", Energy and Buildings, 25(2), pp.99-103.
243. **Taha. H**, 1997(b), "*Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin*", Atmospheric Environment, 31(11), pp. 1667-1676.
244. **Tahbaz. M**, 2006, "*Architecture of shadows*", Living in deserts, is sustainable urban design still possible in arid hot region, acte de séminaire international, Ghardaia, Algérie.
245. **Tahbaz. M, Djalilian. S, Mousavi. F**, 2014, "*Outdoor microclimate observation for thermal comfort in harsh desert conditions a study in kasha, Iran*", Civil Engeneering and Architecture, 2(8), pp.284-303.
246. **Taleghani. M, Tenpierik. M, Kurvers. S et Van Den Dobbelsteen, A**, 2012, "*Environmental impact of courtyards: a review and comparison of residential courtyard buildings in different climates*", Journal of green building", vol.7, n°2, pp. 113-136.
247. **Taleghani. M, Tenpierik. M, Kurvers. S et Van Den Dobbelsteen. A**, 2013, "*A review into thermal comfort in buildings*", Renew Sustain Energy Rev, 26(0), pp.201–215.
248. **Taleghani. M, Sailor.D.J, Tenpierik.M, Van den Dobbelsteen.A**, 2014(a), "*Thermal assessment of heat mitigation strategies: the case of Portland state university, Oregon, USA*", Build environment,73,pp.138- 150.
249. **Taleghani. M, Tenpierik. M, Van Den Dobbelsteen .A, Sailor. DJ**, 2014(b), "*Heat in courtyards: a validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands*", Sol Energy, 103, pp.108–124.
250. **Takebayashi. H, Kimura. Y, Kyogoku. S**, 2014, "*Study on the appropriate selection of urban heat island measure technologies to urban block properties*", Sustainable Cities and Society, 13, pp.217-222.
251. **Taleghani. M, Kleerekoper. L, Tenpierik. M, Van Den Dobbelsteen. A**, 2015, "*Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands*" Build Environment, 83, pp. 65–78.
252. **Theeuwes. N**, "*A breath of fresh air in UHI studies*", 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse, 2015.
253. **Thorsson. S, Knez. I**, 2006, "*Influence of culture and environmental attitude on thermal_ emotional and perceptual evaluations of outdoor places*", Sixth international conference on urban climate, proceeding 204, Sweden.
254. **Thorsson.S, Lindqvist. M, Lindqvist. S**, 2006, "*Thermal bioclimatic conditions and patterns of behaviour in an urban park in Göteborg, Sweden*", International Journal of Biometeorology, Berlin.
255. **Thorsson.S, Rocklöv. J, Konarska. J, Lindberg. F, Holmer. B, Dousset. B, Rayner. D**, 2014, "*Mean radiant temperature—a predictor of heat related mortality*", Urban Climate, 10(0), pp. 332–45.
256. **Toparlar. Y, Blocken. B, Janssen. W, van Hooff. T, Montazeri. H et Timmermans. H**, 2013, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, August 26-28, Chambéry, France.
257. **Todhunter. P.E**, 1990, "*Microclimatic Variations Attributable to Urban Canyon Asymmetry and Orientation*", Physics and Geography, vol. 11, pp.131-141.

258. **Tsianaka. E**, 2006, “*The Role of Courtyards in Relation to Air Temperature of Urban Dwellings in Athens*”, The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 Septembre, Genève, Suisse.
259. **Tsitoura. M, Michailidou. M, Tsoutsos. T**, 2011, “*Evaluation of comfort conditions and sustainable design of urban open spaces in Crete*”, Architecture and sustainable development, Proceedings of PLEA, Louvain-la-Neuve, Belgium.
260. **Tsuyoshi. H**, 2009, “*Thermal comfort outdoor environment*”, Global environmental research, 13, pp. 43-47.
261. **Urban. A, Kysely. J**, 2014, “*Comparison of UTCI with Other Thermal Indices in the Assessment of Heat and Cold Effects on Cardiovascular Mortality in the Czech Republic*”, Int J Environ Res Public Health, 11(1), pp. 952–967.
262. **Van Esch. M. M. E, Looman. R. H. J, De Bruin-Hordijk. G. J**, 2012, “*The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies*”, Energy and Buildings, 47, pp. 189-200.
263. **Vanos. J.K, Kalkstein. L.S, Sanford. T.J**, 2014, “*Detecting synoptic warming trends across the US Midwest and implications to human health and heat-related mortality*”, International Journal of Climatology.
264. **Voogt. J.A, Oke. T.R**, 2003, “*Thermal Remote Sensing of Urban Areas*”, Remote Sensing of Environment, 86, pp. 370-384.
265. **Westerberg. U**, 2004, “*Climatic Planning - Physics or Symbolism*”, Arch. & Comport, 10(1), pp. 49 – 71.
266. **Westerberg. U**, 1994, “*Climatic planning—physics or symbolism?*”, Architecture and Behavior, 19, pp. 49-72.
267. **Wong. N.H**, 2008, “*Reducing urban heat islands: compendium of strategies, urban heat island basics*”, United States Environmental Protection Agency (USEPA) USEPA, Washington, DC, 19p.
268. **Yahia. M.W, Johansson. E**, 2013, “*Evaluating the behaviour of different thermal indices by investigating various outdoor urban environments in the hot dry city of Damascus, Syria*”, International Journal of Biometeorology, 57, pp. 615–630.
269. **Yahia. M.W, Johansson. E**, 2014, “*Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria, the example of residential spaces with detached buildings*”, Landscap Urban Plan, 125, pp.1-16.
270. **Yahia. M.W, Johansson. E, Thorsson. S, Lindberg. F et Rasmussen. M.I**, 2018, “*Effect of urban design on microclimate and thermal comfort outdoors in warm-humid dar es salaam, Tanzania: special issue on trans-disciplinary approaches to climate change*”, Int. j. biometeorol, 62, pp.373–385.
271. **Yang. W, Wong. N.H, Jusuf. S.K**, 2013, “*Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore*”, Building and Environment, 59, pp. 426-435.
272. **Yezioro.I, Capeluto. G, Shaviv. E**, 2006, “*Design guidelines for appropriate insolation of urban squares*”, Renwable Energy, Volume 31, pp 1011-1023.
273. **Yoshida. A, Tominaga K et Watani. S**, 1990-91, “*Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season,*” Energy and Buildings, vol. 15-16, pp. 417-423,.
274. **Zacharias. J, Stathopoulos. T**, 2004, “*Spatial behavior in San Francisco’s plazas the effects of microclimate, other people, and environmental design*”, Environment and Behavior, 36 (5), pp. 638-658.
275. **Zacharias. J, Stathopoulos, T, Wu. H**, 2001, “*Microclimate and downtown open space activity*”, Environment and Behavior, 33, pp. 296-315.

276. **Zeng. Y, Dong. L**, 2015, "*Thermal human biometeorological conditions and subjective thermal sensation in pedestrian streets in Chengdu, China*", *International Journal of Biometeorology*, 59, pp. 99 –108.

Revue et Encyclopédies

1. **Auzelle. R**, 1950, "*L'implantation des bâtiments à usage d'habitation*", la vie urbaine, n° 57.
2. **Bonavitacola. M**, 2000/2001, "*Vers un indice de la qualité des sites du point de vue de la pollution lumineuse*", revue Pulsar, éditée par la Société d'Astronomie Populaire. Toulouse.
3. **Boutefeu. E**, 2008, "*Ville, santé et réchauffement climatique : La ville du XXème siècle, un modèle en voie d'extinction*", Les cahiers de l'agenda santé, Juin, Lyon métropole n°10.
4. **Candas. V**, 2008/09, "*Confort thermique*", Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 9 085.
5. **Cantat. O**, 1993, "*Conséquences climatiques des variations du bilan d'énergie en région parisienne*", Géographie physique et environnement, n°1, pp. 19-36.
6. **Cantat. O**, 2004, "*L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps*", Norois.
7. **Cao. L, Caldeira. k**, 2010/07, "*Atmospheric carbon dioxide removal: long-term consequences and commitment*, Environmental Research Letters 5", Science et vie.
8. **Chaon. A**, 2007/04, "*Avec deux degrés supplémentaires, la planète chauffe*", Agence France presse.
9. **Dettwiller. J**, 1978, "*L'évolution séculaire de la température à Paris*", La Météorologie, n°13, pp. 95-130.
10. **Hegger. M, Stark. T, Fuchs. M, et Zeumer. M**, 2001, "*Construction et énergie : architecture et développement durable*", presse polytechniques et universitaire romandes, édition débit, Lausanne, Suisse.
11. **Helas-othenin .N**, 2007, "*Énergie et logements sociaux. En quoi les logements sociaux sont une bonne structure pour développer de bonnes pratiques énergétiques?*", revue de l'école Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, p.6.
12. **Hutchon. N.B**, Mars 1972, "*Température ambiante et bien être*", Environnement canada.
13. **Iselin. D.C**, 1989, "*Installation design: improving the visual environment, engineering and design for real property facilities*", us government printing office (0), pp.241-303.
14. **Kergomard. C**, 2007/12, "*A chaque ville son microclimat*", Sciences et avenir, n° 730, Paris.
15. **Larousse dictionnaires encyclopédiques** tome III. 1970, édition librairie Larousse canada 1970.
16. **Laval. K**, 2001 /02, "*Le cycle de l'eau, cause ou conséquence du climat*", Supplément, L'eau de tous les enjeux, n° 390.
17. **Lussault. M, Calenge. C, Pagand. B**, 1997, "*Figures de l'urbain. Des villes, des banlieues et leurs représentations*", Tours : Maison des Sciences de la ville, pp. 35-65.
18. **Mazari. A**, 2006, "*80% des Algériens habiteront dans les villes*", Le Quotidien d'Oran 17/01.
19. **Meerow. A.W et Black. R.J**, 1991, "*Paysage pour conserver l'énergie : un guide du microclimat*", Energy Information Document 1028.

20. **McPherson. E.G**, 1994, "*Cooling urban heat islands with sustainable landscapes*". In: *The ecological city: preserving and restoring urban biodiversity*, Rowntree. R.A, Platt. R.H, Muick. P.C, The University of Massachusetts Press, Amherst, pp.151-171.
21. **Réseau National de Surveillance Aérobiologique (R.N.S.A)**, 2009, *Guide d'information de la végétation en ville. Le réseau*, St-Genis l'Argentière, France, 68p.
22. **Pressman. N**, 2004, "*Facteurs climatiques dans l'aménagement urbain*", Arch. & Comport. Vol. 10, n°1, p. 9-119.
23. **Salat. S et Nowacki. C**, 2010, "*De l'importance de la morphologie dans l'efficacité énergétique des villes, Énergie et territoires ou comment construire les territoires de demain face à la nouvelle donne climatique et énergétique, De Nouveaux outils, de nouveaux concepts*", Liaison Energie- Francophonie n°86.
24. **Voogt. J.A**, 2002, "*Urban Heat Island*", *Encyclopedia of Global Environmental Change*, Vol. 3, John Wiley and Sons, Chichester.
25. **Westerberg. U**, 2004, "*Climatic Planning - Physics or Symbolism*", Arch. & Comport. Vol. 10, n°1, pp. 49 – 71.

Mémoires et Thèses*

1. **Abdou. S***, 2004, Investigation sur l'intégration climatique de l'habitat traditionnel en région aride et semi aride d'Algérie, Thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine.
2. **Ahmed Ouameur. F**, 2007, Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : étude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec, Mémoire de maîtrise en science de l'architecture, Université Laval, Québec.
3. **Aizenberg. A**, 1999, Development of climatic urban design guidelines based on the analytical CTTC model for prediction of air temperature variations, M.Sc. Thesis, Technion, Haifa, Palestine.
4. **Athamna. K**, 2008, Indicateurs pour l'analyse de la contribution d'un projet urbain à l'îlot de chaleur, Mémoire de Master II, ensa Nantes.
5. **Bagneid. A**, 2006, The creation of a courtyard microclimate thermal model for the analysis of courtyard houses, phd thesis, texas a&m university.
6. **Belatreche. T**, 2006, Effets thermo radiatifs et caractérisation microclimatiques des cours intérieures dans les édifices publics, Thèse de magistère, université Mentouri, Constantine.
7. **Benadji. A**, 1999, Adaptation climatique ou culturelle en zones arides : cas du Sud-est Algérien, Thèse de Doctorat, Université de d'Aix-Marseille.
8. **Benzerzour. M**, 2004, Transformations urbaines et variations du microclimat: application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur morphoclimatique, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes.
9. **Bergström. F**, 2004, How people's concepts of urban places. Relate to their evaluations of the places' aesthetics and microclimate, Thèse de magistère en sciences cognitives, université Linköping, Suède.

* Les thèses marquées par un Astérix (*) ne sont pas consultables en ligne.

10. **Boumaouche. N**, 2006, Prise en compte de l'humidité dans le projet de réhabilitation des maisons vernaculaires. Cas de la médina de Constantine, Thèse de magistère, Université Mentouri, Constantine.
11. **Boussoualim. A**, 2002, Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur. Étude de cas à Blagnac, Thèse de doctorat, GRECO - Ecole d'Architecture de Toulouse.
12. **Bouyer. J**, 2009, Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.
13. **Brown. R.D**, 1982, Application of Human Thermal Comfort to Landscape Architecture: A New Approach MLA thesis, University of Guelph.
14. **Clement. J. N**, 2004, Sociale, restorative and safe places, thèse de magister, Université de Florida.
15. **Doya. M**, 2010, Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense, Université de La Rochelle. Thèse de Doctorat.
16. **Ernest. R**, 2011, The role of multiple courtyards in the promotion of convective cooling, phd thesis, uk: university of Nottingham.
17. **Glockner. S**, 2000, Contribution à la modélisation de la pollution atmosphérique dans les villes, Thèse de doctorat, Université Bordeaux.
18. **Harisson. A.M**, 2004, Designing With Climate, Using Parking Lots to Mitigate Urban Climate, Master of Landscape Architecture Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
19. **Hidalgo Rodriguez. J**, 2008, Une approche observationnelle, numérique et théorique de la circulation de brise urbaine diurne pour les villes continentales, Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
20. **Kedissa. CH**, 2010, Impact de la géométrie des espaces extérieurs sur le microclimat urbain :Cas des places, Thèse de magistère, Université Mentouri, Constantine.
21. **Le Bras. J**, 2015, Le microclimat urbain à haute résolution: mesures et modélisation, Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier.
22. **Louafi. S**, 2005, Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective : Cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli Constantine, Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine.
23. **Masmoudi. S***, 2003, Relation entre géométrie urbaine ,végétation et confort thermique extérieur, Thèse de Magistère, Université Mohamed Kheidar, Biskra.
24. **Pigeon. G**, 2007, Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine- projets CLU-Escompte et Capitoul, Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier.
25. **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.
26. **Ringebach. N**, 2004, Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
27. **Rullier. F**, 2012, Place du paysagiste en ville dans un contexte de réchauffement global, Mémoire de fin d'études, AgroCampus ouest, Angers France
28. **Tabani. H**, 2006, Impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique des espaces urbains publics: Cas du cours de la révolution d'Annaba, Thèse de Magister, Université Mentouri, Constantine.

29. **Tadjari. A.F**, 1999, La place publique comme pièce maîtresse de la cohérence de la continuité urbaine, Thèse de magister, Université de Sétif.
30. **TIRAOU. L**, 2000, Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains, Thèse de Doctorat, Université de Nantes.
31. **Tsoka, S**, 2011, Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons: application au cas des éco-quartiers, Mémoire de Master, Université de Nantes.
32. **Vinet. J**, 2000, Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, Thèse de doctorat, Université de Nantes.
33. **Zekri. E**, 2010, Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain, Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Sites Web

1. **Acta Scientiarum**, Climatology, v.1, n°27, p. 1-18, 2007.(19) *Technology* <https://www.researchgate.net/publication/236847951>
2. **Adnsp** n° 45, 2003, [http:// www. Adnsp.fr](http://www.Adnsp.fr)
3. **APRUE**, Consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, la situation énergétique régionale, chiffre 2013, édition 2015, <http://www.APRUE.org.dz>
4. **Architectural Requirements**, 2015, Building design town of Cornelius land development code, Chapter 4, 10/19 pp.4-1, <http://www.cornelius.org/DocumentCenter>
5. **Azar.S**, Townscope Help and user's manual, <http://www.townscope.com>.
6. **Urban Vegetation Antonella Bellomo**, 1998 , *environnement* , [http:// www. My best life.com](http://www.Mybestlife.com), page consultée 15/12/2015
7. **Bruse. M**, 2009. ENVI-met 3.0: Updated model overview. University of Bochum, <http://www.envi-met.com>
8. **Bruse. M**, 2004 , <http://www.envimet.com>.
9. **Calzada, J. R, Roset. J, Ochoa et Serra**, "Vegetation influences on the human thermal comfort in outdoor spaces", Proceedings EPIC'98, Lyon, France <http://dfa.upc.es/personals/jroset/lyonvege>.
10. **Cantat. O**, 1987, " *Téledétection spatiale et microclimats – Le cas de la région Ile-de France*", Institut d'aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile de France (IAURIF), 190 p, <https://www.iau-idf.fr>
11. **Cavayas. F** et **Baudouin.Y**, 2008, "Etude des biotopes urbaines", Conseil régional de l'environnement de Laval (CREL), 2008, <http://www.cmm.qc.ca/biotopes>
12. **Compagnon. R** , **Goyette-Pernot. J**, 2004, " *Confort visuel dans les espaces urbains*", résultat du projet RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces- coordonné par le CRES, Département des bâtiments, <http://alpha.cres.gr/ruros>
13. **CSTB**, 2010, " *Trnsys-17-une-percee-dans-la-modelisation-thermique-de-batiments*" [http://www.cstb.fr/archives/ édition-du-14-decembre- 2010](http://www.cstb.fr/archives/édition-du-14-decembre-2010)
14. **Den J**, 2013, physiologie / thermorégulation, [http:// www.tsp7.net](http://www.tsp7.net)
15. **De Souza. L.C.L, Pedrotti. F.S** et **Leme. F.T**, " *Urban geometry and electrical energy consumption in a tropical city*", American Meteorological Society - AMS supported meetings. State University of São Paulo, Bauru-SP, Brazil, <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/80344.pdf> .
16. **Energy Research Group**, [http:// www.erg.ucd.ie](http://www.erg.ucd.ie).

