

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : d'architecture
Ref :.....



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

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de
Doctorat en Science en : architecture

Option : établissements humains dans les villes arides et semi arides

Intitulé

**L'impact de l'espace vert sur le microclimat urbain et
l'utilisation des espaces extérieurs
(Cas de la ville de Constantine)**

Présentée par :

Halima GHERRAZ

Soutenue publiquement le 04/03/2021

Devant le jury composé de :

Pr. ZEMMOURI Nouredine
Pr. ALKAMA Djamel
Pr. DIB Belkacem
Dr. SERITI Leila
Dr. BOUZAHER Soumia
Dr. BENHASSINE Nassira

Professeur
Professeur
Professeur
MCA
MCA
MCA

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

université de Biskra
Université de Guelma
Université de Batna 1
université de Biskra
Université de Biskra
Université de Constantine 3

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : d'architecture
Ref :.....



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

thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de
Doctorat en Science en : architecture

Option : établissements humains dans les villes arides et semi arides

Intitulé

**L'impact de l'espace vert sur le microclimat urbain et
l'utilisation des espaces extérieurs
(Cas de la ville de Constantine)**

Présentée par :

Halima GHERRAZ

Soutenue publiquement le 04/03/2021

Devant le jury composé de :

Pr. ZEMMOURI Nouredine
Pr. ALKAMA Djamel
Pr. DIB Belkacem
Dr. SERITI Leila
Dr. BOUZAHER Soumia
Dr. BENHASSINE Nassira

Professeur
Professeur
Professeur
MCA
MCA
MCA

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

université de Biskra
Université de Guelma
Université de Batna 1
université de Biskra
Université de Biskra
Université de Constantine 3

Dédicace

A mes très chers parents, pour leur amour, sacrifices, patience, soutien moral, conseils et surtout leurs prières pour moi. Que Dieu vous garde en bonne santé.

A mon mari Tarek et mes deux filles Tasnime et Ranime, que Dieu vous garde pour nous.

A mon cher frère et sa petite famille, mes chères sœurs et ses petites familles

A mes chères amies spécialement Imen Guechi, pour son soutien, amour et ses conseils.

A tous ceux qui ont attendu l'achèvement de ce travail de près ou de loin et qui ont prié 'Dieu' pour plus de réussites.

A mon pays.

Je dédie ce modeste travail

Remerciements

Je tiens à remercier :

Mon Dieu, le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté et la force pour mener ce travail à terme

Tout d'abord, toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse **Pr Alkama Djamel**, qui a bien voulu diriger ce travail, qui m'a encouragé et m'a aidé dans cette recherche. La pleine confiance qu'il m'a accordée m'a permis d'élaborer un travail de recherche propre à mes aspirations. Je tiens à mentionner le plaisir que j'ai eu à travailler avec-lui, je ne peux que vous exprimer ma gratitude et mon profond respect.

Mes remerciements les plus sincères à vous messieurs et mesdames les membres du jury, pour avoir bien voulu examiner ce modeste travail.

Je présente mes vifs remerciements à mon mari pour sa patience, son aide, et son existence durant les moments les plus difficiles de ce parcours.

Toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail.

Merci.

Sommaire

Sommaire.....	I
Liste des Figures.....	XI
Liste des Graphes.....	XVI
Liste des tableaux.....	XX
Glossaire.....	XXIII

Chapitre introductif

-Introduction.....	02
1-La problématique.....	05
2-Questions de recherche.....	08
3-Les hypothèses.....	08
4-Objectifs de recherche.....	08
5-Le contexte d'étude.....	09
6-L'analyse conceptuelle.....	09
7-La méthodologie de travail.....	14
8-Structure de la thèse.....	16

Partie 1 : Etude théorique

Chapitre 1 : Climat, microclimat et confort thermique Extérieur

Introduction	22
I-Climat et climatologie.....	22
I-1-Climatologie.....	22
I-2-Le climat.....	23
I-3- classification des climats.....	23
I-4-Les échelles du climat.....	25
II-Le microclimat urbain.....	26
II-1-Les composants du microclimat.....	27
II-1-1-L'humidité du sol.....	27
II-1-2-La température du sol.....	27
II-1-3-La température de l'air.....	28
II-1-4-L'humidité de l'air.....	29
II-1-5- Les vents (direction et vitesse).....	29
II-2-Les paramètres qui influencent le microclimat urbain.....	30
II-3- L'ilot de chaleur urbain.....	30
II-3-1-Les types de l'ICU.....	32
II-3-2-Les causes de l'ICU.....	32
II-3-3-Les caractéristiques de l'ICU.....	33
II-3-4-Les impacts de l'ICU.....	33
III-Le confort thermique dans les espaces extérieurs.....	34
III-1-Définition.....	34

III-2-Les aspects du confort thermique.....	35
III-3-Les échanges thermiques.....	35
III-3-1-Le rayonnement de la surface du corps (les échanges radiatifs)	36
III-3-2-La convection de surface du corps.....	37
III-3-3-La convection respiratoire.....	37
III-3-4- la convection de la surface de la peau.....	38
III-3-5-Les pertes par sudation.....	38
III-4-Les paramètres du confort thermique.....	39
III-4-1-Paramètres relatifs à l'environnement.....	39
III-4-2-Paramètres relatifs à l'individu.....	40
III-4-2-1-Les mécanismes de thermorégulation.....	40
III-4-2-2-Le métabolisme.....	41
III-4-2-3-L'habillement.....	41
III-5-Les indices de confort thermique.....	42
III-5-1-Les indices thermiques.....	42
III-5-1-1-Température effective universelle (ETU).....	42
III-5-1-2-Le modèle COMFA	43
III-5-1-3-L'indice de stress thermique (ST).....	44
III-5-1-4-Le modèle MENEX.....	45
III-5-1-5-La température équivalente physiologique PET.....	45
III-5-1-6-L'indice de vote moyen prévisible (PMV).....	47
III-5-1-7-Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD).....	48
III-5-1-8-La température effective standard SET*.....	48
III-5-1-9-Indice thermique universel de climat UTCI.....	49
III-5-2-Les indices empiriques.....	49
III-5-3-Les indices basés sur des équations linéaires.....	49
Conclusion.....	51

Chapitre 2 : le végétal urbain

Introduction.....	53
1-Définition.....	53
2- Historique.....	54
3-Pourquoi un espace vert urbain (les bienfaits de la végétation urbaine).....	56
3-1-Bienfaits environnementaux.....	56
3-1-1-Bienfaits écologiques.....	56
3-1-2-Contrôle de la pollution	56
3-1-3-Biodiversité et conservation de la nature.....	57
3-2-Bienfaits économiques et esthétiques.....	58
3-2-1-Économies d'énergie.....	58
3-2-2-Valeur de la propriété.....	58
3-3-Bienfaits sociaux et psychologiques.....	58
3-3-1-Loisirs et bien-être.....	58
3-3-2-Santé humaine.....	59
4-Les catégories de l'espace vert urbain.....	61

4-1-Les parcs urbains et périurbains.....	61
4-2-Les jardins publics.....	61
4-3-Les jardins spécialisés.....	61
4-4-les forêts urbaines.....	61
4-5-Les alignements boisés.....	61
5-La typologie de végétation.....	61
5-1-Le végétal grimpant.....	61
5-2- La pelouse et la végétation couvrante.....	62
5-3-L'arbre urbain.....	63
5-3-1-Selon la hauteur de tige.....	63
5-3-2-Les arbustes.....	64
5-3-3-les baliveaux.....	64
5-3-4-Selon la longévité des feuilles.....	65
6-Impact de l'espace vert sur le microclimat.....	66
6-1-Effet de refroidissement de l'air et atténuation de température.....	68
6-2-Effet de l'ombrage.....	69
6-2-1-Effet d'ombrage d'un arbre isolé.....	70
6-2-2-L'arbre d'alignement.....	70
6-3- Effet de la pelouse.....	72
6-4-Les toitures et les façades vertes.....	73
6-5-Modification des échanges radiatifs.....	73
6-6-Effet sur les vents.....	74
6-7-Atténuation de bruit.....	75
7-Caractéristiques de la végétation.....	75
7-1- L'évapotranspiration.....	75
7-2-Albédo.....	76
7-3-La transmission.....	76
7-4-La perméabilité.....	77
8-Comment réaliser une plantation.....	78
8-1-L'analyse environnementale et paysagère.....	78
8-1-1-Les conditions du milieu.....	78
8-1-2-Le paysage et les ambiances.....	78
8-1-3-L'étude sociale.....	78
8-2- L'étude de sol.....	78
9-Les défis de la gestion des espaces verts urbains.....	80
9-1-Facteurs socio-économiques et démographiques.....	80
9-2- Aspects quantitatifs des espaces verts urbains.....	81
9-3- Aspects qualitatifs des espaces verts urbains.....	83
Conclusion.....	84