17. **Fröhlich.D, Matzarakis. A**, 2017, "*RayMan Pro manuel A tool for Applied Climatology*", <http://www.meteo-uni.freiberg.de>.
18. **Foura .M, Foura .Y**, 2003, "*Ville nouvelle ou Zhun à grande échelle?*" In « Les visages de la ville nouvelle », les annales de la recherche urbaine, p. 125 In Pachaud. E, "Villes nouvelles :du concept à la réalité". *EspacesTemps.net*, <http://espacestemp.net/document1880.html>.
19. **Fusco. G**, 2017, Espaces et Cultures, unt.unice.fr/uoh/espaces-publics-places/la-place-urbaine-percue
20. **GIEC**, 2008, "*Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*", <http://www.un.org>.
21. **Giguère. M**, 2009, "*Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*", Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, l'Institut national de santé publique du Québec, <http://www.inspq.qc.ca>.
22. **Guilbaut .S**, 2006, Association des urbanistes et aménagistes municipaux du Québec, *URBinfo*, <http://www.ouq.qc.ca/Congres/Etats>.
23. **Guyot. M.A**, "*L'Arbre urbain : un composant du confort pour l'Architecture et l'Espace Public*", <http://www.marseille.archi.fr>.
24. **Guyot. M.A**, 1998, "*L'Arbre urbain : un composant du confort pour l'Architecture et l'Espace Public*", Extrait d'intervention de cours, <http://www.marseille.archi.fr>
Extrait d'intervention de cours de GUYOT. M.A.
25. **Guyot. A**, "*Le vent, l'architecture et l'aménagement urbain*", Extrait d'intervention de cours en ligne, <http://www.marseille.archi.fr>
26. **Hernandez. P, Kenny. P**, 2008, '*Defining Zero Energy Buildings - A life cycle perspective*', In: Passive and Low Energy Architecture. Dublin, Ireland.Energy Research Group, University College Dublin,School of Architecture, <http://erg.ucd.ie>.
27. **ISO 8996**, 2004, "*Ergonomie de l'environnement thermique - Détermination du métabolisme énergétique*", Organisation internationale de normalisation (ISO), Genève. <https://www.iso.org>
28. **ISO 9920**, 1995, "*Estimation des caractéristiques thermique d'un vêtement*", Organisation internationale de normalisation (ISO), Genève, <https://www.iso.org>.
29. **Izard. J-L**, octobre 2006, "*Température de surface d'une pelouse dans un parc urbain*", EnviroBat- Méditerranée.
30. **Labrue. C**, 2010, "*La forêt comme clôture : l'enfermement de l'habitat par la forêt The confining forest: Forestry advancement on habitations*". Dossier thématique :- N° 4 <http://www.projetsdepaysage.fr>
31. **Kahina.A**, 2007, *Journal quotidien l'Expression* 6 juin, <http://www.algerie-dz.com>.
32. **Kofoed.U, Gaardsted. M**, 2004, "*Prise en compte du vent dans les espaces urbains*", résultat du projet RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces – coordonné par le CRES, Département des bâtiments, <http://alpha.cres.gr/ruros>
33. **Koen. A, Steemers. MC, Sinou. M**, 2004, "*Morphologie urbaine*", <http://www.alpha.cres.gr/ruros>.
34. **Malchaire. J**, 2009, "*Ambiances thermiques, unité hygiène et physiologie du travail de l'UCL, France*", <http://www.deparisnet.be>
35. **Matzarakis. A, Mayer. H**, 2000, "*Atmospheric conditions and human thermal comfort in urban areas*", 11th seminar on environmental protection, environment and health, Greece, <http://www.urbanclimate.net>
36. **Matzarakis. A, Rutz. F, Mayer. H**, 2006, "*Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures*", <http://www.meteo-uni.freiberg.de>

37. **Meerow. W, Black. R.J**, 1991/08, "*Energy information Handboock ,Chapter 9, Energy information Document 1028, Series de Florida energy extension service*", Université de Floride, [http:// www.p2pays.org](http://www.p2pays.org)
38. **Mehdi. S**, 2016, "*Traditional iranian courtyards as microclimate modifiers by considering orientation, dimensions and proportions*", <http://doi.org/10.1016/j.foar.2016.02.002>.
39. **Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques**, 2001/11, "*Comprendre et reconnaître l'espace public avant d'agir*", arche sud, p.26, <http://www.archi.fr/MIOCP>.
40. **Musy. M**, 2007, "*Du Microclimat au bâtiment .Concevoir en milieu urbain : prise en compte des interactions bâti environnement urbain*", diaporama conférence, <http://www.grenoble.archi.fr>.
41. **Musy. M**, 2008, "*approches physiques des ambiances urbaines :Caractérisation et conception*", www.envirobat-med.net – www.ville-amenagement-durable.org
42. **Pommier. G, Provendier. D, Gutleben. C et Musy. M**, 2014/09, "*Impacts du végétal en ville*", Plante & Cité, <http://www.plante-et-cite.fr>
43. **obertson. K, Athienitis. A**, 2007, "Solar Energy for Buildings". En ligne :<http://www.cmhc-schl.gc.ca>.
44. **RUROS**, "*Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces*" – coordonné par le CRES, Département des bâtiments, <http://alpha.cres.gr/ruros>
45. **Putra. Y.S, Yang. J, Wenging. L**, 2004, "*GIS analysis for the climate evaluation of 3D urban*", [http:// www. Gisdevelopment.net/ proceedings/Gisdeco/2004](http://www.Gisdevelopment.net/proceedings/Gisdeco/2004).
46. **Salat. S**, 2015, "*Repenser la ville*", dossier changements climatiques, comment les villes s'adaptent ? Premier plan n° 33 ,octobre-décembre, <http://www.urbanisme-puca.gouv.fr>
47. **Sakhy. A, Madelin. M et Beltrando. G**, 2011, "*Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris)*", Dixièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon. <http://thema.univ-fcomte.fr>.
48. **Scudo. G, Dessi.V et Rogora. A**, 2004, "*Evaluation des conditions du rayonnement dans les espaces urbains*", résultat du projet RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces- coordonné par le CRES, Département des bâtiments, <http://alpha.cres.gr/ruros>
49. **Santamouris. M, Klistikas. N, Niahou. K**, 2004, "*Ventilation of street canyons and its impact on passive cooling design*", Renewable in the city Environment project, <http://www.lema.ulg.ac.be/tools/rice>.
50. **Tareb**, 2000, "*Energie dans l'environnement urbain- Architecture basse énergie, chapitre 4*", <http://www.learn.londonmet.ac.uk>.
51. **Winslow. C.A, Herrington.L.P, Gagge. A.P**, 1941, "*Influence of physical work on physiological reactions to the thermal environment*", Am. J. Physiol, 134, pp.664–681, <https://www.climate-action.engin.umich.edu>
52. **Unger. J**, 2004, "*Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach*", Climate Research, Vol. 27, pp. 253-264, [http://: www.int-res.com](http://www.int-res.com)
53. **US Environmental Protection Agency**, <http://collectivitesviables.org>
54. **UTCI - Universal Thermal Climate Index**, <http://www.utci.org>
55. <https://heatisland.lbl.gov>
56. <https://notre-planete.info>
57. <https://www.ncdc.noaa.gov>.
58. <https://twitter.com/observeafrica>

59. [http:// www.panoramio.com](http://www.panoramio.com)
60. <https://weatherspark.com>
61. <https://fr.windfinder.com>
62. <https://www.wind-data.ch>
63. <http://www.townscope.com>
64. <http://www.monclimatmasante.qc.ca>
65. <http://www.permaculturedesign.fr>
66. [http:// www.cartage.org](http://www.cartage.org)
67. [http:// www. marseille.archi.fr](http://www.marseille.archi.fr)
68. <http://www.monclimatmasante.qc.ca>
69. <http://unt.unice.fr/uoh/espaces-publics-places>
70. <http://www.worldheritagevoyages.com>

Annexes

ANNEXE A

Tableau A.1 : données radiatives de matériaux, d'après (Athamena, 2008) cité par Marjory Musy, 2008, Approches physiques des ambiances urbaines caractérisation et conception (www.envirobat-med.net – www.ville-amenagement-durable.org)

	Albédo	Emissivité	Référence
Matériaux de construction			
Pierre	0.2-0.35	0.85-0.9	(Oke, 1987)
Pierre - Granite, Gneiss	0.44		(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
Gravier (vrac)	0.08 -0.18	0.92	www.thermique55.com
Calcaire -clair - Sombre	0.75 0.50	0.36-0.9	(Mazria, 1979)
Grés - beige (quartzeux) - Gris clair - Rouge	0.44 0.38 0.27		(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Asphalte foncé	0.07	0.90	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Béton neuf	0.45	0.90	(Lavigne, 1994)
Béton vieilli	0.1-0.35	0.71-0.9	(Lavigne, 1994), (Oke 1987), (Mazria, 1979)
Bois	0.40	0.95	(Lavigne, 1994)
Brique	0.05-0.2	0.9-0.92	(Oke 1987)
Toitures			
Tuile en terre cuite	0.1-0.35	0.90	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979), (Oke 1987)
Feutre bitumé	0.12		(Mazria, 1979)
Feutre bitumé avec surface aluminisée	0.60		(Mazria, 1979)
Étanchéité en feuilles bitumées, - Brun - vert	0.13 0.14		(Mazria, 1979)
Papiers goudronné, noir	0.07		(Mazria, 1979)
Tuiles de béton : - Rouge - Blanc - Beige claire - Marron claire - Mauve - Gris rose	0.18 0.73 0.63 0.42 0.41 0.53	0.91 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9	(Parker, 1993) (Berdahl, 1997)
Fibre de ciment : - Marron - Gris étain	0.26 0.25	0.9 0.9	(Parker, 1993) (Berdahl, 1997)
Bardeau d'asphalte - Blanc - Argent - Marron foncé - Gris - Vert - Marron claire - Noir	0.21 0.20 0.08 0.08 0.19 0.19 0.05	0.91 0.91 0.91 0.91 0.91 0.91 0.91	(Berdahl, 1997)

Soils			
Herbe haute et sèche	0.31 à 0.33		(Mazria, 1979)
Gazon vert	0.33	0.49	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Sol nu sans végétation	0.25		(Mazria, 1979)
Sable humide	0.09		(Lavigne, 1994)
Sable sec	0.18		(Lavigne, 1994)
Marbre - blanc	0.66	0.931	(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
- sombre	0.44	0.931	(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
Toitures et façades			
Aluminium	0.6-0.85	0.12-0.25	(Parker, 1993), (Mazria, 1979)
Fer	0.10-0.12	0.13-0.28	(Oke 1987)
Acier galvanisé oxydé	0.38	0.28	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
Argent	0.93	0.02	(Mazria, 1979)
Cuivre	0.82	0.072	(Mazria, 1979)
Zinc galvanisé		0.23	(Mazria, 1979)
Laiton		0.05	(Mazria, 1979)
Peintures			
Peintures cellulosique			
- blanc	0.82	0.91	(Berdahl, 1997) (Mazria, 1979) (Synnefa et al 2007)
- jaune	0.77	0.91	
- Orange	0.63	0.91	
- Rouge vif	0.66	0.91	
- Rouge sombre	0.47	0.91	
- Gris	0.25	0.91	
- Vert brillant	0.21	0.91	
- Vert claire	0.50	0.91	
- Vert sombre	0.12	0.91	
- Bleu	0.18	0.91	
- Bleu foncé	0.09	0.91	
- Marron	0.23	0.91	
- Marron clair	0.22	0.91	
- Noir	0.05	0.91	
Verre transparent :			
angle zénithal <40°	0.08	0.87 à 0.94	(Oke, 1987)
angle zénithal 40° < α < 80°	0.09 à 0.52	0.87 à 0.92	

Tab.A-2 : Classification de la dépense énergétique selon l'activité (ISO 8996(2004), Malchaire, J, 2009).

Activité	M	
	(Wm⁻²)	(met)
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1,0
Activité légère, assis (bureau, domicile, école, laboratoire)	70	1,2
Activité légère, debout (achats, laboratoire, industrie légère)	93	1,6
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager)	116	2,0
Marche à plat :		
2 km h ⁻¹ (0,56 ms ⁻¹)	110	1,9
3 km h ⁻¹ (0,83 ms ⁻¹)	140	2,4
4 km h ⁻¹ (1,11 ms ⁻¹)	165	2,8
5 km h ⁻¹ (1,39 ms ⁻¹)	200	3,4

Tab. A-3 : Valeurs d'isolation thermique des ensembles vestimentaires. (ISO 9920 (2007), Malchaire, J, 2009)

Vêtements de travail	I_{cl}		Vêtements d'usage courant	I_{cl}	
	clo	m ² -K/W		clo	m ² -K/W
Caleçon, combinaison, chaussettes, chaussures	0,70	0,110	Slip, T-shirt, shorts, chaussettes fines, sandales	0,30	0,050
Caleçon, chemise, combinaison, chaussettes, chaussures	0,80	0,125	Caleçon, chemise à manches courtes, pantalon léger, chaussettes fines, chaussures	0,50	0,080
Caleçon, chemise, pantalon, blouse, chaussettes, chaussures	0,90	0,140	Slip, jupon, bas, robe, chaussures	0,70	0,105
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,00	0,155	Sous-vêtements, chemise, pantalon, chaussettes, chaussures	0,70	0,110
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste isolante, chaussettes, chaussures	1,20	0,185	Slip, chemise, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,00	0,155
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures, casquette, gants	1,40	0,220	Slip, bas, corsage, jupe longue, veste, chaussures	1,10	0,170
Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, veste, veste et pantalon isolants, chaussettes, chaussures	2,00	0,310	Sous-vêtements à manches et jambes longues, chemise, pantalon, tricot col en V, veste, chaussettes, chaussures	1,30	0,200
Sous-vêtements à manches et jambes longues, veste et pantalon isolant, Parka ouatinée, salopette ouatinée, chaussettes, chaussures, casquette, gants	2,55	0,395	Sous-vêtements à manches et jambes courtes, chemise, pantalon, gilet, veste, manteau, chaussettes, chaussures	1,50	0,230

Tab.A-4 : Extension de l'échelle de beaufort montrant les effets du vent sur les piétons
D'après Lawson, T.V. et Penwarden ,1975(*Blocken. B, Carmeliet. J, 2003*)

Force de beaufort	Description	Vitesse de vent à 1,75m de hauteur (m/s)	Effets du vent
0	Calme	0,0 – 0,1	Calme
1	Air léger	0,2 – 1,0	pas de vent sensible
2	Brise légère	1,1 – 2,3	Le vent est ressenti sur le visage
3	Douce brise	2,4– 3,8	Les cheveux et les habits sont agités. Journal difficile à lire.
4	Brise modérée	3,8– 5,5	Les cheveux sont décoiffés. La poussière et les papiers sont soulevés du sol
5	Brise Fraîche	5,6 – 7,5	La force du vent est ressentie sur le corps. Risque de perte d'équilibre
6	Forte brise	7,6 –9,7	Il est difficile de marcher droit, Les parapluies sont difficiles à utiliser, Le vent siffle dans les oreilles.
7	Proche de rafale	9,8 – 12,0	Il est difficile de marcher contre le vent.
8	Rafale	12,1– 14,5	La marche est entravée par les grandes rafales.
9	Forte rafale	14,6 – 17,1	Forte tempête, Risque de perte d'équilibre, Marche dangereuse.

ANNEXE B

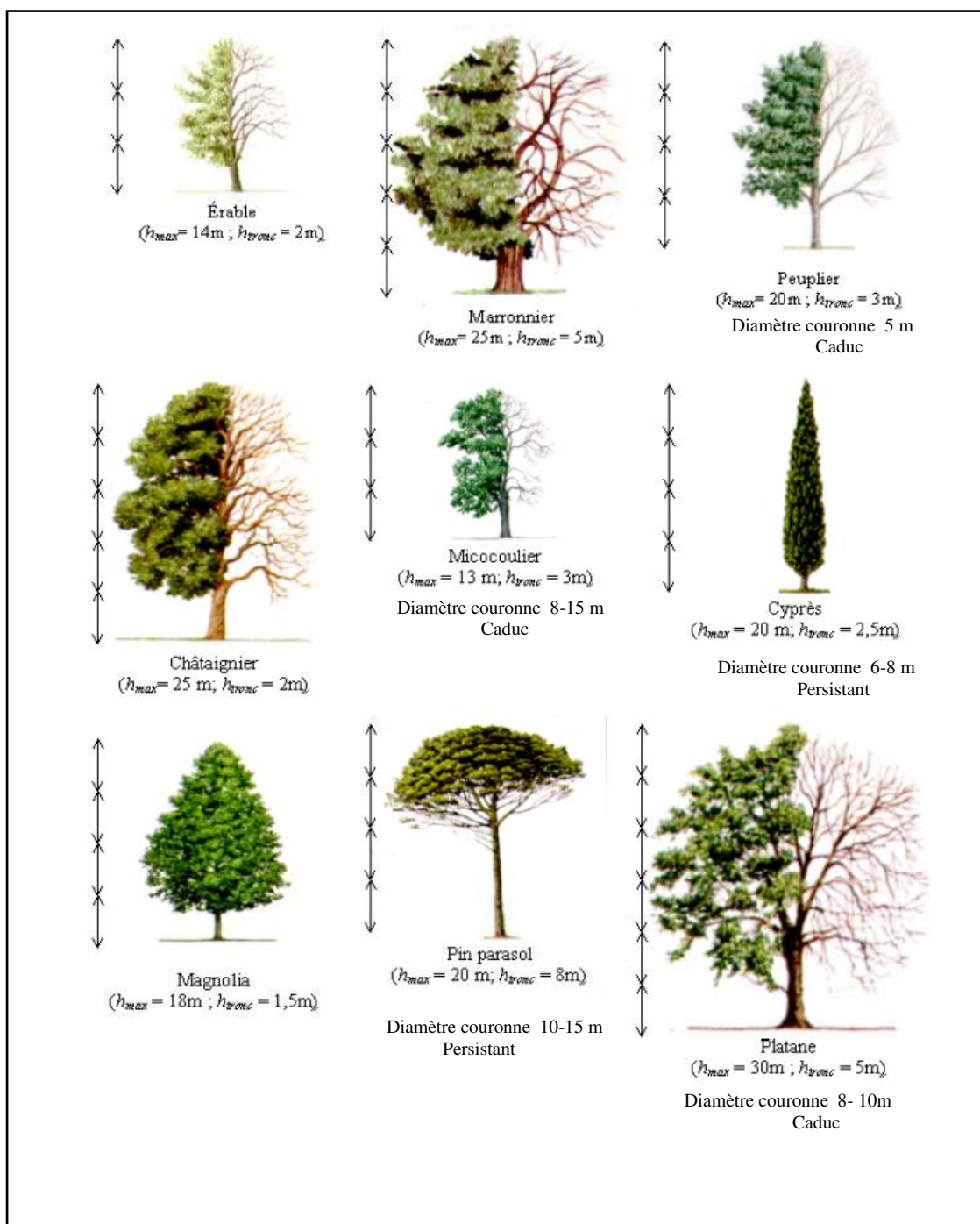


Fig- B : Dimensions de quelques arbres de la région méditerranéenne.
(Source : Vinet, 2000, amélioré par l'auteur)

Annexe C

Tab. C-1 : Données climatiques de la ville de Constantine –Période 2007-2016. (Source : ONM, Alger et www.weatherdata.com (*))

Les mois	Jan	Fev	M	Av	Ma	Ju	Jui	Au	S	O	N	D
Les variables climatiques												
T moyenne mensuelle °C	7.4	7.4	9.9	13.6	17.0	22.3	26.5	25.9	21.7	17.6	11.6	7.9
T moyenne maximale °C	13.5	13.2	16.3	20.7	25.2	31	33.7	34.8	27.8	24.9	17.9	13.9
T moyenne minimale °C	2.4	2.3	4.2	6.8	9.6	14	17.9	17.9	15.2	11.6	6.3	3
Amplitude °C	11.1	11	12.1	13.9	15.6	17	15.8	16.9	12.6	13.3	11.6	10.9
Les maximales des T de l'air °C	22	27	27	30	35	41	41	41	38	36	27	27
Les minimales des T de l'air °C	-3	-2	-2	-2	1	5	8	10	7	2	-3	-3
*Moyenne mensuelles de journées supérieures à 32 °C	0	0	0	0	1	8	19	18	6	1	0	0
*Moyenne mensuelles de journées supérieures à 21 °C	0	1	4	9	19	29	31	31	28	20	4	1
*Moyenne mensuelles des journées inférieures à 0°C	8	4	2	1	0	0	0	0	0	0	1	4
HR moyenne mensuelle %	75	74	73	69	63	52	44	48	61	66	72	76
HR moyenne maximale %	93.8	94.6	92	92.6	89.3	80.3	74.4	75.9	88.8	89.7	92.8	94.2
HR moyenne minimale %	56.8	52.2	44	43.7	37.9	28.9	24.9	26.3	36.5	40.7	52.2	58.6
Insolation totale h	167	180	227	231	275	320	339	304	238	220	176	151
Vitesse Vent m/s	2.6	3.3	3.0	2.6	2.5	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.7	2.5
Précipitations mm	48.8	64.2	71.4	51.4	34.6	12.9	21.5	24.0	34.8	37.7	41.3	38.1

Tab. C-2 : Données climatiques de la ville de Constantine modélisées par Météonorme 7.0. (Source : Auteur)

MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	268	315	393	450	495	541	578	525	453	374	297	253	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	389	393	423	448	476	546	649	578	494	453	429	443	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	107	123	148	159	175	151	115	142	145	138	109	86	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	635	734	917	1100	1076	1101	1053	964	925	851	648	577	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	989	996	990	1003	1015	1012	971	901	980	996	989	971	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)	280	330	417	459	486	486	359	434	446	378	304	251	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	2639	3359	4656	5831	6915	7810	8208	7009	5545	4129	2999	2422	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	3838	4193	4994	5806	6643	7889	9224	7703	6033	4979	4321	4246	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	1055	1307	1754	2065	2445	2188	1629	1902	1786	1529	1098	829	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	28857	33966	42412	48771	53975	58877	62832	57695	49910	41121	32427	27399	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	35441	36672	39366	42780	44926	53051	63867	54997	47803	42417	39779	40054	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	6	7	10	13	18	23	27	25	20	17	11	7	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	3	3	5	7	11	12	13	14	13	11	6	4	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)	81	76	71	71	66	53	46	52	66	67	76	81	percent
Wind Direction (Monthly Mode)	260	250	240	250	290	60	30	10	180	270	250	270	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 1 Depths)	13	11	10	11	13	15	18	20	21	20	18	15	degrees C

Tab. C-3 : Données climatiques de la ville de Fribourg. Source: <https://fr.wikipedia.org>.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Température maximale moyenne (°C)	5,1	6,8	11,3	15,0	19,8	22,7	25,3	25,2	21,0	15,1	9,1	6,3	15,3
Température minimale moyenne (°C)	-1	0,5	3,6	5,9	10,3	13,2	15,5	15,4	12	7,9	3,4	1,1	7,4

Tab. C-4 : Le zoning climatique de l'Algérie. (Source : ONM. Période 1974- 1984)

Paramètres géographiques				Saison climatique							
				Hiver : H				Été : E			
Zones		Influence	Altitude (m)	Unité climatique	Temp moy °c	HR moy %	Irradiation Solaire Wh/m ²	Unité climatique	Temp Moy °c	HR moy %	Irradiation Solaire Wh/m ²
1	Littoral	Mer	<500	H1	10..5	77.1	2312	E1	24.2	68.7	3602
2	Tellien montagneux	Mer et altitude	>500	H2a	-	-	2312	E1	24.2	68.7	-
	Tellien des plaines	altitude	1000-1500	H2b	4.9	75.4	2548	E2	24.9	54.4	4966
3	Hts plateaux et Atlas	Altitude	>1500	H3	4.6	73.5	2548	E2	24.9	54.4	4444
4	Le Sahara	Latitude	500- 1000	H4a	9.8	45.8	2634	E3	32.5	-	5878
			200- 500	H4b	12.1	48.0	2072.	E4	33.4	24.1	6440
			>500	H4c	12.6	27.3	2374	E5	36.5	12.5	6342

✚ Localisation de Constantine par rapport aux différentes zones climatiques

Elle est située dans la zone climatique **H2a** d'hiver et la zone d'été **E2** dont les caractéristiques sont les suivantes :

- La zone **H2a** est caractérisée par des hivers froids et écart de température diurne important.
- La zone **E2** a des étés chauds avec des écarts de température diurnes importants.

✚ Rayonnement solaire à Constantine

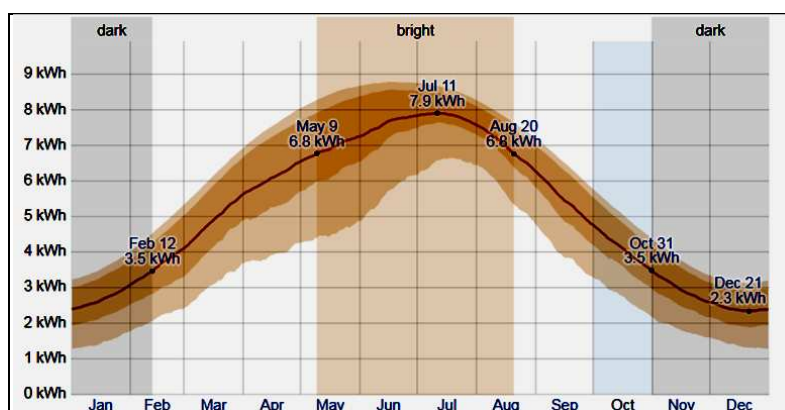


Fig.C- 1: Diagramme des variations mensuelles de l'énergie incidente sur un plan horizontal. (Source: <https://weatherspark.com>*)

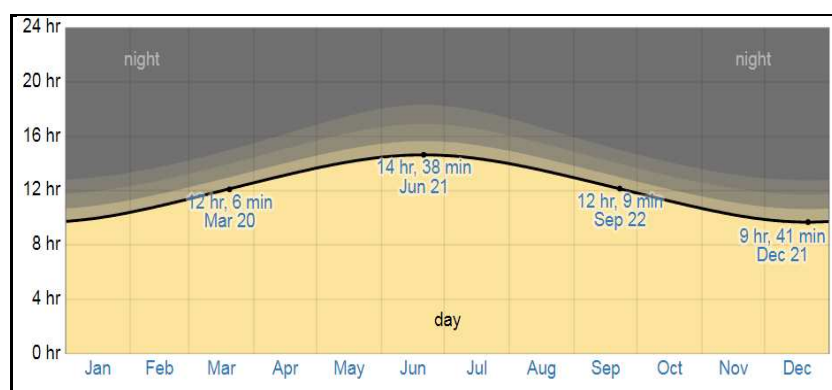


Fig.C- 2: La durée d'ensoleillement journalière à Constantine pour les journées les plus significatives de l'année (Source : <https://weatherspark.com>)

* statistical analysis of historical hourly weather reports and model reconstructions from January 1, 1980 to December 31, 2016

✚ Couverture nuageuse à Constantine

A Constantine, le pourcentage moyen du ciel couvert par les nuages connaît d'importantes variations saisonnières au courant de l'année.

La partie la plus claire de l'année se situe vers la mi-juin et se termine en début septembre. Le mois de juillet représente la période la plus claire de l'année (94% du temps de ciel dégagé). La partie la plus trouble de l'année commence en début septembre et dure environ 9 mois pour se terminer en juin. Le mois de janvier est le plus couvert en cette période (48% du temps très nuageux).

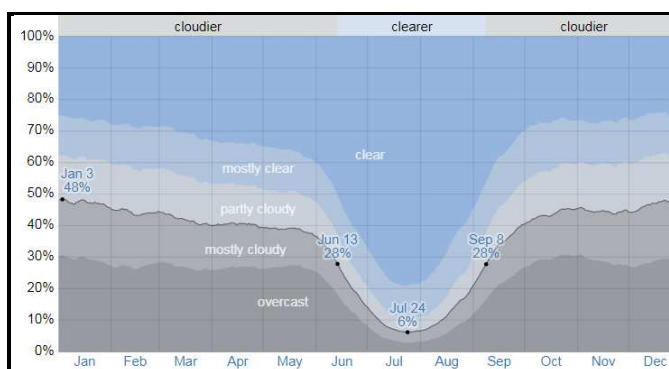


Fig. C-3 : Catégories de la couverture nuageuse à Constantine
Clair < 20% < surtout clair < 40% < partielle partiellement couvert < 60% < surtout nuageux < 80% < couvert. (Sources : <https://weatherspark.com>)

✚ Températures de l'air à Constantine

La température moyenne annuelle à Constantine est de **15,7 °C**. Le mois le plus chaud, en moyenne, est **Juillet** avec une température moyenne de **26,5 °C** les maximales peuvent dépasser les **40°C** pendant les mois de Juin, Juillet et Aout.

Le mois le plus froid, en moyenne, est Janvier, avec une température moyenne de **7,4 °C** les minimales peuvent atteindre les **-3 °C** pendant les mois d'hiver

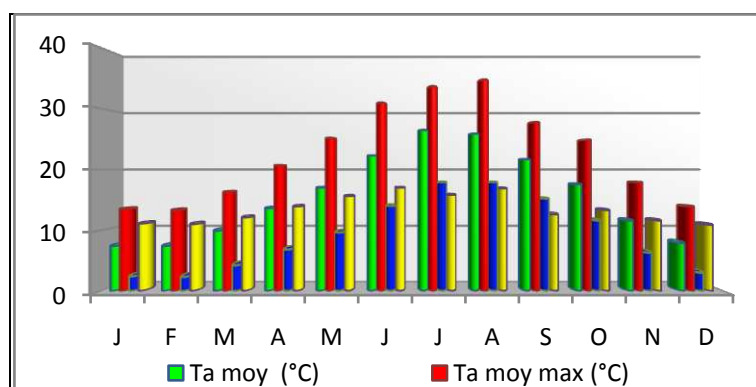


Fig. C- 4: Variations des températures de l'air extérieures de la ville de Constantine 2007-2016 (Source Auteur)

L'amplitude moyenne mensuelle entre la moyenne max et min est très variable où elle culmine avec une valeur de **16.9°C** pendant le mois d'Aout. L'amplitude moyenne annuelle est de **13.48°C**, par contre l'amplitude entre la valeur max des max et min des min et de **32.8 °C**.

✚ L'humidité de l'air à Constantine

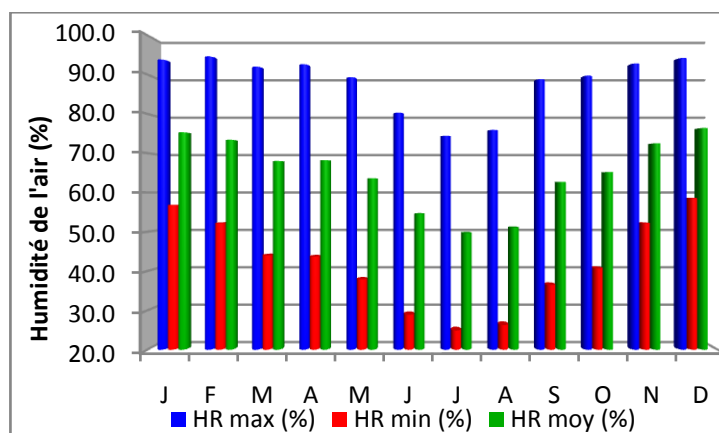


Fig. C-5 : Variations de l'humidité relative à Constantine Période 2007- 2016 (Source Auteur)

L'humidité relative varie entre les deux périodes hivernale et estivale.

La moyenne des maximales est de l'ordre de **88.2%**, la moyenne des minimales est de l'ordre de **41.9%** et la moyenne annuelle est de l'ordre de **65.1%**.

✚ Précipitations à Constantine

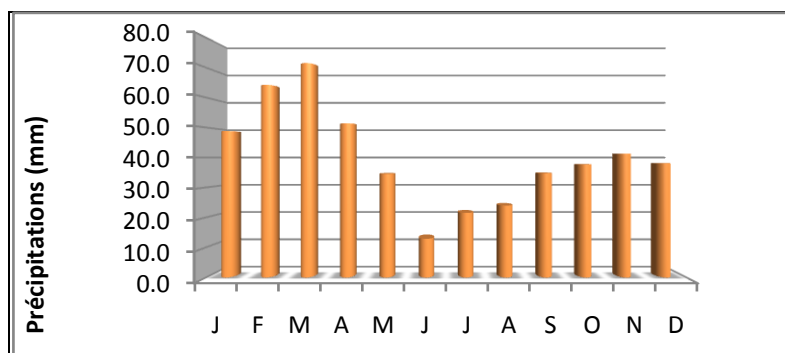


Fig. C-6 : Précipitation à Constantine. Période 2007- 2016 (Source Auteur)

✚ Calcul d'Indice d'aridité d'après E.DE Martonne :

$$Im = P / (T + 10)$$

$$= 480.6 / (15.7 + 10)$$

$$= 18.7$$

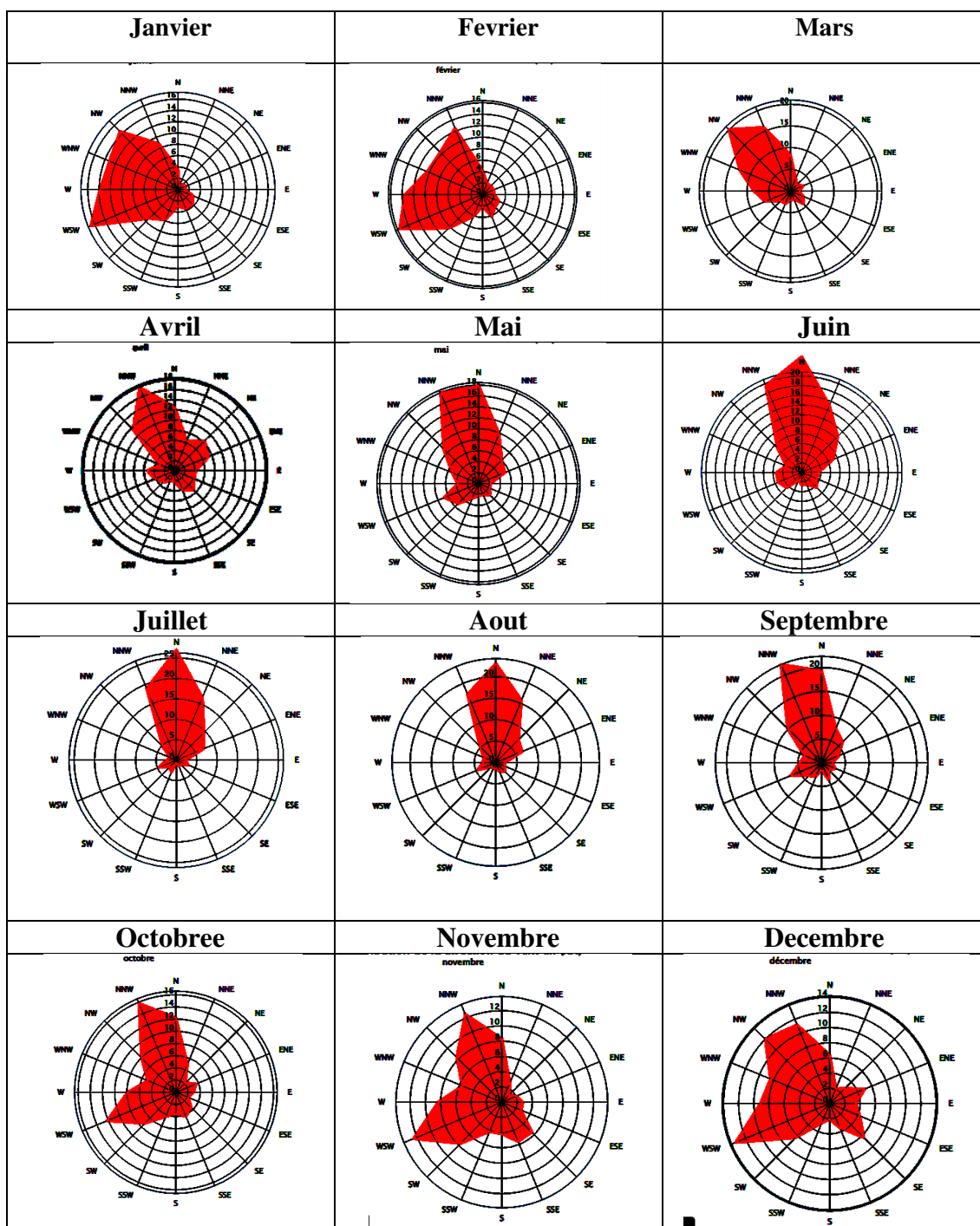
Im = indice d'aridité

P = précipitations de l'année

T = température moyenne annuelle

$10 < Im < 20$, le climat de Constantine est un **climat semi-aride**

Tab. C-5 : Directions des vents dominants à Constantine. Période 2007-2016.
 (Source : <https://fr.windfinder.com>)



■ Diagramme bioclimatique d'Olgvay

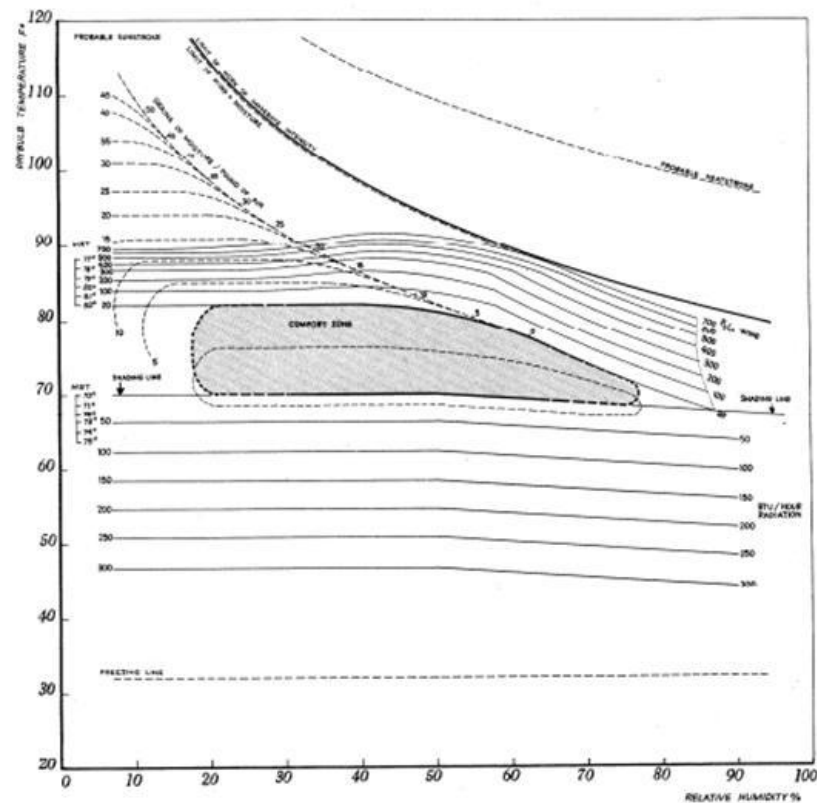


Fig. C-7 : Diagramme bioclimatique original d'Olgvay. (Source : Olgvay, 1963)

Le diagramme bioclimatique d'Olgvay destiné pour les régions chaudes et les régions tropicales couvre une large bande de températures, d'humidités, de vitesses de vent et de rayonnement solaire.

L'utilisation de ce diagramme est directement applicable, à l'extérieur, aux habitants des Etats-Unis, latitude de 40°, habillés de vêtements d'intérieur, 1clo et engagés dans une activité sédentaire ou un travail très léger, 1.1met.

La zone de confort d'été (en gris) dessinée sur le graphe correspond à une situation sans vent et sans rayonnement solaire direct pour un individu en situation sédentaire. Elle couvre entre 20 -75% d'humidité relative et elle est comprise entre environ 20 et 27 °C de température du bulbe sec.

Pour chaque 5° de latitude la zone se déplacera de 0.5°C, donc pour notre latitude, la zone de confort sera comprise entre 20 et 25°C.

Ce diagramme montre qu'un paramètre gênant peut souvent être compensé par une variation contrôlée d'un ou plusieurs autres paramètres.

Augmenter la vitesse du vent dans une certaine limite (1.5m/s) déplace la zone de confort vers le haut où des températures plus élevées sont acceptables en été. De même faire

glisser la zone vers le bas pour plus de rayonnement solaire permet de tolérer des températures de l'air plus basses notamment en hiver. Une approximation tirée du diagramme original d'Olgay indique qu'un gain d'environ 1°C peut être réalisé avec seulement 70 w/m². (Reiter).

Ceci dit qu'il tient en partie compte des adaptations différentes des personnes en fonction des saisons.

Détermination de la zone de confort :

a) La température moyenne annuelle :

$$T_m = \sum t_m / 12 = 15.7^\circ\text{C}$$

b) La température neutre selon la formule d'Auliciems sera :

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m).$$

$$T_n = 22,4^\circ\text{C} \pm 2$$

TABLEAUX DE MAHONEY

Table 1

Location	Ali Mendjeli (Constantine)
Longitude	06° 35' E
Latitude	36°15' N
Altitude	> 780m

a- Température de l'air (°C) :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Moy max	13.5	13.3	16.3	20.7	25.2	31	33.7	34.8	27.8	24.9	17.9	13.9
Moy min	2.4	2.3	4.2	6.8	9.6	14	17.9	17.9	15.2	11.6	6.3	3
Amplitude	11.1	11	12.1	13.9	15.6	17	15.8	16.9	12.6	13.3	11.6	10.9

High	AMT
Tmax : 34.8	(H+L) / 2 = 18.55
Tmin : 2.3	H-L = 32.5
Low	AMR

b- Humidité Relative (%) :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Moy max (a.m)	87	86	86	85	83	74	65	68	80	83	86	87
Moy min (p.m)	63	60	58	55	51	40	31	31	40	48	60	65
Moyenne	75	73	72	70	67	57	48	49.5	60	65.5	73	76
Groupe d'Humidité	4	4	4	3	3	3	2	2	3	3	4	4

Groupe Humidité: 1	si RH moy inférieure à 30%
2	30-50%
3	50-70%
4	> 70%

c- Precipitations et vent:

Precipitations (mm)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
	48.8	64.2	71.4	51.4	34.6	12.9	21.5	24.0	34.8	37.7	41.3	38.1	

Vitesse vent (m/s)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	2.6	3.3	3.0	2.6	2.5	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.7	2.5

d- Limites de confort

Groupe d'humidité	AMT au dessus de 20°C		AMT 15-20°C		AMT au dessous de 15°C	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

Table 2**a- Diagnostique de temperature**

18.55		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
AMT													
Moy mensuelle max		13.5	13.3	16.3	20.7	25.2	31	33.7	34.8	27.8	24.9	17.9	13.9
Confort diurne	Sup	25	25	25	28	28	28	30	30	28	28	25	25
	Inf	20	20	20	21	21	21	22	22	21	21	20	20
Moy mensuelle min		7.3	2.3	4.2	6.8	9.6	14	17.9	17.9	15.2	11.6	6.3	3
Confort nocturne	Sup	20	20	20	21	21	21	22	22	21	21	20	20
	Inf	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Stress thermique	jour	C	C	C	C	O	H	H	H	O	O	C	C
	nuit	C	C	C	C	C	O	O	O	O	C	C	C

C / Froid (cold)

O / Confort (comfort)

H / Chaud (hot)

b- Indicateurs

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Humide: H1													0
H2													0
H3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
Aride: A1				x	x	x	x	x	x	x			7
A2							x	x					2
A3	x	x	x	x							x	x	6

c- Application

Interprétation	Indicateur	Stress thermique		Précipitations	Groupe d'humidité	Amplitude mensuelle
		Jour	Nuit			
Mouvement d'air essentiel	H1	H			4	
		H			2,3	Moins de 10°C
Mouvement d'air souhaitable	H2	O			4	
Protection des pluies nécessaire	H3			Over 200 mm		
Capacité thermique nécessaire	A1				1,2,3	Plus de 10 °C
			H		1,2	
	A2	H	O		1,2	Plus de 10°C
Protection du froid	A3	C				

Table 3:**✚ a- Recommandations Spécifiques:**

Total des indicateurs de la table 2					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
0	0	12	7	2	6

Plan de masse

			0-10			√	1	Orientation nord - sud (axe long est-ouest)
			11,12		5-12			
					0-4		2	Plan compact avec cour intérieure

Espacement entre bâtiments

11,12							3	Ouverture des espaces pour pénétration de brise
2-10							4	Comme 3 mais avec Protection des vents chauds et froids
0,1						√	5	plan compact

✚ b- Mouvement d'air:

0	0	12	7	2	6			
H1	H2	H3	A1	A2	A3			
3-12							6	Chambres disposées sur une seule rangée permettant un mouvement d'air permanent.
1,2			0-5				7	Chambres disposées sur deux rangées permettant un mouvement d'air si nécessaire.
			6-12					
0	2-12						8	Mouvement d'air non recommandé
	0,1					√		

Ouvertures

			0,1		0		9	Larges 40-80%
			11,12		0,1		10	Petites 10-20%
Autres conditions						√	11	Moyennes 20-40%

Murs

			0-2				12	Murs légers, temps de déphasage court
			3-12			√	13	Murs intérieurs et extérieurs épais

Toitures

			0-5				14	Légères et isolées
			6-12			√	15	Toiture épaisse temps de déphasage supérieur à 8h

Sommeil extérieur

				2-12		√	16	Espace pour dormir à l'extérieur recommandé.
--	--	--	--	------	--	---	-----------	---

Protection contre la pluie

		3-12				√	17	Protection nécessaire contre les pluies
--	--	------	--	--	--	---	-----------	--

Table 4**✚ Recommandations de détails**

Total des indicateurs					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
0	0	12	7	2	6

Dimensions des ouvertures par rapport au mur

			0,1		0		1	Large:	40-80%
			2-5		1-12			moyenne:	25-40%
			6-10			√	3	Petite :	15-25%
			11,12		0-3		4	Très petite:	10-20%
					4-12		5	moyenne:	25-40%

Position des ouvertures

3-12							6	Au Nord et au sud face au vent
1-2			0-5					
			6-12					
0	2-12					√	7	Au Nord et au sud. Prévoir aussi des ouvertures dans les murs intérieurs.

Protection des ouvertures

				0-2	√	8	Exclure rayonnement directe
		2-12			√	9	Protection contre la pluie

Murs et planchers

			0-2			10	Légers, Capacité thermique faible
			3-12		√	11	Massifs, temps de déphasage au-delà de 8h

Toits

10-12			0-2			12	Légers, surface reflective.
			3-12			13	Légers, bien isolés
0,9			0-5			14	Massifs, temps de déphasage au-delà de 8h
			6-12		√		

Dispositifs extérieurs

				1-12	√	15	Espace pour dormir la nuit
		1-12				16	Drainage adéquat des pluies

Assuming only the Design Strategies that were selected on the Psychrometric Chart, 100.0% of the hours will be Comfortable. This list of Residential Design guidelines applies specifically to this particular climate, starting with the most important first. Click on a Guideline to see a sketch of how this Design Guideline shapes building design (see Help).

19	For passive solar heating face most of the glass area south to maximize winter sun exposure, but design overhangs to fully shade in summer
20	Provide double pane high performance glazing (Low-E) on west, north, and east, but clear on south for maximum passive solar gain
24	Use high mass interior surfaces like slab floors, high mass walls, and a stone fireplace to store winter passive heat and summer night 'coolth'
11	Heat gain from lights, people, and equipment greatly reduces heating needs so keep home tight, well insulated (to lower Balance Point temperature)
3	Lower the indoor comfort temperature at night to reduce heating energy consumption (lower thermostat heating setback) (see comfort low criteria)
62	Traditional passive homes in temperate climates used light weight construction with slab on grade and operable walls and shaded outdoor spaces
31	Organize floorplan so winter sun penetrates into daytime use spaces with specific functions that coincide with solar orientation
8	Sunny wind-protected outdoor spaces can extend living areas in cool weather (seasonal sun rooms, enclosed patios, courtyards, or verandahs)
16	Trees (neither conifer or deciduous) should not be planted in front of passive solar windows, but are OK beyond 45 degrees from each corner
39	A whole-house fan or natural ventilation can store nighttime 'coolth' in high mass interior surfaces (night flushing), to reduce or eliminate air conditioning
18	Keep the building small (right-sized) because excessive floor area wastes heating and cooling energy
37	Window overhangs (designed for this latitude) or operable sunshades (awnings that extend in summer) can reduce or eliminate air conditioning
14	Locate garages or storage areas on the side of the building facing the coldest wind to help insulate
41	The best high mass walls use exterior insulation (like EIFS foam) and expose the mass on the interior or add plaster or direct contact drywall
40	High mass interior surfaces (tile, slate, stone, brick or adobe) feel naturally cool on hot days and can reduce day-to-night temperature swings
15	High Efficiency furnace (at least Energy Star) should prove cost effective
63	Traditional passive homes in cool overcast climates used low mass tightly sealed, well insulated construction to provide rapid heat buildup in morning
33	Long narrow building floorplan can help maximize cross ventilation in temperate and hot humid climates
35	Good natural ventilation can reduce or eliminate air conditioning in warm weather, if windows are well shaded and oriented to prevailing breezes
43	Use light colored building materials and cool roofs (with high emissivity) to minimize conducted heat gain

Fig.C-8 : Stratégies passives recommandées par l'analyse numériques par climate consultant 6.0 software pour une conception en adéquation avec le climat de Constantine. *Source Auteur*

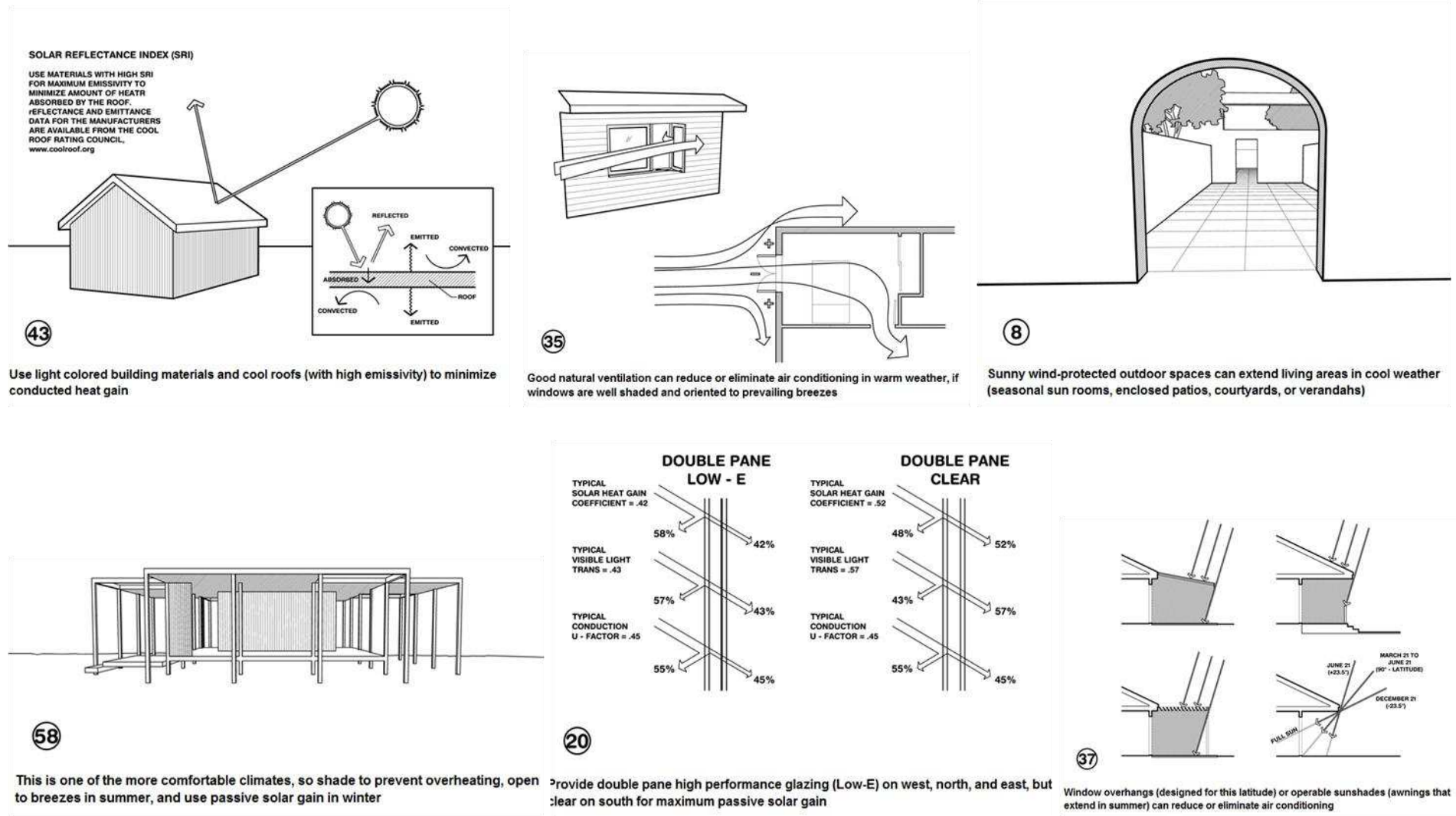


Fig.C-9 : Illustration de quelques stratégies passives recommandées pour Constantine par climate consultant 6.0 software. (Source Auteur)

Descriptions des logiciels utilisés dans la recherche

- Townscope 3.1

Développé par S. Azar, J. Teller et P. Petillon à LEMA (Laboratoire d'Etudes Méthodologiques d'Architecture) files Université de Liège en Belgique.

IL peut évaluer et comparer différentes options pour un projet donné.

Dans cette recherche on a déterminé avec :

- Ouverture au ciel dans les espaces urbains ouverts.
- la course solaire pour le 21 de chaque mois.

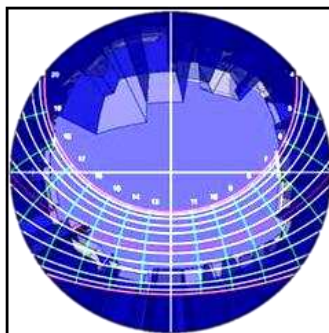


Fig. C.10 : Course solaire (<http://www.townscope.com>)

- carte d'ensoleillement naturel réalisée en sélectionnant la zone à étudier.

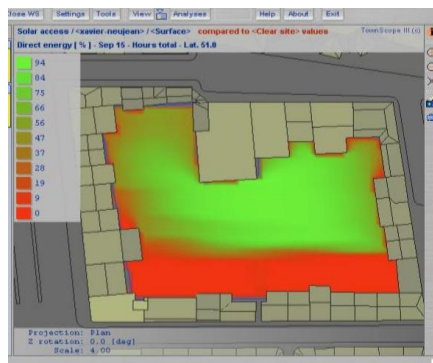


Fig.C.11: Carte d'ensoleillement entre plusieurs bâtis
(<http://www.townscope.com>)

Ce logiciel est un bon outil pour prévoir tous les comportements thermiques des différents objets physiques d'une scène urbaine.

- Envi-met 3.1:

Développé au sein du Groupe de Recherche en Climatologie (GRC) au département de géographie de l'université de Bochum en Allemagne par Bruse. M (1997).

Ce modèle tridimensionnel simule les interactions entre différentes surfaces urbaines, la végétation et l'atmosphère avec une résolution de 0.5 à 10 m en espace et 10 seconde en temps. Il permet ainsi d'analyser l'impact sur le microclimat des modifications de l'environnement urbain à petite échelle (arbres, toitures végétalisées, etc).

Le logiciel requiert comme inputs un fichier éditeur (.in) où la scène à simuler est modélisée, et un fichier de configuration (.Cf) pour renseigner le logiciel sur les variables d'initialisation qui définissent le contexte des simulations (cf. Fig. C.12)

Parmi ces variables, la date, le début et la durée de la simulation qui peut aller jusqu'à une semaine, les coordonnées géographiques du site, la vitesse et la direction du vent météo, la température de l'air météo, l'humidité météo, la nébulosité...etc. A cela s'ajoute des renseignements sur les propriétés thermiques des matériaux des bâtiments et la biométéorologie du piéton.

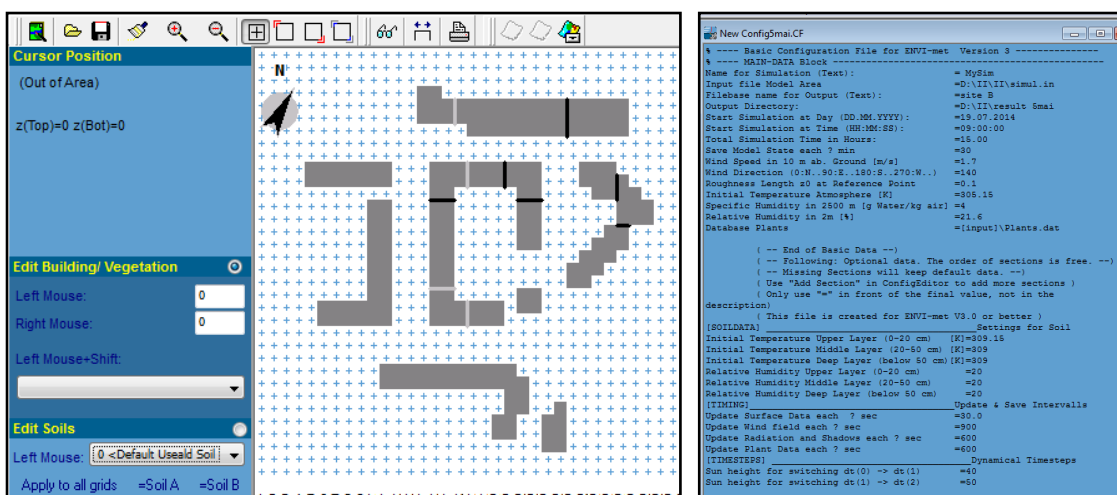


Fig.C.12 : Fichier .in à gauche et fichier .Cf à droite. (Source Auteur)

Les sorties dont la lecture se fait par un autre logiciel **Léonardo 3.75** sont les résultats de simulation de plusieurs paramètres enregistrés dans plusieurs répertoires. (cf. Fig. C.13) ou projetés sur le plan comme ils peuvent être stockés dans des fichiers textes pour chaque récepteur défini dans la scène.

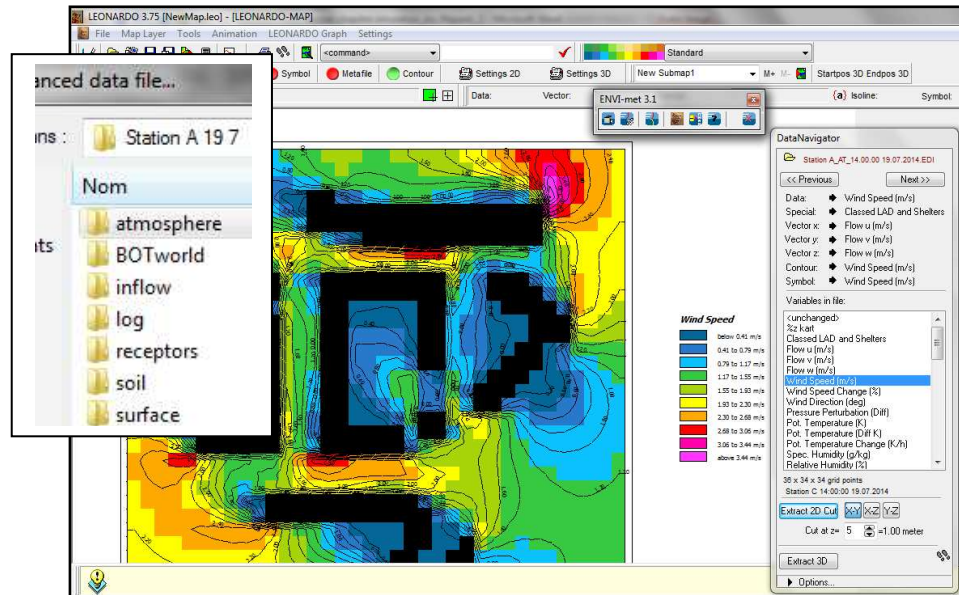


Fig.C.13 : Outputs des simulations Envi- met (vitesse de l'air dans un morceau de ville. (Source Auteur)

• **RayMan pro 3.1 :**

Modèle thermo-physiologique, développé à l'institut de Meteorologie Albert-Ludwigs, université de fribourg, Allemagne par, Andreas Matzarakis pour calculer le flux radiatif dans un environnement simple ou complexe (Matzarakis et al. 2007; 2010) ayant pour finalité le calcul de la Tmrt et d'évaluer le confort thermique par plusieurs indices mais uniquement pour un seul point de la scène. Donc il ne nous renseigne pas sur la distribution sur l'ensemble de l'espace.

Fig.C.14 : La fenêtre des entrées de RayMan pro3.1 pour le calcul de la Tmrt et les indices de confort thermique. (Fröhlich et Matzarakis 2017).