Chapitre 3 : Apport de la télédétection dans l'étude de la végétation

-Introduction.....	87
I- La télédétection.....	87

I-1-C'est quoi la télédétection ?.....	87
I-2- Principes du spectre électromagnétique en télédétection.....	90
I-3-La signature spectrale.....	90
I-4-Les capteurs.....	91
I-4-1-Capteurs électro-optiques.....	93
I-4-2-Capteurs infrarouges thermiques.....	93
I-4-3-Capteurs radar passifs à micro-ondes et à imagerie.....	93
I-5-Caractéristiques des données télédétectées.....	94
I-5-1-Photographies.....	94
I-5-2-Les images satellite.....	95
I-5-3-La résolution spatiale.....	95
I-5-4-La résolution spectrale.....	96
I-5-5-La résolution radiométrique.....	98
I-5-6-La résolution temporelle.....	99
II- L'étude de la végétation par le biais de la télédétection.....	99
II-1-Caractéristiques spectrales de la végétation.....	99
II-1-1-Caractéristiques de la canopée végétale.....	100
A-L'indice de surface foliaire.....	101
B-L'indice de répartition angulaire des feuilles.....	101
II-1-2- Les propriétés optiques des feuilles.....	101
A- Les pigments foliaires.....	101
B- La structure cellulaire des feuilles.....	102
C- L'influence de la teneur en eau.....	102
II-2-Les indices de végétation.....	102
II-2-1- les indices simples.....	103
A-L'indice de végétation par quotient (Ratio Vegetation Index RVI).....	103
B-L'indice différentiel de végétation (Difference Vegetation Index DVI).....	104
C- L'indice de végétation par différence normalisé (Normalized Difference Vegetation Index NDVI).....	104
II-2-2-Les indices de végétation prenant en compte les effets atmosphériques.....	105
II-2-3-Les indices de végétation prenant en compte les influences du sol.....	105
A-L'indice de végétation perpendiculaire (Perpendicular Vegetation Index PVI)	105
B- indice de végétation ajusté pour le sol (Soil Adjusted Vegetation Index SAVI).....	106
C- L'indice modifié de végétation ajusté au sol (modified Soil Adjusted Vegetation Index MSAVI).....	106
D- L'indice optimisé de végétation ajusté au sol (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index OSAVI).....	107
II-2-4-Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère.....	107
II-2-5-Les indices prenant en compte la température de surface.....	108
III-Théorie des patrons et des métriques paysagères et leur utilisation pour analyser l'impact de la configuration spatiale et les changements temporels de la végétation sur le microclimat.....	109

III-1-La notion du paysage.....	109
III-2-L'écologie du paysage.....	110
III-3-La structure du paysage0.....	111
III-4-Les patrons du paysage (landscape patterns).....	112
III-4-1-Définition	112
III-4-2-Les classes des patrons du paysage (classes of landscape patterns)	112
-Les patrons de points spatiaux.....	112
-Les patrons de réseau linéaire.....	113
-Les patrons de surface.....	113
-Les patrons de carte catégoriques (ou thématiques).....	113
III-5-Les métriques paysagère (landscape metrics).....	113
III-5-1-Définition.....	113
III-5-2-Les niveaux de métriques paysagères	114
-Les métriques de patch.....	115
-Les métriques de classe.....	115
-Les mesures au niveau du paysage.....	115
III-5-3-Les aspects de métriques paysagères.....	115
-Les métriques de la composition	115
-Les métriques de la configuration	116
Conclusion.....	119
<i>Chapitre 4 : Approches et méthodes utilisées pour évaluer l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur</i>	
-Introduction.....	121
I-Recherches menées sur l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur.....	121
I-1-Approche par simulation.....	122
I-1-1-Le modèle ENVI-met.....	123
I-1-2-Le modèle RayMan et Sky Helios.....	126
I-1-3-Solène-microclimat.....	128
I-1-4-Modèle TEB-SURFEX.....	130
I-2- Approche paramétrique.....	132
I-3- Approche par enquête.....	135
II-Recherches menées sur l'impact de l'espace vert sur le climat urbain et la température de surface du sol à travers la télédétection.....	137
II-1-Recherches portées sur l'impact de l'espace vert sur la température de surface du sol (LST) et la mitigation de l'îlot de chaleur urbain via la télédétection.....	137
II-1-1-L'étude de (Weng et al, 2004).....	138
II-1-2-L'étude de (Cao et al, 2010).....	138
II-1-3- L'étude de (Kong et al, 2014).....	140
II-1-4-L'étude de (Rasul et al, 2015).....	140
II-1-5-L'étude de (Boudjellal & Bourbia, 2017).....	141
II-1-6-L'étude de (Chun & Guldmann, 2018).....	142
II-2-Recherche sur l'impact de la configuration spatiale et les changements spatio-	

temporels de l'espace vert sur le microclimat à travers les métriques paysagères.....	143
II-2-1-L'étude Chen et al (2014).....	144
II-2-2-L'étude de Asgarian et al (2014).....	146
II-2-3-L'étude de Kong F et al, (2014).....	147
II-2-4-L'étude d'Estoque et al (2016).....	149
II-2-5-L'étude de Masoudi et al (2019).....	150
II-2-6-L'étude d'Amani-Beni et al (2019).....	152
-Conclusion	154

Partie 2 Diagnostic et Analyse

Chapitre 1 : Présentation de Cas d'étude

-Introduction.....	158
I-Présentation de la ville de Constantine.....	158
I-1-Situation géographique de la ville de Constantine.....	158
I-2-Situation Démographique.....	159
I-3-Historique de la ville de Constantine.....	161
II-Analyse Climatique de la ville de Constantine.....	163
II-1-Analyse des données climatiques.....	163
II-2-Définition de l'étage bioclimatique de la ville de Constantine.....	165
II-2-1-Correction des températures et de précipitations.....	165
II-2-2-définition de l'étage bioclimatique via ArgGis.....	167
II-2-3-Le gradient thermique de la ville de Constantine.....	170
II-2-4-Le diagramme Ombrothermique.....	171
III-Caractéristiques topologiques de la ville.....	172
IV-L'occupation du sol.....	174
V- Le potentiel forestier de la willaya de Constantine.....	175
-Conclusion	178

Chapitre 2 : Approche cartographique pour un inventaire de l'espace vert à Constantine

-Introduction	180
I-Etudes effectuées sur l'espace vert de la ville de Constantine.....	180
II-Etude de la genèse de l'espace vert à Constantine	184
II-1-Genèse de l'espace vert avant la colonisation de la ville de Constantine en 1937.....	184
II-2-Genèse de l'espace vert dans la période coloniale.....	185
II-3-Genèse de l'espace vert après l'indépendance.....	189
II-3-1-Le parc de Djbel El Ouahch.....	190
II-3-2-Le parc de Bardo.....	191
II-3-3-Espace vert dans les quartiers résidentiels.....	192
II-3-4-Les espaces verts à Zoughi slimane.....	192
II-3-5-Les arbres d'alignement.....	193

II-3-6-Les forêts urbaines.....	194
II-3-7-Les berges des Oued Rhumel et Oued Boumerzoug.....	195
III-La normalisation des espaces verts en Algérie.....	196
IV-Cartographie et inventaire des espaces verts de la ville de Constantine.....	197
IV-1-Méthodologie du travail.....	197
IV-2-Vectorisation de l'espace vert.....	197
IV-3- Distribution de la population à Constantine.....	198
IV-4-Traitement de données sur ArcGis.....	199
IV-5-Inventaire quantitatif de l'espace vert à Constantine	199
IV-5-1-Secteur de Sidi Rached.....	200
IV-5-2-Secteur d'El Kantara.....	201
IV-5-3-Secteur de Belle Vue.....	202
IV-5-4-Secteur de Sidi Mabrouk.....	203
IV-5-5-Secteur les Muriers.....	204
IV-5-6-Secteur 5 Juillet.....	205
IV-5-7-Secteur de Ziadia.....	206
IV-5-8-Secteur de Guammas.....	207
IV-5-9-Secteur de Boudraa Saleh.....	208
IV-6-Estimation du déficit en espaces verts.....	210
-Conclusion.....	213

Chapitre 3 : évaluation de l'impact de l'espace vert sur le climat urbain de la ville de Constantine via la télédétection

Introduction.....	215
I-Méthodologie du travail.....	216
I-1- Acquisition de données.....	217
I-2- Traitement et analyse de données.....	218
I-2-1-Indice différentiel normalisé de la végétation (Normalized Difference Vegetation Index NDVI).....	218
I-2-2-Température de surface du sol (Land Surface Temperature LST).....	219
I-2-3-Estimation de l'effet de l'îlot de refroidissement de l'espace vert (green cool island GCI).....	221
I-2-4-Estimation de l'îlot de refroidissement urbain de l'espace vert (UCI).....	222
I-2-5-Les métriques paysagère utilisées.....	222
II-Résultats de l'analyse.....	224
II-1-Traitement des images	224
II-2-La composition colorée	224
II-3-Carte de l'usage du sol (Classification supervisée).....	226
II-4-Indice différentiel normalisé de la végétation (NDVI)	229
II-4-1-Comparaison entre les saisons.....	229
II-4-2-Comparaison de l'indice de NDVI durant la période d'étude.....	231
II-5-Extraction de la température de surface du sol (LST).....	233
II-6-Corrélation NDVI/LST.....	236
II-7-Estimation de l'îlot de refroidissement de l'espace vert (GCI) et L'îlot de	

refroidissement urbain (UCI).....	238
II-7-1-Calcul de l'intensité de (GCI).....	238
II-7-2-Discussion.....	240
A-Relation de l'îlot de refroidissement et l'altitude.....	241
B-Relation îlot de refroidissement/Type de végétation.....	241
C-Relation îlot de refroidissement/densité de végétation.....	242
II-8-Estimation de l'impact de changement de la composition et la configuration spatiale de l'espace vert sur le microclimat.....	242
II-8-1-Extraction de l'espace vert.....	243
II-8-2-Création de la grille de classification.....	243
II-8-3-Conversion des vecteurs en Raster.....	244
II-8-4-Conversion de Raster en fichier ASCII	244
II-8-5-Résultats	245
II-8-5-1-Résultats des indices (métriques) de l'espace vert à l'échelle du paysage.....	245
II-8-5-2- Résultats des indices (métriques) de l'espace vert à l'échelle du patch.....	246
II-8-5-3- Résultats des indices (métriques) de l'espace vert à l'échelle de la classe.....	246
II-8-6-Corrélation entre les indices (métriques) de l'espace vert et la température de surface du sol (LST).....	247
II-8-6-1-Mesures liées à la zone	248
II-8-6-2-Fragmentation et agrégation.....	248
II-8-6-3-Complexité des formes.....	248
II-8-7-Discussion.....	250
-Conclusion.....	250