Dans cette recherche, il est utilisé comme calculette des indices thermo-physiologiques PET et le tout récent indice mPET ayant comme paramètres d'entrées : la température de l'air (°C), l'humidité relative (%), vitesse de vent (m/s) et la Tmrt (°C), recueillis depuis les outputs des simulations d'Envi-met 3.1.

- **Trnsys 17**

Le logiciel de simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment. Il permet d'intégrer toutes les caractéristiques du bâti (emplacement, matériaux de construction utilisés, architecture globale...) mais aussi des systèmes de chauffage ou de climatisation pour estimer les consommations d'énergie, confort thermique, l'hygrométrie.....etc

La version 17, vient de franchir un palier significatif dans l'évolution du logiciel : l'importation du modèle géométrique détaillé en 3D depuis Google SketchUp où la version gratuite suffit (**cf .fig.C.15**). Cela rend le calcul de grands espaces vitrés (comme des atriums sur plusieurs étages) beaucoup plus facile et précis, tient automatiquement compte des ombrages dû à des masques externes et au bâtiment lui-même, calcule la tâche solaire,..... etc (CSTB, 2010).

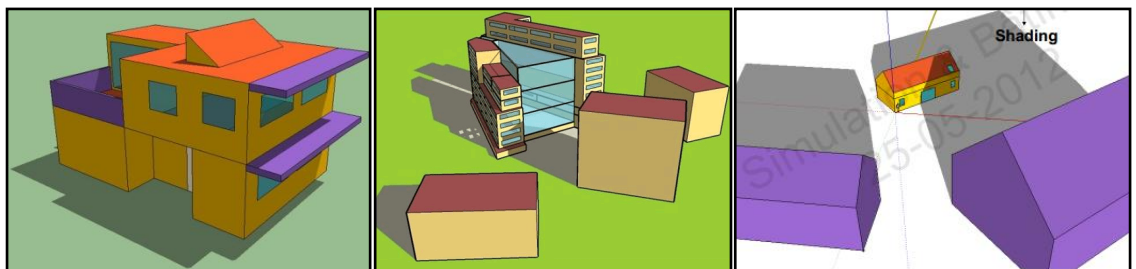
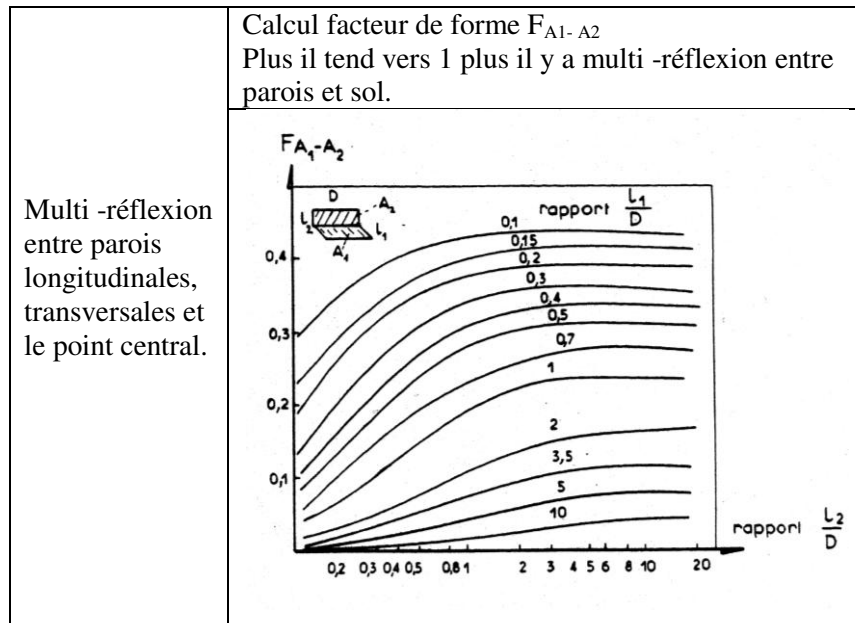


Fig. C.15 : Modélisation détaillées des bâtiments dans Google SketchUp et prise en charge des tâches d'ombre dans les simulations thermiques dynamiques par Trnsys 17 (CSTB, 2010).

✚ Calculs de facteur de forme pour les trois stations de mesures



Abaques de calcul des facteurs de forme entre différentes surfaces.

Calculs de facteur de forme pour la station **A** (Source : Auteur)

Multi-réflexion entre parois : -Longitudinales -Transversales -sol et le point central.	Désignation		L_1	L_2	$F_{A_1-A_2}$
			— D	— D	
point central		Parois longitudinales	0.28	0.25	0.37
		Parois transversales	0.89	0.56	0.27

Transversal $D = 42$ $L_1 = 37.5$ $L_2 = 21$

Longitudinal $D = 75$ $L_2 = 19$ $L_1 = 21$

Calculs de facteur de forme pour la station **B** (Source : Auteur)

Multi -réflexion entre parois : -Longitudinales -Transversales - sol et le point central.	Désignation		L ₁ — D	L ₂ — D	F _{A1- A2}
	point central	Parois longitudinales	0.28	0.29	0.37
		Parois transversales	0.44	0.57	0.32

Transversal D=68 L1= 30 L2= 20
Longitudinal D =66 L2=19 L1= 28

Calculs de facteur de forme pour la station **C** (Source : Auteur)

Multi -réflexion entre parois : -Longitudinales -Transversales et le point central.	Désignation		L ₁ — D	L ₂ — D	F _{A1- A2}
	point central	Parois longitudinales	0.30	0.36	0.36
		Parois transversales	0.87	0.59	0.27

Transversal D=32 L1= 28 L2= 19
Longitudinal D =56 L2=19 L1= 16

 **Evaluation de la protection des places des vents.**

Les recommandations pour une bonne protection des vents :

Protection des vents	◆ Pour une maille (place) $\text{Surface} / \text{hauteur}^2 \quad A / H^2 < 30$
	<u>Il est important que :</u>
	◆ Longueur totale des ouvertures au vent en direction de l'espace $\times 100 < 25\%$ $\frac{\text{Longueur totale des ouvertures au vent}}{\text{Périmètre de l'espace}}$
◆ L'angle d'incidence du vent sur l'axe d'orientation de l'espace doit être compris entre ± 0 à 60° .	

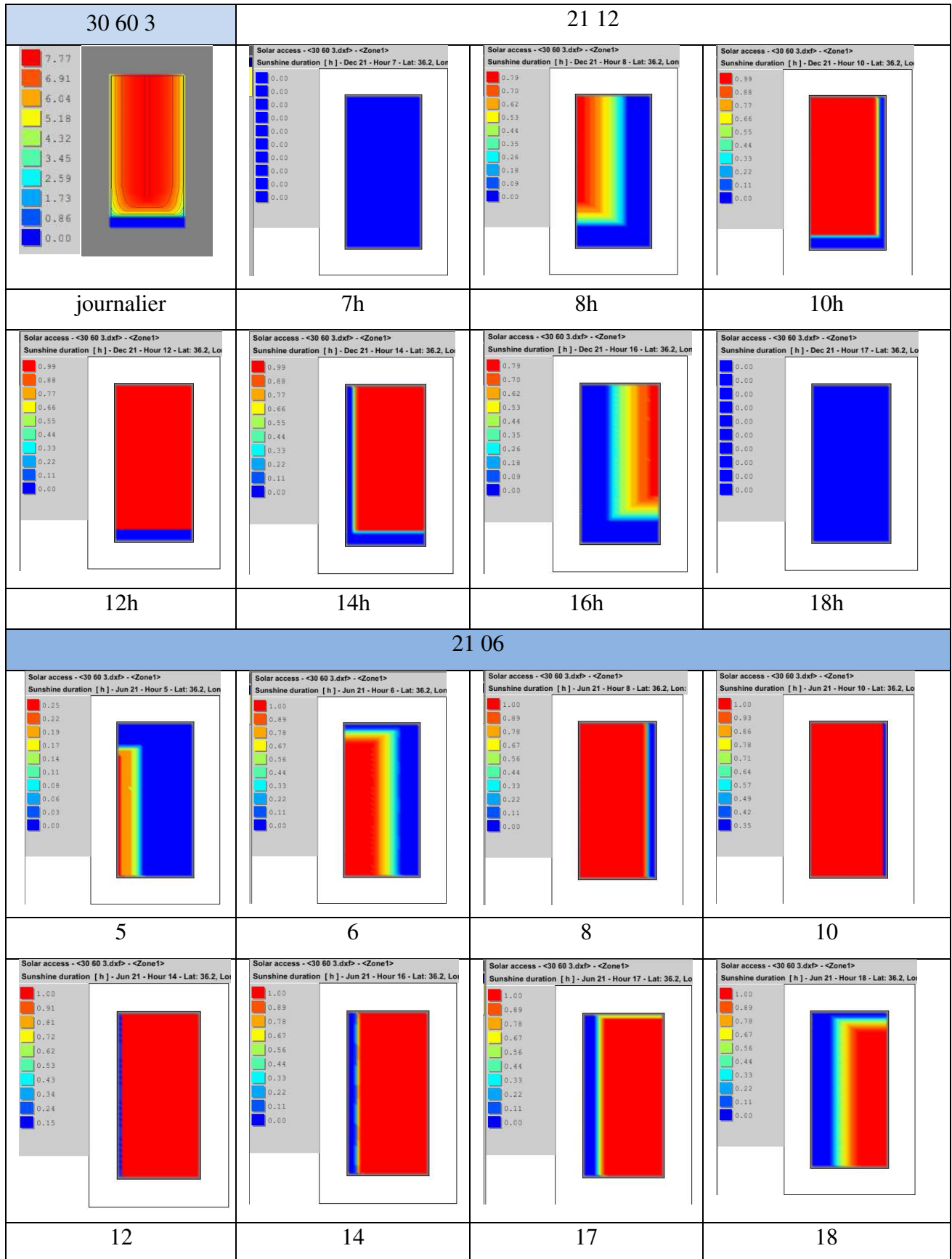
Station A	SVF 0.512	Altitude : 794m	Forme au sol : Rectangle
Surface (A)	4342.5m ²	Type de revêtement au sol Terre + asphalte + ciment béton	Albédo moyen = 0.22
Hauteur moyenne (H)	21 m	$A/H^2 = 6.72 < 30$	à l'abri des vents
Périmètre (P)	235.26 m		
Longueur totale des ouvertures en direction de l'espace			42
Périmètre de l'espace			$\frac{42}{235.26} = 18 \% < 25 \%$
			(protégée)

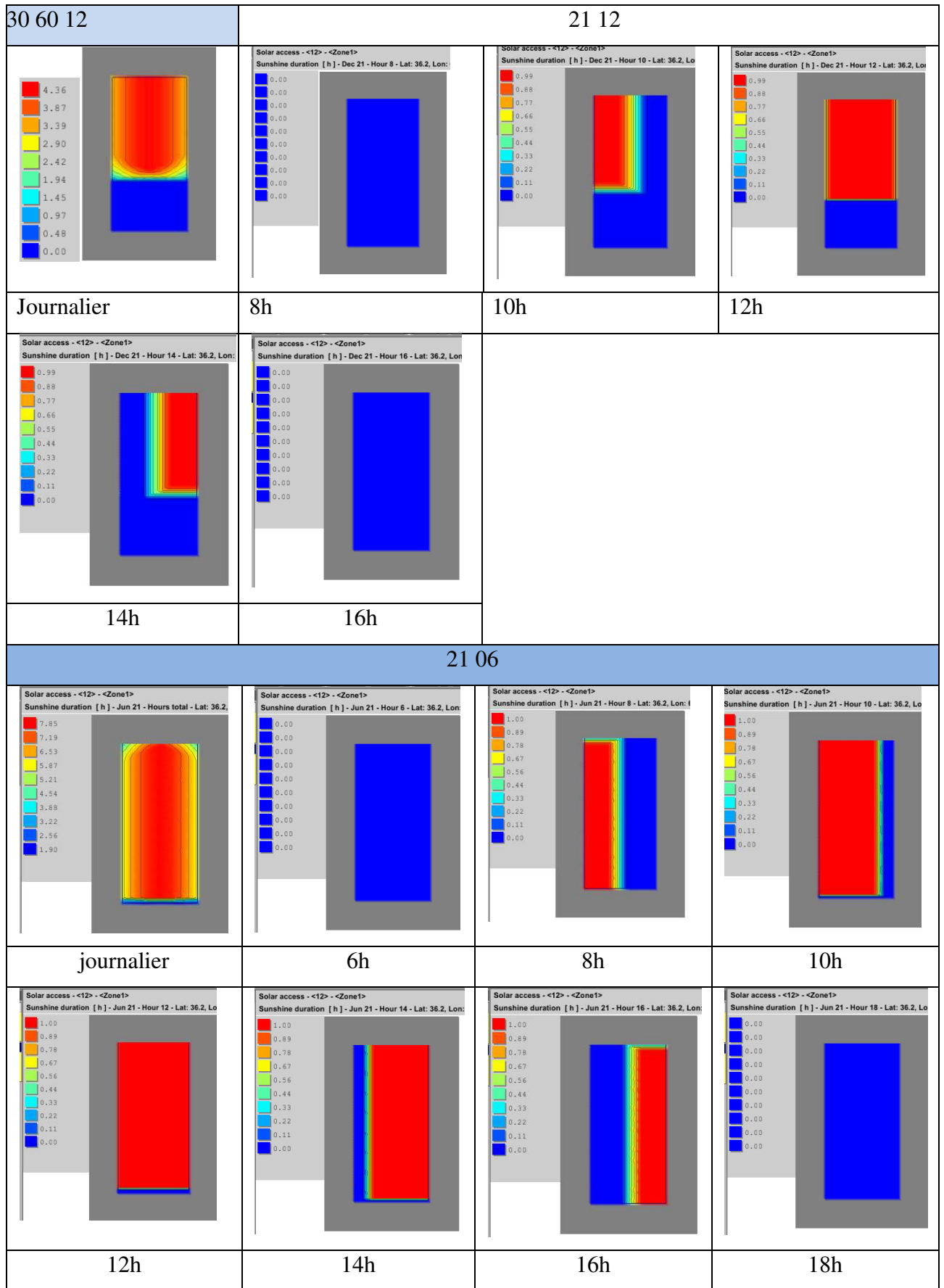
Station B	SVF 0.514	Altitude : 800m	Forme au sol : Irrégulière
Surface (A)	3184.92 m ²	Type de revêtement au sol Terre+ ciment béton	Albédo moyen = 0.29
Hauteur moyenne (H)	18.33m	$A/H^2 = 9.47 < 30$	à l'abri des vents
Périmètre (P)	222.90 m		
Longueur totale des ouvertures en direction de l'espace			19.62
Périmètre de l'espace			$\frac{19.62}{222.90} = 8.8 \% < 25 \%$
			(protégée)

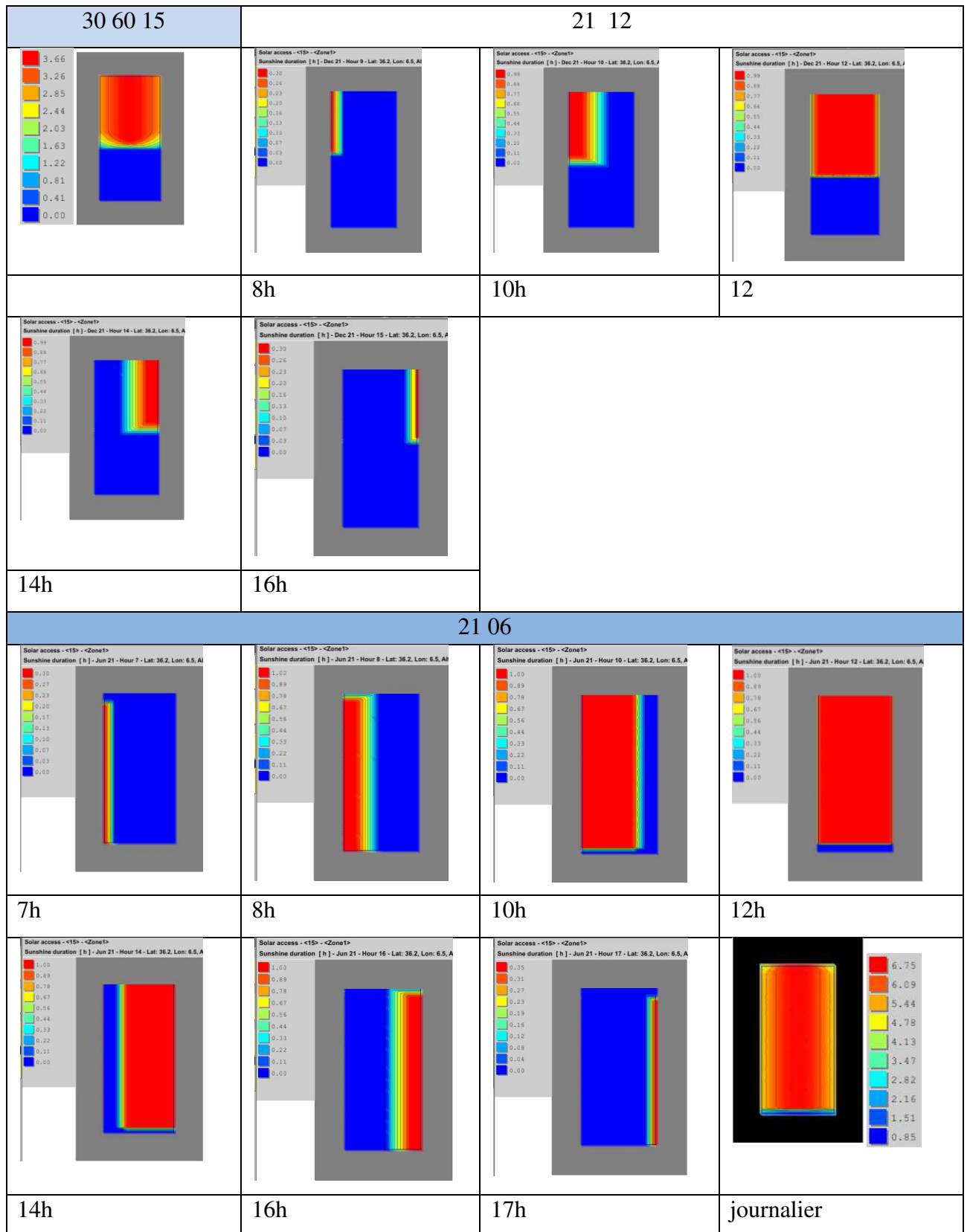
Station C	SVF 0.516	Altitude : 786 m	Forme au sol : Rectangle
Surface (A)	3025 m ²	Type de revêtement au sol Terre+ ciment béton	Albédo moyen = 0.25
Hauteur moyenne (H)	20.27 m	$A/H^2 = 5.03 < 30$	à l'abri des vents
Périmètre (P)	195.18 m		
Longueur totale des ouvertures en direction de l'espace			36.17
Périmètre de l'espace			$\frac{36.17}{195.18} = 18 \% < 25 \%$
			(protégée)

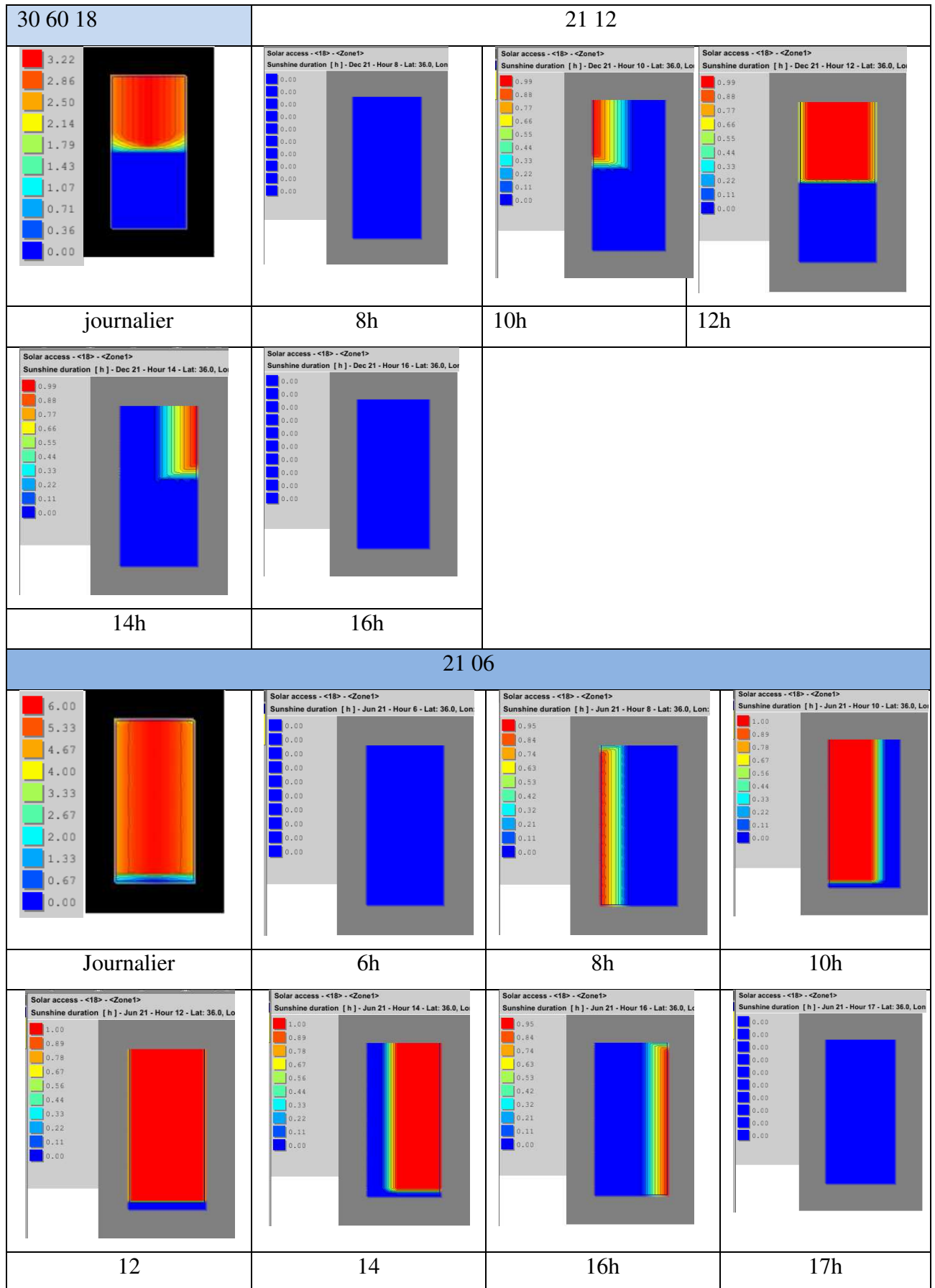
Annexe D

Evolution des ombres sur le sol pour les quatre stations simulée









 **Données climatiques pour les journées simulées**

WEATHER BY HOUR - 21 DECEMBER, 1999

Local Time	Temperature	Dewpoint	Humidity	Barometer	Visibility	Wind Direction	Wind Speed
1:00 AM	6 °C	5 °C	93 %	1017.9 hPa	10 km	NW (320°)	14.8 km/h
2:00 AM	5 °C	4 °C	93 %	1017.9 hPa	10 km	WNW (290°)	22.2 km/h
3:00 AM	5 °C	2 °C	81 %	1019 hPa	10 km	West (280°)	18.5 km/h
5:00 AM	5 °C	2 °C	81 %	1019 hPa	10 km	West (270°)	20.4 km/h
6:00 AM	5 °C	3 °C	87 %	1020 hPa		West (280°)	22.2 km/h
7:00 AM	4 °C	2 °C	87 %	1021 hPa	10 km	West (280°)	22.2 km/h
8:00 AM	5 °C	0 °C	70 %	1022 hPa	10 km	West (260°)	22.2 km/h
9:00 AM	5 °C	1 °C	76 %	1022 hPa	10 km	West (280°)	22.2 km/h
10:00 AM	6 °C	1 °C	70 %	1023 hPa	10 km	West (280°)	25.9 km/h
11:00 AM	7 °C	1 °C	66 %	1023 hPa	10 km	WNW (300°)	25.9 km/h
12:00 PM	8 °C	1 °C	62 %	1023 hPa	10 km	NW (310°)	29.6 km/h
1:00 PM	8 °C	2 °C	66 %	1023 hPa	10 km	NW (310°)	37 km/h
2:00 PM	8 °C	1 °C	62 %	1023 hPa	10 km	NW (320°)	29.6 km/h
3:00 PM	7 °C	2 °C	71 %	1023 hPa	10 km	NW (320°)	33.3 km/h
4:00 PM	7 °C	2 °C	71 %	1024 hPa	10 km	NW (310°)	22.2 km/h
5:00 PM	6 °C	2 °C	76 %	1024 hPa	10 km	WNW (300°)	14.8 km/h
6:00 PM	6 °C	2 °C	76 %	1024 hPa	10 km	WNW (300°)	11.1 km/h
7:00 PM	5 °C	0 °C	70 %	1026.1 hPa	10 km	NW (320°)	11.1 km/h
8:00 PM	4 °C	-1 °C	70 %	1026.1 hPa	10 km	NNW (330°)	18.5 km/h
9:00 PM	4 °C	-1 °C	70 %	1026.1 hPa	10 km	NW (320°)	18.5 km/h
11:00 PM	4 °C	-1 °C	70 %	1027.1 hPa	10 km	WSW (240°)	18.5 km/h

Hourly data record

WEATHER ALMANAC - 23 DECEMBER, 2008

Local Time	Temperature	Humidity	Wind Direction	Wind Speed
12:00 AM	4 °C	93 %	Calm	
2:00 AM	4 °C	93 %	Calm	
4:00 AM	1.7 °C	97 %	Calm	
7:00 AM	1.1 °C	96 %	Calm	
8:00 AM	1 °C	100 %	Calm	
10:00 AM	3 °C	100 %	Calm	
12:00 PM	9 °C	87 %	Calm	
2:00 PM	14 °C	63 %	ENE (70°)	7.4 km/h
4:00 PM	13.9 °C	59 %	Calm	
6:00 PM	10 °C	82 %	Calm	
8:00 PM	8 °C	87 %	Calm	
10:00 PM	5 °C	93 %	Calm	

26 06 2006

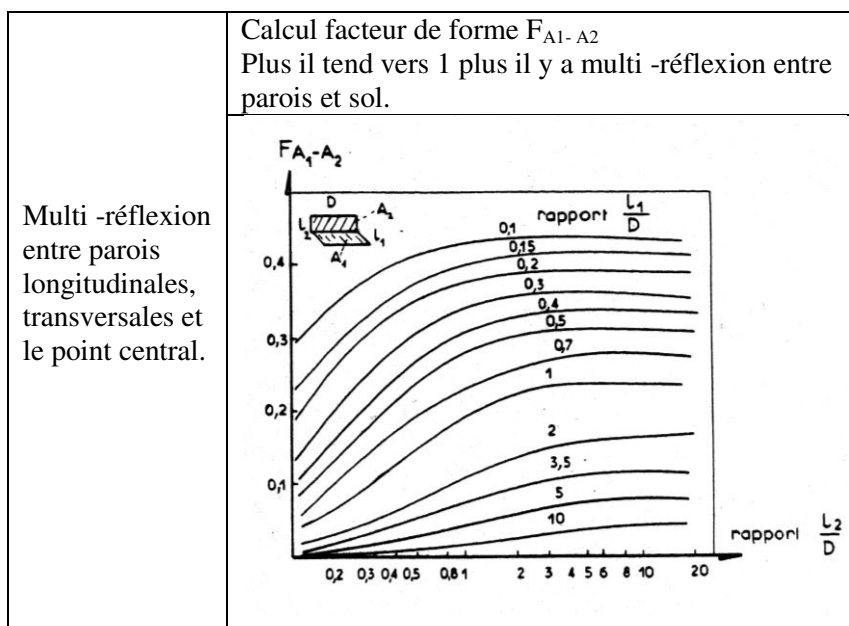
Local Time	Temperature	Dewpoint	Humidity	Wind Direction	Wind Speed	Conditions
12:00 AM	25 °C	7 °C	32%	Calm		Clear
2:00 AM	23 °C	7 °C	36%	Calm		Clear
4:00 AM	21 °C	6 °C	38%	Calm		Clear
6:00 AM	19 °C	9 °C	52%	Calm		Clear
8:00 AM	27 °C	9 °C	32%	SSW (200°)	11.1 km/h	Clear
10:00 AM	32.8 °C	5.6 °C	10%	South (190°)	18.5 km/h	Clear
12:00 PM	35 °C	6 °C	16%	SW (220°)	14.8 km/h	Clear
2:00 PM	37 °C	8 °C	17%	Calm		Clear
4:00 PM	37.8 °C	7.2 °C	8%	Calm		Clear
6:00 PM	37 °C	7 °C	16%	WSW (240°)	7.4 km/h	Clear
8:00 PM	28 °C	11 °C	35%	Calm		Clear
10:00 PM	26 °C	10 °C	36%	Calm		Clear
11:00 PM	25 °C	10 °C	39%	Calm		Clear
11:30 PM	24 °C	10 °C	41%	Calm		Clear

✚ Données climatique de la journée de mesures

19 /07/2014

heure	Température	Humidité	Wind Dir	Vitesse du vent	Conditions météo
12:00 AM	22.0 ° C	41%	SE	7.4 km/h / 2.1 m/s	Ciel dégagé
2:00 AM	20.0 ° C	46%	Calme	Calme	Ciel dégagé
4:00 AM	20 ° C	39%	Calme	Calme	
4:00 AM	20.0 ° C	49%	Calme	Calme	Ciel dégagé
6:00 AM	18.0 ° C	52%	Calme	Calme	Ciel dégagé
8:00 AM	24.0 ° C	41%	Est	7.4 km/h / 2.1 m/s	Ciel dégagé
10:00 AM	34.0 ° C	21%	OSO	11.1 km/h / 3.1 m/s	Ciel dégagé
12:00 PM	37.0 ° C	19%	NNO	18.5 km/h / 5.1 m/s	Ciel dégagé
2:00 PM	39.0 ° C	14%	NE	14.8 km/h / 4.1 m/s	Ciel dégagé
4:00 PM	40 ° C	8%	NNO	11.1 km/h /	
6:00 PM	39.0 ° C	14%	ESE	5.6 km/h / 1.5 m/s	Partiellement nuageux
8:00 PM	34.0 ° C	19%	Est	7.4 km/h / 2.1 m/s	Ciel dégagé
10:00 PM	29.0 ° C	25%	SE	14.8 km/h / 4.1 m/s	Ciel dégagé
10:30 PM	29.0 ° C	23%	SSE	13.0 km/h / 3.6 m/s	Ciel dégagé

Calculs de facteur de forme pour les trois stations de mesures



Abaques de calcul des facteurs de forme entre différentes surfaces.

Calculs de facteur de forme pour la station **A** (Source : Auteur)

Multi-réflexion entre parois : -Longitudinales -Transversales -sol et le point central.	Désignation		L_1	L_2	$F_{A_1-A_2}$
			—	—	
		D	D	D	
point central	Parois longitudinales		0.28	0.25	0.37
	Parois transversales		0.89	0.56	0.27

Transversal $D = 42$ $L_1 = 37.5$ $L_2 = 21$

Longitudinal $D = 75$ $L_2 = 19$ $L_1 = 21$

Calculs de facteur de forme pour la station **B** (Source : Auteur)

Multi -réflexion entre parois : -Longitudinales -Transversales - sol et le point central.	Désignation		L ₁ — D	L ₂ — D	F _{A1- A2}
	point central	Parois longitudinales	0.28	0.29	0.37
		Parois transversales	0.44	0.57	0.32

Transversal D=68 L1= 30 L2= 20
Longitudinal D =66 L2=19 L1= 28

Calculs de facteur de forme pour la station **C** (Source : Auteur)

Multi -réflexion entre parois : -Longitudinales -Transversales et le point central.	Désignation		L ₁ — D	L ₂ — D	F _{A1- A2}
	point central	Parois longitudinales	0.30	0.36	0.36
		Parois transversales	0.87	0.59	0.27

Transversal D=32 L1= 28 L2= 19
Longitudinal D =56 L2=19 L1= 16



Evaluation de la protection des places des vents.

Les recommandations pour une bonne protection des vents :

Protection des vents	◆ Pour une maille (place) $\text{Surface / hauteur}^2 \quad A/ H^2 < 30$
	<u>Il est important que :</u>
	◆ $\frac{\text{Longueur totale des ouvertures au vent en direction de l'espace} \times 100}{\text{Périmètre de l'espace}} < 25\%$
	◆ L'angle d'incidence du vent sur l'axe d'orientation de l'espace doit être compris entre ± 0 à 60°C .

Station A	SVF 0.512	Altitude : 794m	Forme au sol : Rectangle
Surface (A)	4342.5m ²	Type de revêtement au sol Terre + asphalte + ciment béton	Albédo moyen = 0.22
Hauteur moyenne (H)	21 m	$A/H^2 = 6.72 < 30$	à l'abri des vents
Périmètre (P)	235.26 m		
Longueur totale des ouvertures en direction de l'espace		42	$\frac{42}{235.26} = 18\% < 25\%$ (protégée)
Périmètre de l'espace		235.26	

Station B	SVF 0.514	Altitude : 800m	Forme au sol : Irrégulière
Surface (A)	3184.92 m ²	Type de revêtement au sol Terre+ ciment béton	Albédo moyen = 0.29
Hauteur moyenne (H)	18.33m	$A/H^2 = 9.47 < 30$	à l'abri des vents
Périmètre (P)	222.90 m		
Longueur totale des ouvertures en direction de l'espace		19.62	$\frac{19.62}{222.90} = 8.8\% < 25\%$ (protégée)
Périmètre de l'espace		222.90	

Station C	SVF 0.516	Altitude : 786 m	Forme au sol : Rectangle
Surface (A)	3025 m ²	Type de revêtement au sol Terre+ ciment béton	Albédo moyen = 0.25
Hauteur moyenne (H)	20.27 m	$A/H^2 = 5.03 < 30$	à l'abri des vents
Périmètre (P)	195.18 m		
Longueur totale des ouvertures en direction de l'espace		36.17	$\frac{36.17}{195.18} = 18\% < 25\%$ (protégée)
Périmètre de l'espace		195.18	

Annexe E

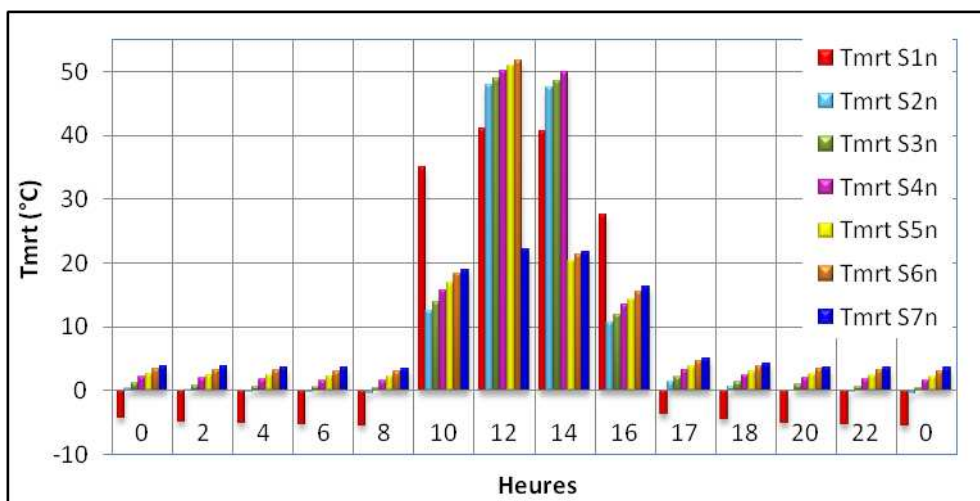


Fig.E.1 : Variations de la Tmrt dans la zone Nord des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).

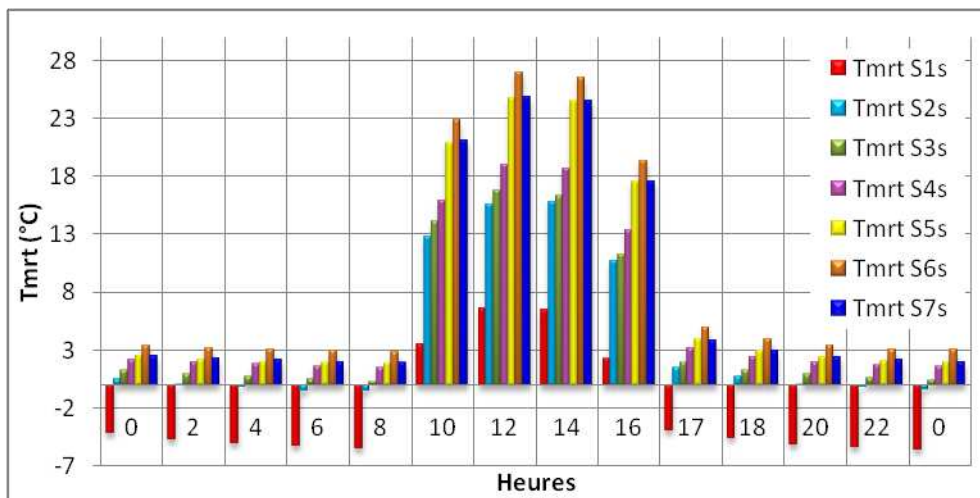


Fig.E.2 : Variations de la Tmrt dans la zone sud des stations simulées pour le 21/12 (Auteur).



The impact of height/width ratio on the microclimate and thermal comfort levels of urban courtyards

Chahrazed Kedissa, Saliha Outtas & Rafik Belarbi

To cite this article: Chahrazed Kedissa, Saliha Outtas & Rafik Belarbi (2016) The impact of height/width ratio on the microclimate and thermal comfort levels of urban courtyards, International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, 7:3-4, 174-183, DOI: [10.1080/2093761X.2017.1302830](https://doi.org/10.1080/2093761X.2017.1302830)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/2093761X.2017.1302830>



Published online: 23 Jun 2017.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 80



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



The impact of height/width ratio on the microclimate and thermal comfort levels of urban courtyards

Chahrazed Kedissa^{a,b}, Saliha Outtas^a and Rafik Belarbi^c

^aLaboratoire d'Architecture Bioclimatique et Environnement (ABE), Constantine 3 University, Constantine, Algeria; ^bFaculty of Earth Sciences and Architecture, Larbi Ben M'Hidi University, Oum El Bouaghi, Algeria; ^cLaboratoire de Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), University of La Rochelle, La Rochelle, France

ABSTRACT

The outdoor thermal comfort level of urban spaces is an important contributor to pedestrians' health. The urban microclimate is also important due to its influence on the energy use of buildings. These issues are likely to become more acute as increased urbanisation and climate change increase the urban heat island effect. However, urban planning must be able to provide urban forms that produce various microclimates that result in different comfort situations for pedestrians. This study aims to define various configurations of urban open spaces by analysing the influence of geometrical parameters on outdoor comfort levels. To achieve it, open spaces are simulated for typical hot and cold days in the semi-arid climate of Constantine, Algeria. The sun exposure is estimated using TownScope 3.1, and assorted models are evaluated according to the geometrical indicator of the height to width (H/W) aspect ratio. ENVI-met 3.1 is used to simulate such factors as the outdoor air temperature, mean radiant temperature (T_{mrt}), wind speed and relative humidity, while RayMan 1.2 is used for converting these data into physiological equivalent temperatures (PETs). The results show that duration of direct sunlight, mean radiant temperature and wind speed are influenced by the urban form and play an important role in attaining optimal thermal comfort levels.