Chapitre 4 : évaluation de confort thermique extérieur dans les espaces verts de la ville de Constantine

-Introduction.....	253
I- La méthodologie de travail.....	253
I-1- le corpus d'étude	253
I-1-1- Le jardin Bachir Bennacer	253
I-1-2- La Place Ahmed Bey.....	254
I-1-3-Le parc de Bardo.....	254
I-1-4- Rue canyon avec et sans arbres d'alignement.....	255
I-1-5- Le jardin public de Bayrouth.....	256
I-1-6-Jardin public et place publiques à Zouaghi.....	257
I-2-La prise de mesure.....	258
I-3-Les mesures météorologiques.....	258
I-4-Choix du logiciel de simulation	258
I-5-L'enquête sur terrain.....	259
I-5-1-Préparation du formulaire de questions.....	259
I-5-2-L'échantillonnage.....	260

I-5-3-Taille de l'échantillon sélectionné.....	260
I-5-4-Logiciel de traitement des résultats.....	260
II-Evaluation du confort des usagers dans les espaces extérieurs à Constantine.....	260
II-1-variation des paramètres climatiques mesurés.....	260
II-1-1-Variation de la température de l'air.....	260
II-1-2- Variation de l'humidité relative.....	262
II-1-3-Variation de la vitesse de l'air.....	263
II-2- Processus de modélisation.....	265
II-3- Analyse de facteur de vue du ciel (SVF).....	265
II-4-Estimation des indices de confort.....	267
II-4-1-Température moyenne radiante (T_{mrt}).....	268
II-4-2- Le vote moyen prévisible (PMV).....	269
II-4-3- La température physiologique équivalente (PET).....	270
II-4-4-La température standard effective (SET*).....	271
II-4-5-Indice thermique universel de climat (UTCI).....	272
II-5-Corrélation entre les paramètres climatiques et les indices de confort thermique..	273
II-5-1-Corrélation entre la température de l'air et les indices de confort thermique..	273
II-5-2-Corrélation entre la vitesse des vents et les indices de confort thermique.....	274
II-5-3-Corrélation entre l'humidité relative et les indices de confort thermique.....	275
II-5-4-Corrélation entre la température moyenne radiante et les indices de confort thermique.....	275
III-Analyse et interprétation de données collectées par le questionnaire.....	277
III-1-L'analyse Uni-variée.....	277
III-1-1-Informations générales des usagers interrogés.....	277
III-1-2-Lieu de résidence par rapport à l'espace public.....	277
III-1-3-Activités actuelles des usagers interrogés.....	278
III-1-4-La sensation thermique des usagers interrogés.....	279
III-1-5-Perception de la température.....	280
III-1-6-Perception de la vitesse de l'air.....	281
III-1-7-Perception de l'humidité relative.....	281
III-1-8-Perception de l'intensité des rayons solaires.....	282
III-1-9-Intensité de fréquentation de l'espace.....	283
III-1-10-Degré de satisfaction des usagers.....	284
III-2-L'analyse Bi-variée.....	285
III-2-1-L'acceptation de l'environnement thermique par les usagers.....	285
III-2-2- L'acceptation de la température de l'air.....	286
III-2-3- L'acceptation de la Vitesse de l'air.....	286
III-2-4- L'acceptation de l'humidité relative.....	287
III-2-5- L'acceptation de l'intensité des rayons solaires.....	288
III-3-L'analyse des correspondances.....	289
III-3-1-Jardin Bachir Bennacer.....	289
III-3-2-Jardin de Bayrouth.....	290
III-3-3-Jardin de Zouaghi.....	291
III-3-4-Place Ahmed Bey.....	292

III-3-5-Place de Zouaghi.....	292
III-4-L'analyse de la corrélation en 3D.....	293
III-5-L'analyse par la composante principale (ACP).....	295
III-5-1-Jardin de Bennacer.....	295
III-5-2-Jardin de Bayrouth.....	296
III-4-3-Jardin de Zouaghi.....	298
III-4-4-Place Ahmed Bey.....	300
III-4-5-Place de Zouaghi.....	301
-Conclusion.....	303

Conclusion générale

1-Conclusion générale.....	306
2-Limites de la recherche.....	316
3-Futurs axes de recherche.....	316

Bibliographie

1-Livres.....	319
2-Thèses.....	320
3-Articles.....	322
4-Cours.....	333
5-Webographie.....	333

liste des annexes

Annexe1.....	335
Annexe2.....	339
Annexe3.....	342
Annexe4.....	346

Résumé

Résumé.....	354
Abstract.....	355
ملخص.....	356

Liste des Figures

Chapitre introductif

Figure n°01 : Processus méthodologique (Auteurs, 2020)..... 19

Chapitre 1 : Climat, microclimat et confort thermique extérieur

Figure n° 01 : Classification des climats mondiaux (HUFTY, 2001)..... 24

Figure n° 02 : Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU), adapté de (Oke T.R, 2006)..... 26

Figure n° 03 : Cycle quotidien de la température de l'air dans et au-dessus d'une forêt (Foken T, 2008)... 29

Figure n° 04 : Génération de couches limites internes au-dessus d'une surface non homogène (Foken , 2008) 30

Figure n° 05 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain (Oke T.R, 1973)..... 31

Figure n° 06: Formation de l'îlot de chaleur urbain (Rizwan A.M *et al.* 2008)..... 31

Figure n° 07 : Les différents types des échanges thermiques (Depecker *et al.* 1989)..... 36

Figure n° 08 : Diagramme de confort de Givoni (Fauconnier, 1992)..... 40

Figure n° 09 : Correspondance entre le PMV et PPD (<https://www.beswic.be/fr/>)..... 48

Chapitre 2 : Le végétal urbain

Figure n° 01: Le fonctionnement d'un arbre (Gillig *et al.*, 2008).....54

Figure n° 02 : Différence entre milieu urbain et rural en existence de la végétation (Gillig *et al.*, 2008)..... 57

Figure n° 03 : Différence entre milieu urbain avec et sans arbre (Gillig *et al.*, 2008).....58

Figure n° 04 : Vision globale sur les bienfaits du végétal urbain (Manusset, S., 2010)59

Figure n° 05: types du végétal grimpant (<https://www.gammvert.fr/2-1212-plantes-dexterieur/2-3082-plantes-grimpantes>).....62

Figure n° 06 : Le thym serpolet (<https://www.aquaportail.com/fiche-plante-40-thymus-serpyllum.html>).....62

Figure n° 07 : Thymus serpyllum (<https://www.aquaportail.com/fiche-plante-40-thymus-serpyllum.html>).....62

Figure n° 08 : Pelouse d'un jardin (<https://www.18h39.fr/articles/les-cles-pour-avoir-une-belle-pelouse.html>).....63

Figure n° 09: Appellation des arbres en fonction de la hauteur du tronc ((Deschamps, C & Daydé, A ; 1992)...64

Figure n° 10: Types d'arbuste (<https://www.gammvert.fr/2-1212-plantes-dexterieur/2-1231-arbustes>).....64

Figure n° 11: appellation des végétations en fonction de la hauteur mesurée depuis le sol jusqu'à l'extrémité de la pousse (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992).....64

Figure n° 12: Quelques arbres conifères (<https://handivert.wordpress.com/reconnaissance-de-vegetaux/les-vegetaux/les-coniferes/>).....65

Figure n° 13 : Interception de radiation solaire par le feuillage (Reiter. S, 2007).....67

Figure n° 14 : Emission du rayonnement solaire dans les zones boisées et dégagées (Reiter. S, 2007).....67

Figure n° 15 : Effet de la végétation sur la température de l'air et de surface de sol (Reiter. S, 2007).....69

Figure n° 16 : Influence de l'implantation de l'arbre isolé sur le cheminement et l'usage de l'espace (Gillig *et al.*, 2008).....70

Figure n° 17 : Influence de type d'implantation sur la perception de l'espace et son ambiance (Gillig *et al.*, 2008).....71