ARTICLE HISTORY

Received 20 September 2016
Accepted 18 January 2017

KEYWORDS

Urban geometry; public courtyards; sun exposure; thermal comfort; ENVI-met

1. Introduction

In recent years, the microclimate has become an important issue in urban planning due to its impact on outdoor thermal comfort levels, which in turn affects the health and well-being of citizens and the performance of outdoor activities. Furthermore, outdoor spaces have a significant bearing on the comfort conditions of indoor ambience, and the energy demand of buildings can be significantly increased due to uncomfortable outdoor conditions. This in turn puts an immense pressure on the energy demand of cities [1–3] and consequently amplifies the phenomenon of urban heat islands [4–6]. However, several definitions of thermal comfort exist due to the subjective nature of the term and its psychological [7,8] and physiological [9] dimensions.

In this way, needs and preference regarding thermal comfort differ from season to season, and also depend on individual human factors including gender, age, body shape, activity levels, clothing and psychological aspects. Because of this variation, urban geometry should offer a reasonable thermal range in its outdoor spaces, instead of attempting to create an exact thermal condition that

the average user may find comfortable depending on his or her individual dispositions [10]. Nevertheless, it is important to establish criteria for outdoor comfort levels in order to evaluate urban microclimatic conditions and provide a benchmark.

2. Background

According to research, urban geometry and the thermal properties of urban surfaces are the two main parameters which influence the microclimate and therefore thermal comfort [11–14]. It is also the case that urban geometry is much more important at the microscale than the thermal behaviour of materials and albedo effects [15]. In fact, it is the geometry which determines the thermal environment, as it controls the distribution and ratio of shaded and sunny areas as determined by the orientation and height of buildings, as well as the air flow generated by the way in which the structures block or allow entry to the wind. Steemers et al. [16] conclude that shading from direct sunlight is more important than increases in absorbed radiation due to urban reflectance.



Figure 1. Layout of Ali Mendjeli, Algeria. Source: Google Earth, 2015.

The interactions between urban geometry and surface properties in a specific climate generate what are known as microclimates. These interactions were first discussed by Olgyay [17] and Oke [18], while Givoni discussed the thermal impact of urban typologies in different climates and arrived at a set of general design guidelines [19]. He writes that architectural forms, surface materials and urban morphology (compactness, elongations, etc.) can affect the microclimate environment. Steemers et al. [20] propose six archetypical generic urban forms for London and compare the incident solar radiation, built potential and daylight admission, concluding that large courtyards are environmentally adequate in cold climates, and under certain geometrical conditions can act as sun concentrators and retain their sheltering effect against cold winds. Muhaisen [21] analyses the impact of different design configurations of courtyards based on shading simulations, finding that the shading conditions of courtyards are highly influenced by formal proportions, location latitude and climatic conditions. In another related study, Muhaisen and Gadi [22] show that the proportion and geometry of courtyards play an influential role in improving the shading performance – hence, deep courtyard forms with any geometry in summer and shallow forms in winter are recommended. Berkovic et al. [23] used a simulation program to investigate the summer thermal comfort of urban courtyards in a hot-dry climate, finding that although the air temperature difference between the shaded and unshaded areas was only 0.5 °C, the mean radiant temperature varied by up to 30 °C.

3. Methodology

The design parameters that determine the insolation of any open space are the height and orientation of the

buildings around it. This paper considers the mutual interaction between courtyard geometry and solar access to urban open spaces with the aim of examining and evaluating the effects of the width (W) and height (H) of the surrounding buildings on solar access for different orientations. Numerical modelling is used in this study which concentrates on the relation between the microclimate of an open space on the H/W aspect ratio of the surrounding buildings.

3.1. Sun exposure

Sun exposure is aimed to proportioning the internal envelope of a courtyard in order to ensure adequate solar ratio accessibility in the winter months for warming up both ground and building surfaces while providing sufficient shade in the summer months. With this in mind, the following is assumed:

- At least half of the surface ground is exposed to the sun at the winter solstice.
- The sunshine during the summer solstice is half of the duration of the daytime hours (14 hours and 24 minutes divided by 2 = 7 hours and 12 minutes).

3.2. Size of the urban space

A rectangular form was chosen for the courtyard under examination in this study as this form is typical of Algerian urban spaces (Figure 1). The simple volumetric modelling considered the space enclosed in order to avoid needing to factor in wind effects, since the main objective of this study is highlighting the role of geometry on thermal comfort levels. The orientation of open spaces corresponds to the orientation of the length-wise axis; thus, four directions

are considered: N–S, E–W, NE–SW and NW–SE. To create several H/W ratios, models were used with buildings varying from 30 m to 135 m in length and width in increments of 15 m, with building heights varying from 3 m to 72 m in increments of 3 m (one storey).

3.3. Thermal comfort levels

To assess the user thermal comfort levels, this study uses the physiological equivalent temperature (PET), a thermal comfort index which takes into account all the environmental parameters which influence thermal comfort: temperature, radiation, humidity and wind speed [24]. The PET index has point scales from very cold to very hot (Figure 2), combining individual parameters (a metabolism of 80 W and a clothing resistance of 0.9 clo) with the mean radiant temperature (Tmrt).

Tmrt is one of the most important variables for assessing thermal comfort, especially during warm and sunny weather conditions [25]. It is defined as the uniform temperature of a hypothetical spherical surface surrounding the subject that would result in the same net radiation energy exchange with the subject as the actual, complex radiative environment. The Tmrt has the strongest influence on the PET index [26].

3.4. Simulation programs

The following computer programs were used in this study:

- TownScope 3.1: a three-dimensional urban information system coupled with solar evaluation tools

[27] that is devoted to supporting solar access decision-making in designing sustainable urban areas. TownScope was used to calculate the expected sunshine duration.

- ENVI-met 3.1: a numerical microclimatic tool used to measure climatic variables such as air temperature, relative humidity, wind speed and direction (Figure 3) – along with microclimatic variables like the Tmrt – using the location data [28]. The outdoor microclimate was calculated at the height of 1.2 m.
- RayMan 1.2: a radiation and biometeorological model whose main output is the calculation of the Tmrt [29]. The model also functions as a calculator for indices like the predicted mean vote (PMV) and the PET. Based on the human energy balance, the calculation of these thermal indices requires meteorological data including the air temperature, wind speed, air humidity, short- and long-wave radiation fluxes, and thermo-physiological data such as activity and clothing (Figure 4) [30].

Because ENVI-met does not compute the PET while RayMan does so through the use of precomputed data such as the Tmrt, wind speed, relative humidity and other geographical information, the present study uses ENVI-met's output of biometeorological parameters as the input for RayMan's PET computations.

3.5. The study parameters

This study was carried out in the town of Ali Mendjeli in the Constantine Province of Algeria (36°17'N, 6°35'E,

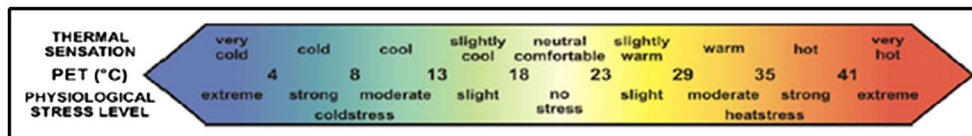


Figure 2. PET scale for human thermal sensation and stress [26].

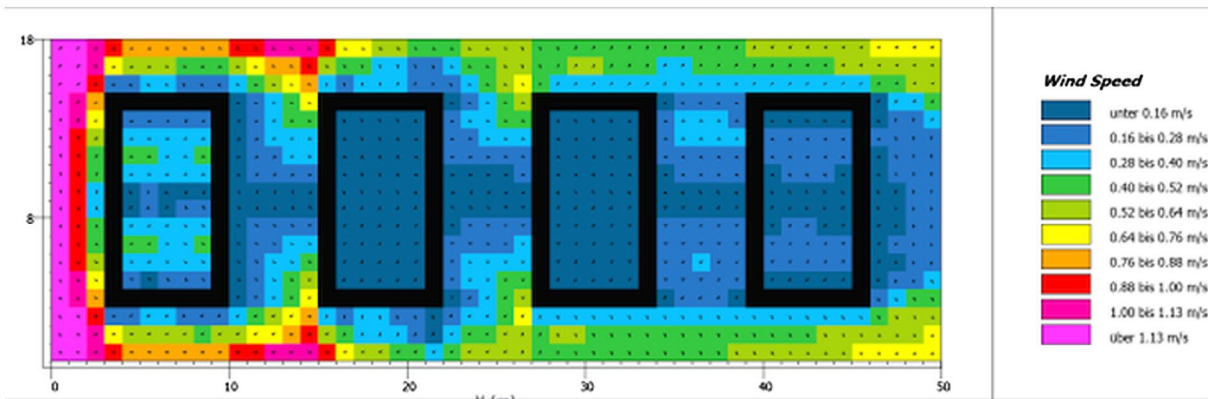


Figure 3. Example of ENVI-met results.

Figure 4. Input window for RayMan and the relevant values for the calculation of the T_{mrt} and thermal indices [29].

around 780 m above sea level). This city is characterised by a semi-arid climate that is hot and dry in the summer with an average maximum temperature of 36 °C occurring at about 15:00 and a humidity of about 25%, whereas the winter is cold and humid with an average maximum temperature of 7 °C and humidity that often exceeds 90%. In addition, the sun radiation intensities over this region are very high, with clear skies and sunny periods occupying a large portion of the day. The wind direction generally comes from the north-west in winter and the north in summer at an average speed of 2.1 m/s.

The simulations were performed from the initial time of 00:00 for typical conditions on two days: 21 December, the shortest day of year (air temperature = 6 °C, wind speed = 4.1 m/s, wind direction = 320 °, relative humidity = 87%) and 21 June, the longest day of the year (air temperature = 25 °C, wind speed = 1 m/s, wind direction = 0°, relative humidity = 57%). The ground and wall albedos are, respectively, 0.25, and 0.50.

4. Results and discussion

4.1. Sun exposure

The first phase began with a solar exposure analysis for a central point in the middle of each configuration (Figure 5). A total of 560 models were simulated (Figure 6). A summary of the results with respect to the different orientations is as follows:

- For the same orientation and a constant height and width, i.e. the same H/W ratio, different courtyards have the same duration of sunshine regardless of their length. Changes occur only by varying the value of courtyard width.
- The E–W orientation provides a long duration of sunshine both in the winter and the summer.
- The NE–SW orientation receives most of the sun radiation in the afternoon, while the NW–SE orientation receives most of the sun radiation in the early morning (Figure 5).
- The N–S orientation receives the shortest duration of sun radiation in the summer. It is even shorter in winter but not as much as for the NE–SW and NW–SE orientations (Figure 5).

Taking into account both the cold and warm seasons, only the spaces included in the range $0.4 \leq H/W$ ratio ≤ 0.6 and with a N–S orientation satisfy our requirements related to solar radiation exposure, i.e. half of the surface ground of courtyard is sunny at the winter solstice, but in the longest summer daytimes, it benefits during half of the time from shade.

4.2. Outdoor thermal comfort

In order to assess thermal comfort levels in a variety of urban spaces within the above determined range of

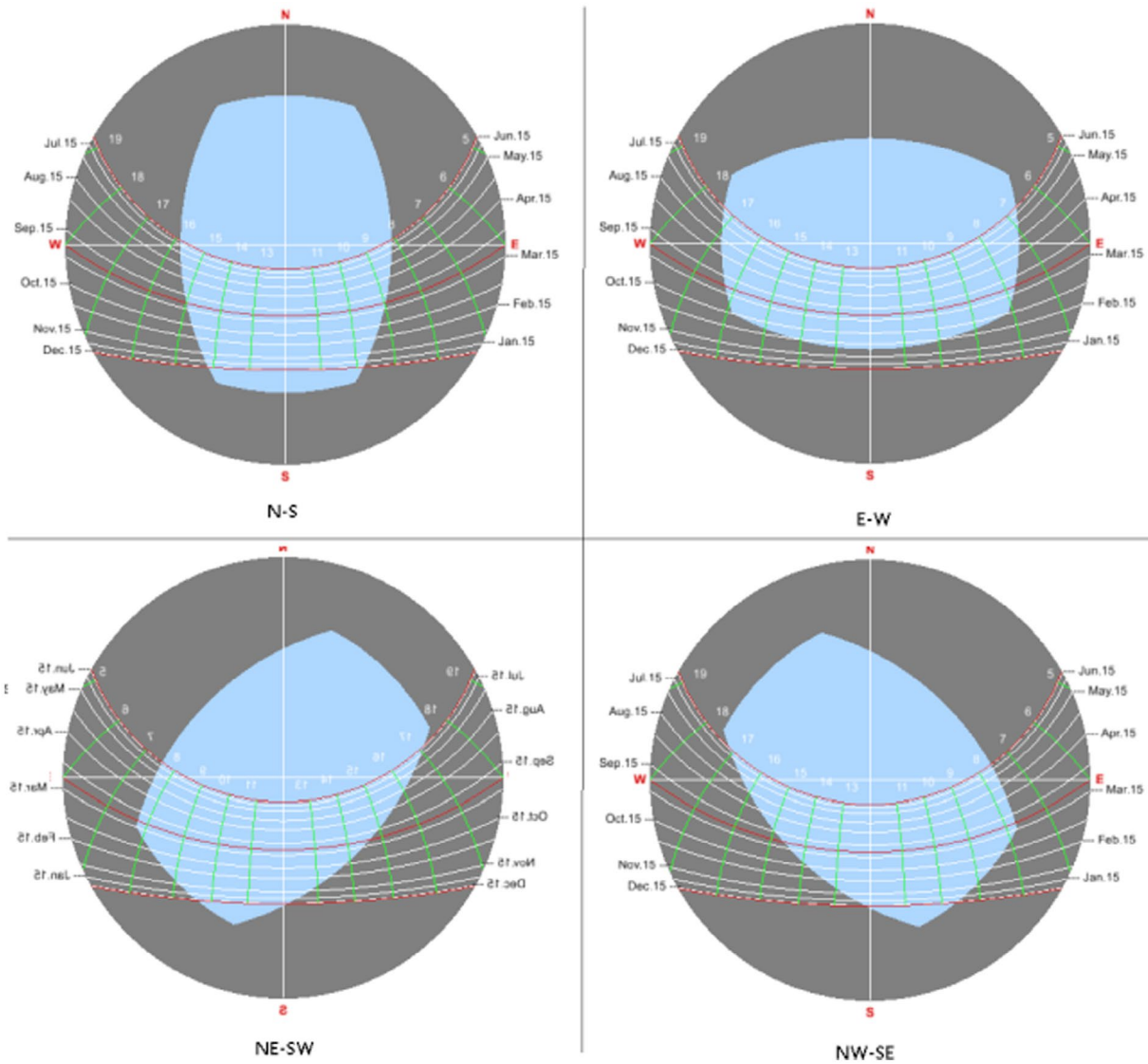


Figure 5. Solar paths generated by TownScope with an H/W ratio of 0.4 for various orientations.

$0.4 \leq H/W \text{ ratio} \leq 0.6$, the largest ratio of the open space S1 ($H/W = 0.1$) is compared with the ratios from the above determined range of $H/W = 0.4, 0.5$ and 0.6 in the open spaces S2, S3 and S4, respectively (Figure 7). Note that the lengths of these geometries are two times the size of the widths.

Figures 8, 9, 10 and 11 display the spatial and temporal distributions of the T_{mrt} and the PET at the centre point of the four cases for winter and summer. It can be seen that there is a high degree of resemblance between these T_{mrt} and PET variations, since radiation is the main factor determining comfort in these closed spaces.

4.2.1. Winter results

The results show a strong correlation between the H/W ratio and the T_{mrt} at night due to the enclosure reducing the energy exchanges between the ground and the sky

[31]. The maximum T_{mrt} value, -0.1°C , occurs in the deepest space (S4), which is a difference compared to S1 of 5.7°C (Figure 8). A strong cold stress is felt, and the PET values are 1.0°C in S4 and -3.4°C in S1 (Figure 9).

At 08:00 and 16:00, i.e. an hour after sunrise (07:45) and an hour before sunset (17:18), the radiation balance is still negative, which explains the variations in the T_{mrt} at the start and end of the day. The maximum difference between S1 and S4 is 1.7°C at 08:00 and 1.0°C at 16:00.

When the spaces receive direct radiation in between 08:00 and 16:00, the T_{mrt} values increase rapidly, reaching their maximum at 12:00. The values recorded for S2, S3 and S4 are almost identical at around 33.9°C , which is a difference of 2.5°C compared to S1.

The PET values vary between 1.6°C and 17.0°C , where the shallowest space S1 represents the highest thermal stress compared to the deeper profiles, with a longer

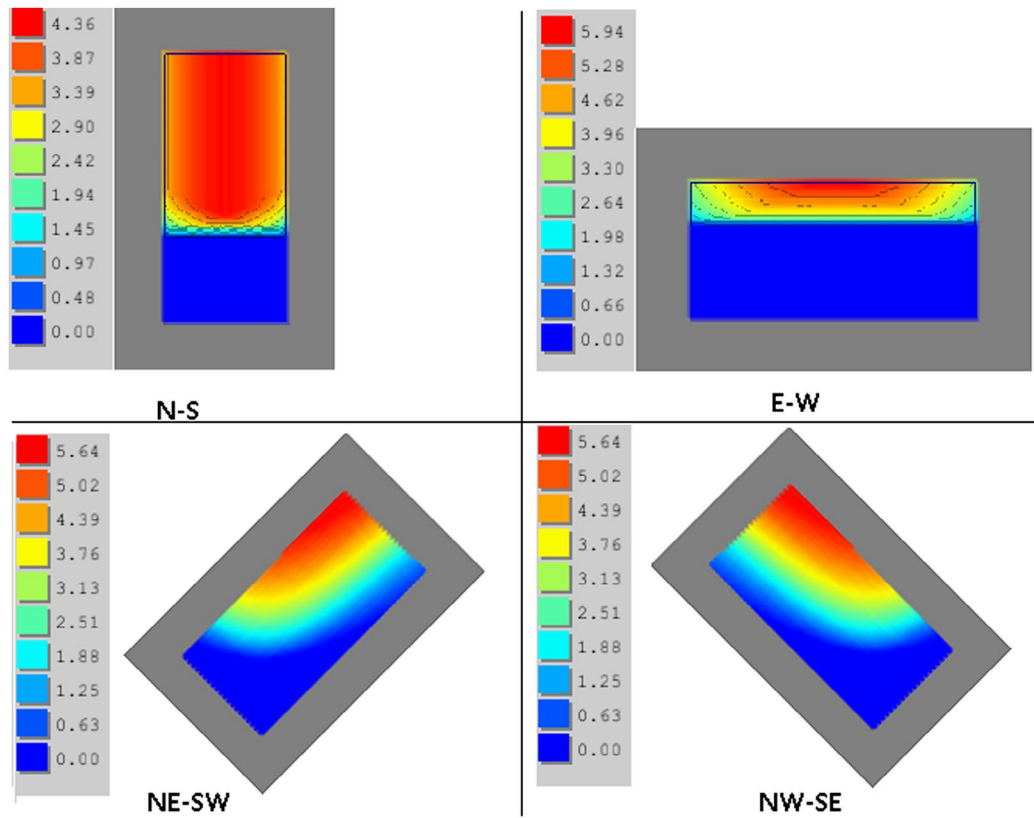


Figure 6. Sunshine duration, on 21st December, of H/W = 0.4 ratio geometry, related to various orientations using TownScope software.