Figure n° 18 : Dimensions de neuf arbres les plus communs (COOMBES A. J. 1993)..... 71

Figure n° 19 : Impact de l'espèce sélectionné sur les ambiances créées (Gillig *et al.*, 2008)..... 72

Liste des Figures

Figure n° 20 : Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat (APUR, 2007).....	74
Figure n° 21 : Utilisation de la morphologie de la végétation pour diminuer la vitesse de vent (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992).....	74
Figure n° 22 : Utilisation de la végétation comme brise de vents (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992).....	75
Figure n° 23 : Comparaison de l'atténuation acoustique de trois écrans végétaux (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992).....	75
Figure n° 24 : Absorption, transmission et réflexion de la radiation par feuillage (Shahidan. M. F et al, 2007)...	77

Chapitre 3 : L'apport de la télédétection dans l'étude de la végétation

Figure n° 01 : Diagramme du spectre électromagnétique (Lillesand <i>et al</i> , 2015).....	88
Figure n° 02 : Une partie du spectre électromagnétique global (Thenkabail, 2016).....	89
Figure n° 03 : Principe de la télédétection (Thenkabail, 2016).....	89
Figure n° 04 : Illustration d'une onde électromagnétique (Thenkabail, 2016).....	90
Figure n° 05 : Signatures spectrales de différents éléments de la Terre dans le spectre de la lumière visible (https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensing)	91
Figure n° 06 : Capteurs passif et actifs (Thenkabail, 2016).....	92
Figure n° 07 : Interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire (https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/vegetation/caracteristique-vegetation/structure.html)	100
Figure n° 08 : Relation simplifiée entre la température de surface et l'indice de végétation	108
Figure n° 09 : Classifications des composantes basiques du paysage selon le modèle taches-matrice-corridors (Burel & Baudry, 2000).....	109
Figure n° 10 : Les éléments composant de la structure de chaque système écologique, applicable à chaque échelle spatio-temporelle (Noon & Dale, 2002).....	111
Figure n° 11: Illustration du pattern/process paradigm (Koffi, 2008 par Lucedito, 2019).....	112
Figure n° 12 : Les niveaux et les aspects de métriques paysagères (Mcgarial et al, 2005).....	115
Figure n° 13 : La distribution de la taille des patches (Mcgarial et al, 2005).....	116

Chapitre 4 : Approches et méthodes utilisées pour évaluer l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur

Figure n° 01 : model 3D d'un cas d'étude sur ENVI-met (https://www.envi-met.com).....	123
Figure n° 02: Résultat de simulation de l'indice PET par ENVI-met (Kuttler, 2020).....	124
Figure n° 03 : Interface du logiciel RayMan (Matzarakis et al, 2015).....	126
Figure n° 04 : Interface de Sky Helios (Matzarakis et al, 2015).....	127
Figure n° 05 : Résultats de simulation de microclimat urbain avec Solène (https://solenemc.hypotheses.org).....	129
Figure n° 06 : Echange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère dans TEB (www.cnrm.fr).....	131
Figure n° 07 : Exemple des outputs de Ladybug plug-in for Rhino (www.food4rhino.com)	133
Figure n° 08 : Relation entre l'intensité de PCI et la taille du parc, (a) printemps, (b) été, (c) automne (Cao et al, 2010).	139

Liste des Figures

Figure n° 09 : LST moyenne, îlot de refroidissement urbain et îlot de chaleur urbain dans les différents usages du sol (Rasul et al, 2015).....	141
Figure n° 10 : Relation entre LST moyenne et îlot de refroidissement d'Oasis en relation avec l'usage du sol (Boudjellal & Bourbia, 2017).....	142
Figure n° 11 : Impacts spatiaux de l'espace vert sur les changements de température (Chun & Guldman, 2018).....	143
Figure n° 12 : Mesure de LST le long du gradient urbain (Asgarian et al, 2014).....	147
Figure n° 13 : Relation entre la densité des surfaces imperméables et espaces verts et LST moyenne de 3 villes, (Estoque et al, 2016).....	150
Figure n° 14 : Changements dans la composition et la configuration de l'espace vert urbain à Singapour de 1973 à 2015 (Masoudi et al, 2019).....	152
Figure n° 15 : Relation usage du sol/LST (Amani-Beni et al, 2019).....	154
Figure n° 16 : Relation distance à partir de parc/ LST (Amani-Beni et al, 2019).....	154
Figure n° 17 : Les relations LST/ ratio d'espaces verts (Amani-Beni et al, 2019).....	154
Figure n° 18 : relation plus grand indice de patch/LST (Amani-Beni et al, 2019).....	154

PARTIE 2 :

Chapitre 1 : Présentation de cas d'étude

Figure n° 01 : Situation géographique de la wilaya de Constantine via ArcGis 10.5 , (Auteur, 2019).....	153
Figure n° 02 : Situation géographique de la ville de Constantine via ArcGis bande (4,3 ,2) , (Auteur, 2019)....	153
Figure n° 03 : Division administrative de la wilaya de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).....	153
Figure n° 04 : Structure urbaine de la ville avant 1837.....	156
Figure n° 05 : Structure urbaine de la ville avant 1873.....	156
Figure n° 06 : Structure urbaine de la ville avant 1919.....	157
Figure n° 07 : Structure urbaine de la ville avant 1959.....	157
Figure n° 08 : Structure urbaine de la ville avant 1966.....	157
Figure n° 09 : Structure urbaine de la ville après 1966.....	157
Figure n° 10 : Calcul de Quotient d'Emberger sur Excel (Auteur, 2019).....	162
Figure n° 11 : Définition des étages bioclimatiques de chaque station via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).....	162
Figure n° 12 : Les étages bioclimatiques selon le climagramme d'Emberger de trois stations (Auteur, 2019).....	163
Figure n° 13 : les étages bioclimatiques de la wilaya de Constantine selon le climagramme d'Emberger (Auteur, 2019).....	164
Figure n° 14 : Carte topographique de la wilaya de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).....	167
Figure n° 15 : Carte des pentes de la ville de Constantine par degré via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).....	167
Figure n° 16 : Carte topographique 3D de la ville de Constantine via ArcScene 10.5, (Auteur, 2019).....	168
Figure n° 17 : Coupe topographique de la ville de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).....	168
Figure n° 18 : Coupe topographique de la ville de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).....	168
Figure n° 19 : Carte d'occupation du sol de la wilaya de Constantine (direction des services agricole de la ville de Constantine, 2019).....	169

Liste des Figures

Chapitre 2 : Approche Cartographique pour un inventaire de l'espace vert à Constantine

Figure n° 01 : Jardin des orangers, palais Ahmed Bey (https://palaisdumaghreb.wixsite.com/epoqueottomane/palais-ahmed-bey-constantine).....	184
Figure n° 02 : Jardin des palmiers, palais Ahmed Bey (http://cnra.dz/atlas/palais-ahmed-bey/).....	184
Figure n° 03 : Plan de la médina de Constantine en 1837 (http://www.constantine-hier-aujourd'hui.fr/).....	185
Figure n° 04 : Vue aérienne sur le percement colonial (https://www.judaicalgeria.com/pages/constantine.html).....	186
Figure n° 05 : La rue des squares (https://www.judaicalgeria.com/pages/constantine.html).....	186
Figure n° 06 : Squares et jardins publics du centre ville de Constantine (Ali Khoudja, 2011).....	186
Figure n° 07 : Square Bachir Bennacer actuellement (Auteur, 2019).....	187
Figure n° 08 : Le square Gambetta, (https://www.facebook.com/AlgerieCartesPostalesAnciennes/).....	187
Figure n° 09 : Le jardin de Sousse, (https://www.facebook.com/BladyAljazyrNhbhaWnhbAllyYhbha/).....	188
Figure n° 10 : Jardin Bayrouth à Sidi Mebrouk (Auteur, 2018).....	188
Figure n° 11 : Genèse de l'espace vert de la ville de Constantine dans la période coloniale (Auteur, 2019).....	189
Figure n° 12 : Jardin des sept tournants et Guerfi à Ciloc (Auteur, 2019).....	190
Figure n° 13 : Parc de Djbel El Ouahch (https://www.trfihi-parks.com/en/park-details/4811-Altasliat-jabal-alwahsh-park).....	191
Figure n° 14 : Terrain du parc de Bardo avant l'intervention (Archive de l'auteur).....	191
Figure n° 15 : Parc de Bardo actuellement (Auteur, 2019).....	192
Figure n° 16 : Espace verts dans l'habitat collectif de Ciloc et Boussouf respectivement (Auteur, 2019).....	192
Figure n° 17 : Jardin public à Zouaghi Slimane (Auteur, 2018).....	193
Figure n° 18 : Jardin public à Zouaghi Slimane (Archive de l'auteur).....	193
Figure n° 19 : Arbres d'alignement à Constantine (Auteur, 2019).....	194
Figure n° 20 : Vue sur la forêt d'El Mansourah (Auteur, 2019).....	194
Figure n° 21 : Forêt El Meridj (https://www.trfihi-parks.com/en/park-details/4829-El-Meridj).....	195
Figure n° 22 : Berge d'Oued Rhumel et Boumerzoug respectivement (Auteur, 2019).....	195
Figure n° 23 : vectorisation des espaces verts à Constantine (Auteur, 2020).....	198
Figure n° 24 : Traitement de données collectées sur ArcGis10.5 (Auteur, 2020).....	199
Figure n° 25 : Secteur urbain Sidi Rached (Auteur, 2020).....	200
Figure n° 26 : Secteur urbain El Kantara (Auteur, 2020).....	201
Figure n° 27 : Secteur urbain Belle Vue (Auteur, 2020).....	202
Figure n° 28 : Secteur urbain Sidi Mebrouk (Auteur, 2020).....	203
Figure n° 29 : Secteur urbain les Muriers (Auteur, 2020).....	204
Figure n° 30 : Secteur urbain 5 Juillet (Auteur, 2020).....	205
Figure n° 31 : Secteur urbain Ziadia (Auteur, 2020).....	206
Figure n° 32 : Secteur urbain El Gammas (Auteur, 2020).....	207
Figure n° 33 : Secteur urbain Boudraa Saleh (Auteur, 2020).....	208

Chapitre 3 : Evaluation de l'impact de l'espace vert sur le climat urbain de la ville de Constantine via la télédétection

Liste des Figures

Figure n° 01 : Méthodologie du travail (Auteur, 2019).....	217
Figure n° 02 : Composition colorée de la scène de juin 1990, et juin 2000 respectivement (Auteur, 2019).....	225
Figure n° 03 : Composition colorée de la scène de juin 2005 et juin 2010 respectivement (Auteur, 2019).....	225
Figure n° 04 : Composition colorée de la scène de juin 2015 et juin 2019 respectivement (Auteur, 2019).....	226
Figure n° 05 : Usage du sol, Juin 1990, 2000 respectivement (Auteur, 2019).....	226
Figure n° 06 : Usage du sol, Juin 2005, 2010 respectivement (Auteur, 2019).....	227
Figure n° 07 : Usage du sol, Juin 2015, 2019 respectivement (Auteur, 2019).....	227
Figure n° 08 : Carte de l'indice NDVI de Décembre 2018 et Mars 2019 respectivement (Auteur, 2019).....	229
Figure n° 09 : Carte de l'indice NDVI de Juin et Septembre 2019 respectivement (Auteur, 2019).....	229
Figure n° 10 : Carte de l'indice NDVI de Juin 1990 et 2000 respectivement (Auteur, 2019).....	231
Figure n° 11 : Carte de l'indice NDVI de Juin 2005 et 2010 respectivement (Auteur, 2019).....	231
Figure n° 12 : Carte de l'indice NDVI de Juin 2015 et 2019 respectivement (Auteur, 2019).....	231
Figure n° 13 : Carte de LST de Juin 1990 et 2000 respectivement (Auteur, 2019)	234
Figure n° 14 : Carte de LST de Juin 2005 et 2010 respectivement (Auteur, 2019).....	234
Figure n° 15 : Carte de LST de Juin 2015 et 2019 respectivement (Auteur, 2019).....	235
Figure n° 16 : carte de l'espace vert reclassée et superposé avec la grille de classification (Auteur, 2020).....	244
Figure n° 17 : carte de l'espace vert format Raster (Auteur, 2020).....	244
Figure n° 18 : Fichier de format ASCII de l'espace vert Juin 2019 (Auteur, 2020).....	245

Chapitre 4 : Evaluation de confort thermique dans les espaces extérieurs de la ville de Constantine:

Figure n° 01 : situation géographique du jardin Bennacer et la place Ahmed Bey.....	254
Figure n° 02 : jardin Bachir Bennacer (Auteur, 2019).....	254
Figure n° 03 : Place Ahmed Bey (Auteur, 2019).....	254
Figure n° 04 : vue aerienne sur le parc de Bardo.....	255
Figure n° 05 : parc de Bardo (Auteur, 2019).....	255
Figure n° 06 : Situation des deux rues.....	256
Figure n° 07 : La rue Belouezdad et la rue Ben Meliek respectivement (Auteur, 2019).....	256
Figure n° 08 : Vue aérienne sur le jardin de Bayrouth.....	256
Figure n° 09 : Jardin Beyrouth (Auteur, 2019).....	257
Figure n° 10 : Situation de jardin public de Zouaghi (Auteur, 2019).....	257
Figure n° 11 : place publique à Zouaghi (Auteur, 2019).....	258
Figure n° 12 : modélisation de jardin Bennacer et place Ahmed Bey respectivement.....	267
Figure n° 13 : modélisation de jardin Bayrouth.....	267
Figure n° 14 : modélisation de la rue Belouezdad et Ben Meliek respectivement.....	268
Figure n° 15: modélisation de jardin de Zouaghi.....	268

Liste des Graphes

PARTIE 2 :

Chapitre 1 : Présentation de cas d'étude

Graphe n°01 : Croissance urbaine de Constantine entre 1987 et 2008 (Auteur, 2019).....	160
Graphe n°02 : Taux d'urbanisation de la wilaya de Constantine entre 1987 et 2008 (Auteur, 2019).....	160
Graphe n°03 : Taux d'accroissement annuel moyen de la population de la wilaya de Constantine entre 1987 et 2008 (Auteur, 2019).....	160
Graphe n°04 : Rythme d'urbanisation de la wilaya de Constantine entre 1987 et 2008 (Auteur, 2019).....	160
Graphe n°05 : Taux d'urbanisation des agglomérations de Constantine en 1998 et 2008 (Auteur, 2019).....	161
Graphe n°06 : population des agglomérations de Constantine en 1998 et 2008 (Auteur, 2019).....	161
Graphe n°07 : Variation de température de l'aire dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019).....	164
Graphe n°08 : Variation d'humidité relative dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019).....	164
Graphe n°09 : Variation de température de l'aire dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019).....	165
Graphe n°10 : Variation de température de l'aire dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019).....	165
Graphe n°11 : Variation de Radiance moyenne du rayonnement global horizontale dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019).....	165
Graphe n°12 : Variation de la luminance globale dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019).....	15965
Graphe n°13 : Le gradient thermique de la ville de Constantine (Auteur, 2019).....	170
Graphe n°14 : Diagramme ombrothermique de station de Constantine (Auteur, 2019).....	171
Graphe n°15 : Diagramme ombrothermique de station de Djbel El Ouahch (Auteur, 2019).....	172
Graphe n°16 : Diagramme ombrothermique de station de Chettaba (Auteur, 2019).....	172

Chapitre 2 : Approche Cartographique pour un inventaire de l'espace vert à Constantine

Graphe n°01 : Distribution de la population de la ville de Constantine par secteur (Auteur, 2020).....	198
Graphe n°02 : distribution de l'espace vert de la ville de Constantine par secteur selon les données de l'APC (Auteur, 2020).....	199
Graphe n°03 : Distribution de l'espace vert cartographié par secteur (Auteur, 2020).....	210

Chapitre 3 : Evaluation de l'impact de l'espace vert sur le climat urbain de la ville de Constantine via la télédétection

Graphe n°01 : Changement de valeurs de NDVI d'une saison à une autre (Auteur, 2019).....	230
Graphe n°02 : Variation de valeurs de NDVI de Juin 1990 et 2000 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019).....	232
Graphe n°03 : Variation de valeurs de NDVI de Juin 2005 et 2010 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019).....	233
Graphe n°04 : Variation de valeurs de NDVI de Juin 2010 et 2019 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019).....	233
Graphe n°05 : Changement de valeurs de l'indice NDVI durant la période d'étude (Auteur, 2019).....	233

Liste des Graphes

Graphe n°06 : variation de valeurs de LST de Juin 1990 et 2000 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019).....	235
Graphe n°07 : Variation de valeurs de LST de Juin 2005 et 2010 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019).....	236
Graphe n°08 : Variation de valeurs de LST de Juin 2015 et 2019 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019).....	236
Graphe n°09 : Corrélation NDVI/LST Juin 1990 et 2000 respectivement via SAGA (Auteur, 2019).....	237
Graphe n°10 : Corrélation NDVI/LST Juin 2005 et 2010 respectivement via SAGA (Auteur, 2019).....	237
Graphe n°11 : Corrélation NDVI/LST Juin 2015 et 2019 respectivement via SAGA (Auteur, 2019).....	237
Graphe n°12 : Ilot de refroidissement de l'espace vert et urbain Juin 1990 et 2000 respectivement.....	240
Graphe n°13 : Ilot de refroidissement de l'espace vert et urbain Juin 2005 et 2010 respectivement.....	240
Graphe n°14 : Ilot de refroidissement de l'espace vert et urbain Juin 2005 et 2010 respectivement.....	240
Graphe n°15: changement des métriques paysagères des l'espace vert de la ville de Constantine durant la période d'étude (Auteur, 2020).....	245
Graphe n°16 : Relation entre surface du patch et indice de la forme (Auteur, 2020).....	246
Graphe n°17 Corrélation entre les métriques paysagères et la température de surface du sol LST	249

Chapitre 4 : Evaluation de confort thermique dans les espaces extérieurs de la ville de Constantine:

Graphe n°01 : logiciels de simulation utilisés pour calculer les indices du confort thermique extérieur en fonction de modèle calculés (PMV, PET, UTCI, SET *, ETU et PT) et TMR. (Coccolo et al, 2016).....	261
Graphe n°02 : variation de l'humidité relative dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique.....	263
Graphe n°03 : variations de la vitesse de l'air dans les étudiés par rapport à la station météorologique.....	264
Graphe n°04 : variation de la T_{mrt} dans le corpus d'étude durant les heures de mesure.....	269
Graphe n°05 : variation de PMV dans le corpus d'étude durant les heures de mesure.....	270
Graphe n°06 : variation de PET dans le corpus d'étude durant les heures de mesure.....	271
Graphe n°07 : variation de SET* dans le corpus d'étude durant les heures de mesure.....	272
Graphe n°08 : variation de l'UTCI dans le corpus d'étude durant les heures de mesure.....	273
Graphe n°09 : Corrélation entre la température de l'air et le PMV, PET, SET et UTCI respectivement.....	273
Graphe n°10 : Corrélation entre la vitesse des vents et le PMV, PET, SET et UTCI respectivement.....	274
Graphe n°11 : Corrélation entre l'humidité relative et le PMV, PET, SET et UTCI respectivement.....	275
Graphe n°12 : Corrélation entre la température moyenne radiante et les indices de confort.....	276
Graphe n°13 : Lieu de résidence des usagers du jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	277
Graphe n°14 : les activités actuelles des usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	278
Graphe n°15 : la sensation thermique des usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	279
Graphe n°16 : Perception de la température par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	280

Liste des Graphes

Graphe n°17 : Perception de la vitesse de l'air par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.	281
Graphe n°18 : Perception de l'humidité relative par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	282
Graphe n°19 : Perception de l'humidité relative par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	283
Graphe n°20 : intensité de fréquentation des espace (jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement).....	283
Graphe n°21 : degré de satisfaction des usagers (jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement).....	284
Graphe n°22 : variables croisées « la sensation thermique et l'acceptation de l'environnement thermique » jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	285
Graphe n°23 : variables croisées « perception de la température et le changement de la température » jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	286
Graphe n°24 : variables croisées « la perception de la vitesse de l'air et l'acceptation de la vitesse de l'air » jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	287
Graphe n°25 : variables croisées « la perception de l'humidité et l'acceptation de l'humidité » au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement.....	287
Graphe n°26 : variables croisées « la perception de l'intensité des rayons solaires et l'acceptation de l'intensité» au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi	288
Graphe n°27 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle au jardin de Bennacer.....	289
Graphe n°28 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids au jardin de Bennacer.....	289
Graphe n°29 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle au jardin de Bayrouth.....	290
Graphe n°30 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids au jardin de Bayrouth.....	290
Graphe n°31 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle au jardin de Zouaghi.....	291
Graphe n°32 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids au jardin de Zouaghi.....	291
Graphe n°33 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle à la place Ahmed Bey.....	292
Graphe n°34 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids à la place Ahmed Bey.....	292
Graphe n°35 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids à la place Ahmed Bey.....	293
Graphe n°36 : Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers au jardin de Bennacer.....	293

Liste des Graphes

Graphe n°37 : Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers au jardin de Bayrouth.....	293
Graphe n°38 : Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers au jardin de Zouaghi.....	294
Graphe n°39 : Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers à la place Ahmed Bey.....	294
Graphe n°40 : Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers à la place de Zouaghi.....	294
Graphe n°41 : Analyse par la composante principale (jardin Bennacer).....	295
Graphe n°42 : graphe d'observation de l'analyse ACP (jardin Bennacer).....	296
Graphe n°43 : Analyse par la composante principale (jardin Bayrouth).....	297
Graphe n°44 : graphe d'observation de l'analyse ACP (jardin Bayrouth).....	298
Graphe n°45 : Analyse par la composante principale (jardin Zouaghi).....	298
Graphe n°46 : graphe d'observation de l'analyse ACP (jardin Zouaghi).....	299
Graphe n°47 : Analyse par la composante principale (place Ahmed Bey).....	300
Graphe n°48 : Graphe d'observation de l'analyse ACP (place Ahmed Bey).....	301
Graphe n°49 : Analyse par la composante principale (place Zouaghi).....	301
Graphe n°50 : Graphe d'observation de l'analyse ACP (place Zouaghi).....	302

Liste des Tableaux

PARTIE 1 :

Chapitre introductif

Tableau n°1 : récapitulation de l'analyse conceptuelle.....	13
---	----

Chapitre 1 : Climat, microclimat et confort thermique extérieur

Tableau n°1 : Classification des climats selon la température et les précipitations (Hufty , 2001 ; Bonan 2016)...	24
Tableau n°2 : Classification des climats selon le régime pluviométrique (Hufty , 2001 ; Bonan 2016).....	25
Tableau n°3 : classification des climats selon le régime pluviométrique (Hufty , 2001 ; Bonan 2016).....	25
Tableau n°4 : valeurs du métabolisme pour différentes activités (Depecker et al. 1989).....	41
Tableau n°5 : valeur de l'isolation thermique de quelque vêtement (Depecker et al. 1989).....	42
Tableau n°6 : tableau d'évaluation de BUDJET énergétique (traité par l'auteur).....	44
Tableau n°7 : valeurs du PMV selon Fanger et Michael Bruse (traité par l'auteur).....	47
Tableau n°8 : Correspondance entre SET sensation et état physiologique (Gagge et al., 1986).....	49
Tableau n°9 : les échelles thermiques des normes analysées (S. Coccolo et al, 2016).....	50

Chapitre 2 : Le végétal urbain

Tableau n°1 : Principaux bénéfices des espaces verts (Bolund & Hunhammar 1999, modifié selon Morell, 2005).....	60
Tableau n°2 : Types de la végétation urbaine (Bolund & Hunhammar 1999, modifié selon Breuste et al.,2013).....	65
Tableau n°3 : Effets des arbres urbains selon l'échelle de mise en œuvre dans la ville dépassant le million d'habitants (Merrouche. M, 2011).....	68
Tableau n°4 : Espèce et transmission du rayonnement solaire (Gomez. F et al, 1998).....	77
Tableau n°5 : Relation site-végétation (Stefulesco, 1993).....	80

Chapitre 4 : Approches et méthodes utilisées pour évaluer l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur

Tableau n°1 : Logiciels de simulation utilisés pour calculer les indices du confort thermique extérieur en fonction de modèle calculés (PMV, PET, UTCI, SET *, ETU et PT) et TMR. (Coccolo et al, 2016).....	123
--	-----

PARTIE 2 :

Chapitre 1 : Présentation de cas d'étude

Tableau n°1 : L'évolution des indices de l'urbain entre 1987 et 2008 de la wilaya de Constantine (RGPH, 2008).....	160
Tableau n°2 : Evaluation de taux d'urbanisation et de population des agglomérations de Constantine en 1998 et 2008 (RGPH, 2008).....	160
Tableau n°3 : Données climatiques de Constantine, période (2004-2014) (O.N.M, 2015).....	164
Tableau n°4 : Températures et précipitations au niveau de deux stations après correction (Auteur, 2019).....	167
Tableau n°5 : Le potentiel forestier de la wilaya de Constantine (Kherief, 2006).....	177

Liste des Tableaux

Chapitre 2 : Approche Cartographique pour un inventaire de l'espace vert à Constantine

Tableau n°01 : Espace verts de secteur de Sidi Rached (Auteur, 2020)	200
Tableau n°02 : Espace vert de secteur d'El Kantara (Auteur, 2020).	201
Tableau n°03 : Espace vert de secteur de Belle Vue (Auteur, 2020).....	202
Tableau n°04 : Espace vert de secteur de Sidi Mabrouk (Auteur, 2020).....	203
Tableau n°05 : Espace vert de secteur les Muriers (Auteur, 2020).....	204
Tableau n°06 : Espace vert de secteur 5 juillet (Auteur, 2020).....	205
Tableau n°07 : Espace vert de secteur Ziadia (Auteur, 2020).....	206
Tableau n°08 : Espace vert de secteur El Guammas (Auteur, 2020).....	207
Tableau n°09 : Espace vert de secteur Boudraa Saleh (Auteur, 2020).....	208
Tableau n°10 : Tableau récapitulatif de distribution et la composition de la couverture végétale de la ville de Constantine (Auteur, 2020).....	209
Tableau n°11 : Espace vert disponible et ratio à la ville de Constantine (Auteur, 2020).....	210
Tableau n°12 : Besoin et déficit en espace vert à la ville de Constantine (Auteur, 2020).....	212

Chapitre 3 : Evaluation de l'impact de l'espace vert sur le climat urbain de la ville de Constantine à travers la télédétection

Tableau n°01 : données des images utilisées dans l'étude (Auteur, 2019).....	218
Tableau n°02 : données des images utilisées pour comparer les changements entre les saisons (Auteur, 2019)....	218
Tableau n°03 : usage de quelques compositions colorées de fausses couleurs (Auteur, 2019).....	224
Tableau n°04 : les bandes composantes des images Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI/TIRS (traité par l'auteur, 2019).....	224
Tableau n°05 : LST moyenne de chaque classe de végétation.....	238
Tableau n°06 : valeur de GCI et UCI durant la période d'étude.....	239
Tableau n°07 : les métriques du paysage utilisées dans cette étude (Auteur, 2020).....	242
Tableau n°08 : métrique de la composition paysagère verte à l'échelle du paysage de la ville de Constantine (Auteur, 2020).....	245
Tableau n°09 : valeur de coefficient de Pearson R et les valeurs de P.....	249