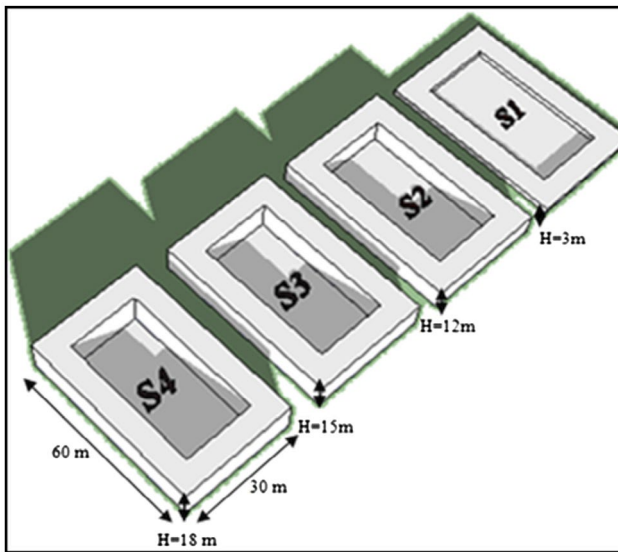


Figure 7. The geometries of the four urban spaces examined in the study.

period of comfort (Figures 2 and 9). The maximum PET in S1 is 9.2 °C compared to 17.0 °C in S4. The decline of the temperature for the two deeper spaces S3 and S4 occurs much more sharply after 14:00, about 10 °C, when the centre points are shaded from the solar rays by the surrounding vertical surfaces.

At the hottest time of day, the PET difference between S1 and S2 is 7.8°C. The calculation reveals a negative correlation between the H/W ratio and the PET ($R^2 = 0.96$), which demonstrates the importance of the geometry of urban spaces to human thermal comfort levels in winter. However, it should be noted that the PET evaluates the real thermal sensation without taking into account the usage of clothing that can potentially restore thermal comfort.

4.2.2. Summer results

The patterns of the T_{mrt} and the PET are very similar for the deeper spaces S2, S3 and S4 across the whole simulation period. However, considerable differences are observed between these three and the shallow case of S1.

At night, the T_{mrt} differences in the four spaces are very minor (Figure 10). The highest difference occurs at 02:00, 1.3°C, compared S4 and S1, and only by 0.4 °C compared with S2 and S3. The maximum recorded values of the PET is 22 °C in S1, and 22.7 °C in the other three spaces at 22:00, corresponding to comfortable (Figures 2 and 11). The minimum PET is reached at 06:00, with a maximum difference of 3 °C between S1 and S4.

At 08:00, the T_{mrt} is increasing rapidly in the shallow space S1, which is 26.6°C higher than the deeper profiles, since their centre area is still protected from direct radiation. This culminates at a temperature of 73.8 °C at 16:00,

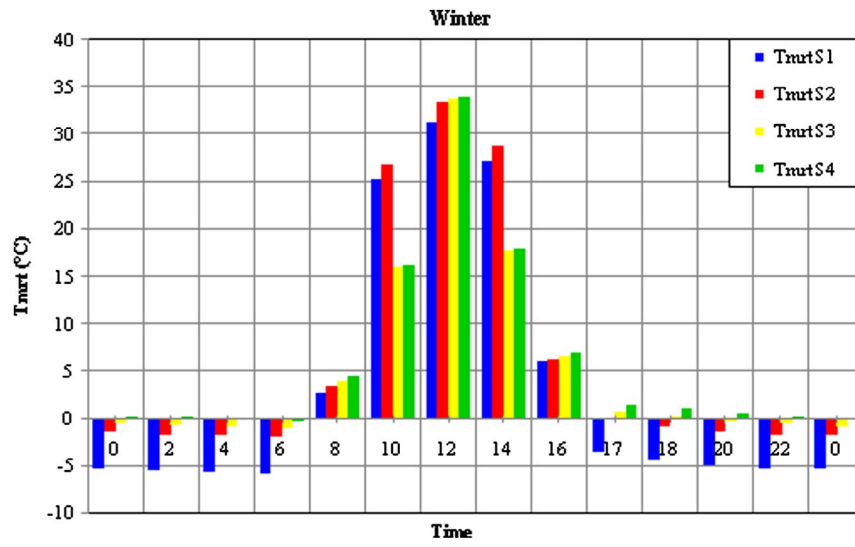


Figure 8. Winter Tmrt variations in the four urban spaces.

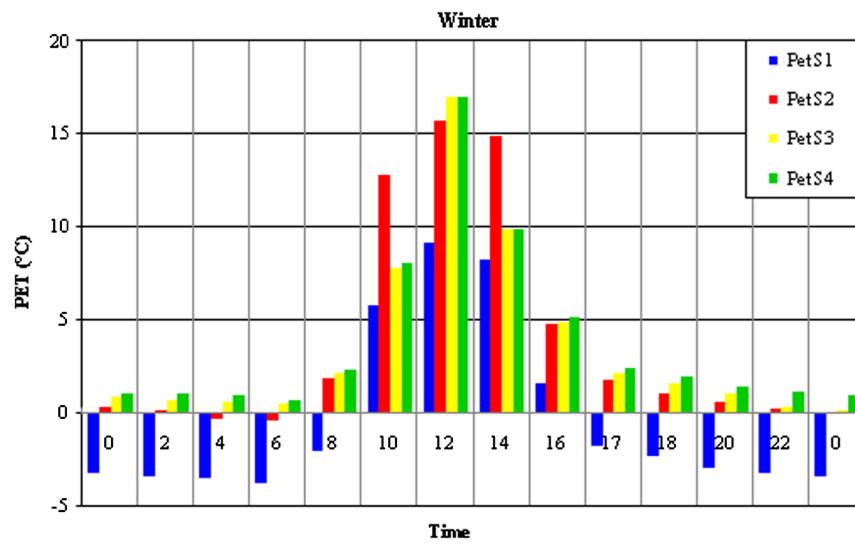


Figure 9. Winter PET variations in the four urban spaces.

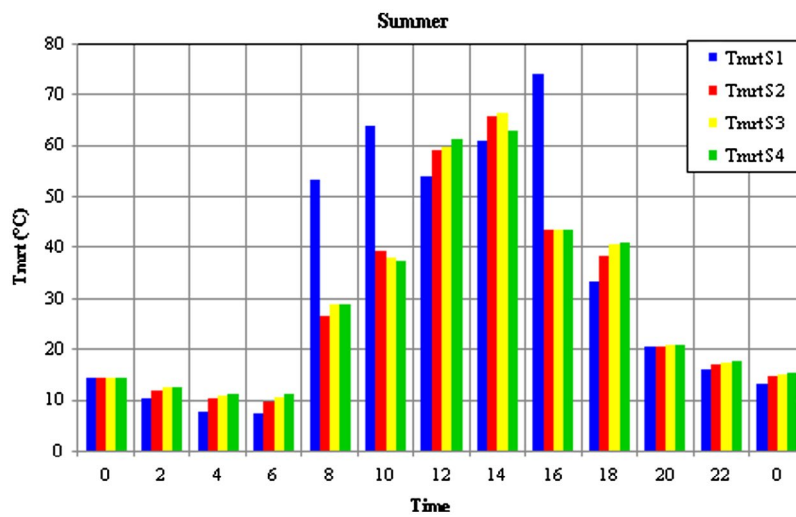


Figure 10. Summer Tmrt variations in the four urban spaces.

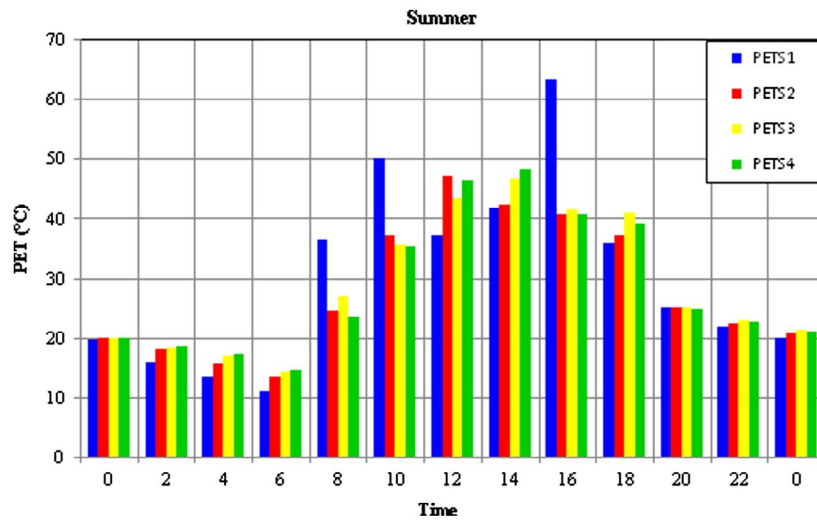


Figure 11. Summer PET variations in the four urban spaces.

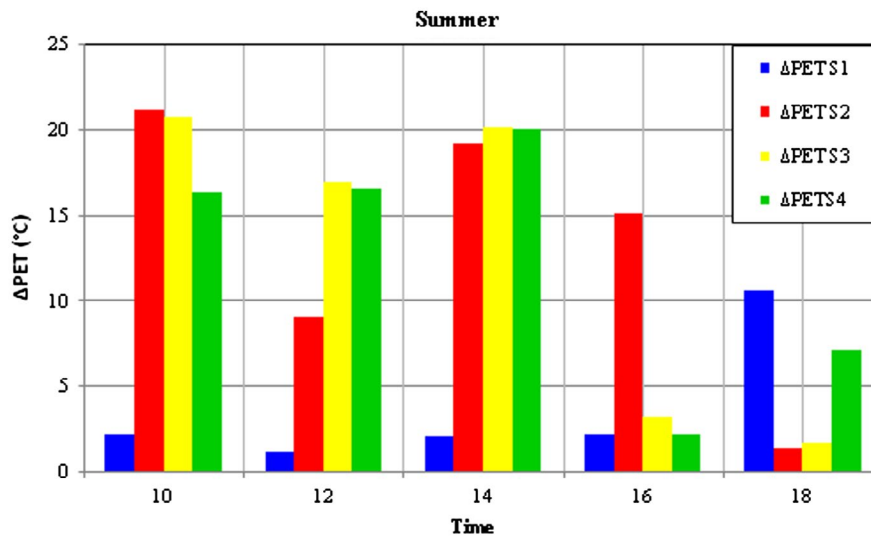


Figure 12. Difference in PET between sunny and shaded areas in the four urban spaces for the period 10:00 to 18:00.

and during the critical period of 12:00 to 14:00, the T_{mrt} in S1 is on average 6.4 °C lower than the rest (Figure 10). These results are inconsistent with the amounts of the incident radiation in a shallow open space; they are explained by the differential heating of ground surfaces and wind speed. In the three other spaces, the T_{mrt} increases at 10:00 and culminates at 14:00 at around 66.8 °C, a difference of 4.0 °C compared to S1.

In the afternoon, a rapid decrease is caused by the shadow projection of walls onto the receptors. This decrease reaches 22, 25.7, 27.7 and 40.8 °C at 18:00 in, S4, S3, S2 and S1, respectively compared to their recorded maximum values. These results inform us about the ability of shade to decrease the T_{mrt} and demonstrates the rapid cooling power of a shallow configuration. The conditions are similar for all cases for the later evening hours.

As illustrated in Figure 11, the PET values of the four locations are above the upper comfortable limit of 23 °C during the daytime (Figure 2). After 10:00 until 14:00 when solar radiation and ground radiation are at their maximum, the capacity of high ratio to keep fresh surfaces and space is reduced. This is consequence of the important storage of infrared radiations amplified by lack of effective ventilation (wind speed = 0 m/s) [32,33].

In this period, S4 has a maximum PET of 48.3 °C, corresponding to a state of extreme heat stress (Figure 2) compared to the maximum PET of 63.3 °C in S1 at 16:00 with a wind speed of 0.7 m/s. This reveals the ability of the height ratios of urban spaces to significantly reduce the extreme changes in thermal sensation. Nevertheless, the variation in the PET between the shaded and sunny areas is greatly reduced in the shallow space at just 2.1 °C

during the period of overheating (Figure 12), compared to 20°C for the deeper spaces [23].

The results reveal a positive correlation between the H/W ratio and the PET ($R^2 = 0.61$), which demonstrates the impact of deeper spaces on thermal comfort levels in the summer compared to shallow spaces, even with a lack of ventilation.

5. Conclusion

Urban morphology has a discordant seasonal effect on thermal comfort levels, with a demand for both compactness in the summer in order to secure protection from the sun and prevent overheating and openness in the winter to provide exposure to solar radiation for preventing the area from becoming too cold.

The focus of this study is to estimate the thermal ambience created by the geometry of outdoor urban spaces which are exposed to direct solar radiation, in terms of the H/W aspect ratio. By assuming reasonable solar exposure conditions in rectangular open spaces for both cold and hot seasons, a margin of $0.4 \leq H/W \text{ ratio} \leq 0.6$ combined with an N–S orientation of the open space has been determined by simulation. Through comparing the thermal environment provided by the above with that of a shallow urban space, it has been established that the deeper spaces are effective at providing good levels of thermal comfort in the winter. However, it is hard to provide optimal thermal comfort in the summer in spaces which are exposed to solar radiation during the hottest period of the day. The geometry with the higher H/W ratio is only effective in providing good levels of thermal comfort in combination with good ventilation of the space.

Besides the various thermal comfort situations offered by shaded areas in these deep outdoor urban spaces, a thermally comfortable duration could be substantially increased once the performance of the space is optimised through the porosity of wind and dynamic solutions such as trees, water features, and so on. A direction for future research is to examine the impact of wind and other factors on the thermal comfort levels of urban spaces in order to see if they have the potential to improve their thermal performance during the critical hours of the day. This work could also focus on the impact of urban space geometry on the indoor thermal conditions and energy performance of the surrounding buildings.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

- [1] S.A. Khandaker, *Comfort in urban spaces: defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments*, *Energy and Buildings* 35 (2003), pp. 103–110.
- [2] H. Akbari and S. Konopacki, *Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada*, *Energy* 29 (2004), pp. 191–210.
- [3] M. Kolokotroni, X. Ren, M. Davies, and A. Mavrogianni, *London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings*, *Energy and Buildings* 47 (2012), pp. 302–311.
- [4] G.H. Landsberg, *The Urban Climate*, Academic Press, New York, 1981.
- [5] I. Eliasson, *The use of climate knowledge in urban planning*, *Landsc Urban Plan* 48 (2000), pp. 31–44.
- [6] T.R. Oke, *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*, Report N°. 81, World Meteorological Organization (WMO), Instruments and Observing Methods, 2006.
- [7] ASHRAE, Chapter 8 – Thermal Comfort, in *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE, Atlanta, 2001, pp. 8.1–8.29.
- [8] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers, *Thermal comfort in outdoor urban spaces: Understanding the human parameter*, *Solar Energy* 70, (2001) pp. 227–235.
- [9] P.O. Fanger, *Thermal Comfort*, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [10] F. Lindberg, *Modeling the urban climate using a local governmental geo-database*, *Meteorol. Appl.*, 14, (2007) pp. 263–273.
- [11] T.R. Oke, *Street design and urban canopy layer climate*, *Energy and Buildings* 11, (1988), pp. 103–113.
- [12] I. Eliasson, *Urban Geometry, surface temperature and air temperature*, *Energy and Build*, 15, (1990/ 91), pp. 141–145.
- [13] R. Böhm, *Urban bias in temperature time series*, *Climate Change* 38 (1998), pp. 113–128.
- [14] A.J. Arnfield, *Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*, *Int. J. Climatol.*, (2003) pp. 1–26.
- [15] P.E. Todhunder, 1990, *Microclimatic variation attributable to urban canyon asymmetry and orientation*, *Phys. Geogr.*, 11, (1990), pp. 131–141.
- [16] K. Steemers, M. Baker, D. Crowther, J. Dubiel, and N. Nikolopoulou, *Radiation absorption and urban texture*, *Build. Res. Inf.* 26 (1998), pp. 103–112.
- [17] V. Olgyay, *Design with Climate*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1963.
- [18] T.R. Oke, *Boundary Layer Climates*, Routledge, New York, NY, 1987.
- [19] B. Givoni, *Climate Considerations in Building and Urban Design*, Wiley, New York, 1998.
- [20] K. Steemers, N. Baker, D. Crowther, J. Dubiel, M. Nikolopoulou, and C. Ratti, *City texture and microclimate*, *Urban Design Study* 3 (1997), pp. 25–50.
- [21] AS. Muhaisen, *Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions*. *Build Environ*, 41, (2006), pp. 1731–1741.

- [22] A.S. Muhaisen and M.B. Gadi, *Shading performance of polygonal courtyard forms*, *Build Environ* 41 (2006), pp. 1050–1059.
- [23] S. Berkovic, A. Yezioro, and A. Bitan, *Study of thermal comfort in courtyards in a hot arid climate*, *Solar Energy* 86 (2012), pp. 1173–1186.
- [24] P. Höpfe, *The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment*, *Int J Biometeorol* 43 (1999), pp. 71–75.
- [25] H. Mayer and P. Höpfe, *Thermal comfort of man in different urban environments*, *Theor Appl Climatol* 38 (1987), pp. 43–49.
- [26] A. Matzarakis and H. Mayer, *Another kind of environmental stress: thermal stress*, *WHO Newsletter* 18 (1996), pp. 7–10.
- [27] J. Teller and S. Azar, *TownScope II – a computer system to support solar access decision-making*, *Solar Energy* 70 (2001), pp. 187–200.
- [28] ENVI-met 3.1 software, manual online. Available at <http://envi-met.com>
- [29] A. Matzarakis, F. Rutz, and H. Mayer, *Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model*, *Int J Biometeorol* 51 (2007), pp. 323–334.
- [30] A. Matzarakis, F. Frank Rutz, and H. Mayer, *The thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model*, the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6–8 September 2006.
- [31] H. Andrade, *Microclimatic variations of thermal comfort in Lisbon city district*, the 5th International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland, 2003.
- [32] L. De Souza, *Incorporating sun paths for solar analysis in the 3D skyview extension*, CUPUM, The 9th International Conference, London, 2005.
- [33] I. Eliasson, *Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use*, *Atmos Environ* 30 (1996), pp. 379–392.



Prénom et Nom : **Chahrazed KEDISSA**

Titre : **Pour Une Géométrie Urbaine Combinant Confort Thermique Extérieur et Economie d'Énergie**

Cas des cours urbaines en climat semi-aride

THESE en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat ès sciences en Architecture

Option : Architecture Bioclimatique

Résumé

Le confort thermique dans les espaces publics est un facteur clé de leur attractivité et maintient la santé publique de leurs utilisateurs. En outre, chaque tentative de rationalisation de l'utilisation de l'énergie pour le refroidissement ou le chauffage est liée à la modération des climats locaux au sein de ces espaces extérieurs entourés de bâtiments.

Cette question est devenue particulièrement urgente avec le nombre croissant de villes et de leurs habitants et les changements conséquents dans leurs climats locaux qui deviennent évidents dans les îlots de chaleur urbains, entraînant souvent un gaspillage irrationnel en énergie pour le refroidissement.

La forme tridimensionnelle de ces espaces extérieurs, exprimée en H/W et le degré d'ouverture au ciel SVF, est un facteur clé dans la création de ces climats locaux en raison de l'interaction des facteurs climatiques avec les bâtiments et la forme de l'espace qu'ils entourent.

Répondre aux exigences de confort pour toutes les saisons, rend la conception de ces espaces difficile.

L'objectif de cette recherche est de proposer des indicateurs et des recommandations que les architectes et urbanistes peuvent utiliser pour créer des espaces en adéquation avec les conditions climatiques locales du site, voire les améliorer.

La recherche a été principalement réalisée en utilisant la simulation numérique par plusieurs programmes Townscop 3.2, TRNsys17, RayMan pro 3.1, Envimet3.1. Ceci nous a permis d'accéder à ces indicateurs qui ont été projetés sur le site de la ville nouvelle d'Ali Mendjeli (Constantine), afin d'évaluer et améliorer le bien-être thermique dans ses espaces publics selon les résultats de la simulation et en utilisant des indicateurs de confort thermique PET, PMV, mPET.

Mots clés : Climat local, places publiques, H/W , confort thermique, SVF, PET, mPET, énergie

Directeurs de thèse : Pr Saliha ABDOU
Pr Rafik BELARBI

université Constantine 3
université de La Rochelle - France

Année universitaire 2019- 2020