Chapitre 4 : Evaluation de confort thermique dans les espaces extérieurs de la ville de Constantine:

Tableau n°01 : logiciels de simulation utilisés pour calculer les indices du confort thermique extérieur en fonction de modèle calculés (PMV, PET, UTCI, SET *, ETU et PT) et TMR. (Coccolo et al, 2016).....	259
Tableau n°02 : variation de la température de l'air dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique	261
Tableau n°03 : variation de l'humidité relative dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique...	262
Tableau n°04 : variation de la vitesse de l'air dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique.....	263
Tableau n°05 : Vues de ciel dans les espaces étudiés (images fisheye).....	265
Tableau n°06 : valeurs des indices de confort thermique et la perception thermique liée à chaque valeur	267

Liste des Tableaux

Tableau n°07 : valeurs de la température moyenne radiante dans les espaces étudiés.....	286
Tableau n°08 : valeurs de vote moyen prévisible PMV dans les espaces étudiés.....	269
Tableau n°09 : valeurs de la température physiologique équivalente PET dans les espaces étudiés.....	270
Tableau n°10 : valeurs de la température standard effective SET dans les espaces étudiés.....	271
Tableau n°11 : valeurs de l'indice thermique universel de climat UTCI dans les espaces étudiés.....	272
Tableau n°12 : la matrice des composantes (jardin Bennacer).....	295
Tableau n°13 : la matrice des composantes (jardin Bayrouth).....	297
Tableau n°14 : la matrice des composantes (jardin Zouaghi).....	298
Tableau n°15 : la matrice des composantes (place Ahmed Bey).....	300
Tableau n°16 : la matrice des composantes (Place Zouaghi).....	301

:

Glossaire

AEP	Architecture evolution plan
ALADIN	Atmospheric laser doppler instrument
AMS	Airborne multispectral scanner
ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ASV	Actual Sensation Vote
AT	Apparent Temperature
ATS	Actual thermal sensation
ATSR2	Along-Track Scanning Radiometer 2
AVHRR	Advanced very-high-resolution radiometer
AVIRIS	Airborne visible/infrared imaging spectrometer
AVNIR	Advanced visible and near-infrared radiometer
BDRF	Bidirectional reflectance function
BV	Brightness value
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites
CHRIS	Compact High-Resolution Imaging Spectrometer on the PROBA satellite
DEM	Digital elevation model
DGPS	Differential global positioning
DI	Discomfort Index
DMC	Disaster Monitoring Constellation
DVI	Difference Vegetation Index
ESI	Environmental Stress Index
ET	Effective Temperature
ETU	
ETM+	Enhanced Thematic Mapper (Landsat)
ETU	Universal Effective Temperature
EVI	Enhanced Vegetation Index
GCI	Green Cool Island
H	Humidex
HI	Heat Index
ICU	îlot de chaleur urbain
IKONOS	Name of a commercial high-resolution satellite
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Index of Thermal Stress
LAD	Leaf angle distribution
LAI	Leaf area index
Landsat	A system of earth observation satellites in operation since 1972
Lidar	Light detection and ranging
LISS	Linear Imaging Self-Scanning Sensor (IRS)
LST	Land surface temperature
METEOSAT	Meteorological satellite by ESA
MENEX	Man ENvironmental heat EXchange model
MIR	Mid infrared
MERIS	MEdium-Resolution Imaging Spectrometer
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectrometer
MODIS-TIP	Two-stream inversion package applied to MODIS products by the European Joint Research Centre

Glossaire

MODTRAN	MODerate-resolution atmospheric TRANsmission—an atmospheric correction model
MOS	Marine Observation Satellite
MSAVI	Modified Soil-Adjusted Vegetation Index
MSG/SEVIRI	Meteosat Second Generation/Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
MSS	Multispectral Scanner (Landsat)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized difference vegetation index
NIR	near infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
OrbView	Name of a commercial high-resolution satellite
OSAVI	Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index
OUT_SET*	Outdoor Effective Temperature
PAR	Photosynthetically Active Radiation
PE	Cooling power index
PET	Physiologically Equivalent Temperature
PMV	Predicted Mean Vote
POLDER	POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances—an optical imaging radiometer
PROSAIL	A combination of the PROSPECT leaf optical properties model with the SAIL canopy bidirectional reflectance model
PROSPECT	A model of leaf optical properties
PSI	Physiological Strain Index
PVI	Perpendicular Vegetation Index
QuickBird	Name of a commercial high-resolution satellite
RSI	Relative strain index
RVI	Ratio Vegetation Index
SAIL	Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves a canopy bidirectional reflectance model
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation index
SeaWIFS	Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor
SET	Standard Effective Temperature
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
SPOT-VEG	The VEGETATION sensor on the SPOT satellite
TIMS	Thermal infrared multispectral scanner
TIR	Thermal infrared
TIRS	Thermal InfraRed Sensor
TM	Thematic Mapper (Landsat)
TS	Thermal Sensation
TSAVI	Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index
TSV	Thermal Sensation Vote
UCI	Urban Cool Island
USGS	United States Geological Survey
UTCI	Universal Thermal Climate Index
UV	Ultraviolet egion
VI	Vegetation index
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index

Chapitre introductif

« L'homme a un besoin plus vital d'arbres, de plantes et d'herbes que de béton, de pierre ou de bitume. »

(Philippe St Marc, 1971)

-Introduction

Les zones urbaines ont connu des changements spectaculaires tant dans leur population que dans leur étendue spatiale au cours des 50 dernières années. Plus de 50% de la population mondiale vit maintenant dans des zones urbaines et suburbaines (UNFPA 2007). La population urbaine mondiale était estimée à 3,29 milliards d'habitants en 2007 et devrait atteindre 6,4 milliards d'ici 2050. La population rurale devrait diminuer légèrement, passant de 3,37 milliards en 2007 à 2,79 milliards en 2050. En 2007, 49% de la population mondiale vivait en zone urbaine. La population urbaine mondiale a atteint 49,4% en 2007, ce qui se traduit par un plus grand nombre de citadins que de ruraux dans le monde. La proportion de la population mondiale vivant dans les zones urbaines devrait atteindre 69,6% d'ici 2050. La majeure partie de la croissance se produit dans les pays en développement, où les développements urbains sont importants. La rapidité et l'ampleur de cette croissance continuent de poser d'énormes défis aux pays, ainsi qu'à la communauté mondiale (Xian, G.Z, 2016)

Partout dans le monde, les changements dans l'utilisation des sols et la couverture des sols liés à l'urbanisation croissante ont eu des impacts significatifs aux niveaux local, régional et même mondial. La croissance urbaine est associée à l'expansion de l'utilisation des sols urbains, qui se traduit généralement par une perte importante de ressources naturelles dans de nombreux pays. L'urbanisation est un processus qui influe sur la biodiversité, les écosystèmes, les climats régionaux et les microclimats. L'urbanisation rapide entraîne une diminution sévère des espaces naturels et une augmentation rapide de la surface construite (Guo *et al.*, 2012 ; Landsberg, 1981). En effet, ces surfaces construites sont caractérisées par un albédo faible, une imperméabilité élevée et des propriétés thermiques favorables pour le stockage d'énergie et le dégagement de la chaleur (Pena, 2008). Cette transformation rend le cœur de la ville plus chaud que sa périphérie. L'un des plus importants de ces effets est appelé l'îlot de chaleur urbain (ICU). Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont les impacts météorologiques de l'urbanisation qui transforment les paysages urbains naturels du vert en zones grises afin d'accueillir le logement et les infrastructures publiques. Les émissions de chaleur anthropiques et le chauffage solaire indirect sont les principales raisons de l'effet de l'îlot de chaleur urbain. En outre, ce phénomène est causé par plusieurs facteurs, tels que la pollution atmosphérique, le manque de végétation et de plans d'eau et le dégagement de chaleur excessif stocké par les constructions (Santamouris, 2014; Ridd, 1995). Les bâtiments, l'asphalte et le béton absorbent le rayonnement solaire. En revanche, ils émettent un

rayonnement à ondes longues sous forme de chaleur perdue qui contribue au réchauffement de l'îlot de chaleur urbain (Miller et al, 2015). L'étude de l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) devient de plus en plus sérieuse avec l'augmentation des zones urbaines bâties, la diminution des surfaces vertes et le changement climatique mondial (Parker, 2010).

Le microclimat urbain est le résultat d'une interaction complexe entre les phénomènes physiques, la morphologie de la ville et l'activité humaine. Les facteurs microclimatiques sont d'une grande importance pour les activités qui se déroulent dans ses espaces extérieurs et ils déterminent leurs modes et intensité de fréquentation. Les conditions climatiques d'une agglomération urbaine ont un impact sur le mode de vie de ses habitants, en particulier l'utilisation des espaces extérieurs, considérés comme supports de la vie urbaine. Ces derniers sont des éléments fondamentaux de l'environnement urbain et de l'aspect architectural et esthétique des villes. Ces espaces contribuent à développer les relations sociales et offrent un certain confort aux habitants. Ils sont caractérisés par des changements quotidiens des paramètres du microclimat (température de l'air, vitesse des vents, humidité relative...etc.).

Selon Reiter (2007), le confort des utilisateurs dans l'espace extérieur a plusieurs effets positifs tels que l'amélioration de la qualité de vie dans un environnement extérieur, la valorisation de l'image de la ville, l'augmentation du taux d'utilisation des espaces extérieurs pour les réunions, la détente et les loisirs, la réduction de la consommation d'énergie liée à l'utilisation des espaces intérieurs. Le microclimat de ces espaces est influencé par plusieurs paramètres tels que la géométrie de l'espace, la végétation, l'eau et les propriétés thermiques des surfaces. Il est possible d'améliorer les conditions de confort d'un espace extérieur en tenant compte du design urbain. La végétation en tant qu'élément de conception urbaine qui influence le confort thermique des espaces extérieurs a trois caractéristiques principales qui influencent le climat: l'ombrage, l'humidification et le brise-vent.

La présence d'espaces verts est un critère majeur pour l'amélioration de la qualité du cadre de vie. Les arbres et les plantes en tant qu'éléments importants du système terrestre, aident à réguler le climat urbain et atténuer l'îlot de chaleur urbain en créant un effet de refroidissement en donnant de l'oxygène, absorbant le dioxyde de carbone, minimisant et interceptant les rayons du soleil, générant de l'ombre et absorbant les flux de radiations (Kong *et al.*, 2014, Taha *et al.*, 1988 ; Oliveira *et al.*, 2011). En outre, le type, la densité, la taille et la forme des espaces verts et la zone d'ombre sont tous des paramètres importants pour déterminer l'effet de refroidissement (Giridharan *et al.*, 2008). Les surfaces vertes peuvent

effectivement contribuer à la réduction des températures plus élevées causées par les effets de l'îlot de chaleur urbain en maintenant la température plus froide. Ils prolongent également cet effet de refroidissement au-delà des limites de ces surfaces (Tan & Li, 2013). Ainsi, lorsque les plantes et les arbres qui nous entourent changent, ces changements peuvent affecter notre santé, notre environnement et notre confort. Pour ces raisons, le sujet de la vie végétale devient une question d'une extrême importance pour le scientifique (Wu, 2014)

Plusieurs études ont abordé l'impact des parcs et des espaces verts sur le microclimat urbain et ont constaté que la réduction de la température dans un environnement urbain arboré peut atteindre jusqu'à 4°C (Sahnoune & Benhassine, 2017). Cependant, de nombreuses études suggèrent que les espaces verts urbains peuvent être plus chauds que la zone bâtie environnante et peuvent aggraver les conditions microclimatiques désagréables (Cohen *et al*, 2012). Les mesures indiquent que la température de surface des murs est orientée vers l'ouest et que le béton protégé du rayonnement solaire direct par les arbres, est plus faible en moyenne de plus de 13°C (Parker, 1989). Chatzidimitriou a révélé l'importance de l'ombrage des surfaces pavées. Les surfaces ombragées ont des températures de surface 21% inférieures à la température de l'air et sont 40% plus fraîches que les mêmes surfaces exposées aux rayons du soleil (Chatzidimitriou *et al*, 2006 ; Shahidan *et al*, 2007).

Des études précédentes montrent aussi que les espaces verts urbains peuvent former un effet d'îlot de fraîcheur urbain (urban cool island UCI) qui est créé par des effets d'ombrage ou de transpiration des arbres urbains qui sont affectés par les espaces verts et les espaces aquatiques. Cet effet peut être évalué par la différence de la température de surface (Land surface temperature LST) entre les espaces verts et leur environnement (Hongyu *et al*, 2017 ; Sahnoune & Benhassine, 2017). Récemment, ces études se sont concentrées sur le rôle de la végétation urbaine dans la régulation du LST. Ils prouvent que le LST peut être diminué en augmentant la surface de l'espace vert et la fraction de masse d'eau (Chen & Wong, 2006 ; Hamada & Ohta, 2010). Selon Kong (2014), les espaces verts urbains peuvent réduire la température de l'air et de la surface (Kong *et al*, 2014). Ils peuvent également générer un effet de refroidissement localisé (UCI) qui est un moyen efficace d'atténuer l'effet ICU et de fournir un environnement extérieur confortable. Il peut être déterminé par le moyen de nombreux facteurs importants tels que le type et la densité de la végétation, la taille et la forme des espaces verts et la zone d'ombre des arbres. Par exemple, les arbres sont plus efficaces que les buissons qui à leur tour sont plus efficaces que l'herbe (Cao *et al*, 2010). Ils ont également

prouvé qu'il existe un seuil de superficie d'espaces verts. S'il dépasse le seuil, l'effet de refroidissement diminuera fortement (Lu *et al*, 2012 ; Cheng *et al*, 2015). En outre, certaines études ont traité la relation entre les caractéristiques spatiales de l'usage du sol (land use/land cover LU/LC) et la distribution spatiale de la température de surface du sol LST (Zhou *et al*, 2011; Weng *et al*, 2007; Liu & Weng, 2009) entre autres. Ces études ont indiqué que les paramètres du paysage conservent un potentiel important pour explorer le modèle spatial de LST. Cependant, la plupart de ces études ont examiné les effets de la configuration spatiale des caractéristiques de l'usage du sol, en particulier la couverture végétale et les zones bâties (Cao *et al*, 2010; Zhang *et al*, 2009; Weng *et al*, 2007), sur le LST.

1-Problématique

Les avantages que les espaces verts urbains offrent aux citoyens sont nombreux; tels que les loisirs, les bénéfices écologiques et économiques, la valeur esthétique et les effets positifs sur la santé. Tout au long de l'histoire des villes, les espaces verts urbains ont traditionnellement eu des fonctions de représentation, de bien-être ou d'hygiène urbaine (Benhassine, 2010). Les jardins en forme de terrasse de la Renaissance et les jardins paysagers des XVIIIe et XIXe siècles sont des exemples de représentation. Les parcs publics tels que Central Park à New York, ont une fonction de loisir et de détente pour les citoyens. Les espaces verts publics ne peuvent être réalisés et entretenus que s'ils sont soutenus par des politiques et des instruments de planification tels que le développement urbain et les plans de structure et de zonage.

La construction des grands ensembles dans les années 60/70 est une période cruciale dans les changements des politiques urbaines qui ont donné de l'importance au développement des infrastructures vertes urbaines. La création et la prolifération des espaces verts annexes aux constructions, désignés par « espace vert d'accompagnement » a été accompagnée par la multiplication d'autres types plus anciens et plus répandus : les parcs, les jardins et les squares de proximité. A cet effet, l'expression « espace vert » a fait ses premières apparitions dans les textes juridiques au début des années 1960. Plus précisément, à travers l'introduction pour la première fois de la notion d'espace vert dans les textes réglementaires. En 1967, un nouvel instrument d'urbanisme (SDAU) a fixé la destination générale des sols. Cette loi a tenté de maintenir un relatif équilibre spatial entre la ville et la campagne, en conservant et en créant de nouveaux espaces verts. (Lotfi et al, 2012).

Ce n'est que dans les années 1980 que les villes ont commencé à sortir des politiques urbaines qui ont tellement gâché le centre des villes, en faisant des endroits les moins accueillants pour se promener. L'apparition de la notion « développement durable et l'urbanisme durable » en 1990 a fait le deuxième tournant important concernant la place attribuée aux espaces verts en prenant en considération la dimension verte et la préservation de l'écosystème.

Vers les années 2000, une nouvelle notion a vu la lumière, celle de « l'écologie et l'urbanisme écologique ». Les politiques d'écologisation urbaine sont importantes pour revitaliser les communautés, réduire le taux d'urbanisation et améliorer la qualité de vie. La plupart des politiques se concentrent sur les avantages communautaires et la réduction des effets négatifs du développement urbain, tels que le ruissellement de surface et l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ainsi, ces dernières années, le rôle écologique des espaces verts commence à être pris en compte dans la planification urbaine au même titre que les fonctions sociales et urbanistiques.

Malheureusement, il n'a jusqu'à présent pas été possible de développer et de réaliser un nouveau concept de villes écologiques. En pratique, malgré les préférences politiques et l'ensemble des instruments disponibles, les espaces verts restent un phénomène périphérique par rapport à la prolifération croissante des aménagements construits et des zones de circulation. Les espaces verts des villes restent vulnérables avec leur rendement financier limité, ils doivent maintenir leur position dans les villes au sein d'un système orienté vers le rendement économique. Ce n'est qu'en définissant et en protégeant les fonctions des espaces verts qu'ils pourront être préservés, mais ils sont en permanence sous pression.

En Algérie, les espaces verts urbains sont le résultat d'un développement anarchique et non contrôlé des tissus urbains. La majorité de ces espaces a été réalisée à l'époque coloniale (jardins et squares), quant aux espaces verts urbains de l'époque post coloniale, ils sont des espaces résiduels et non planifiés situés dans les ensembles d'habitat collectif, ils présentent de vastes étendues dépouillées autour des bâtiments qui ne contribuent pas à la vie des habitants et ne répondent pas aux aspirations des usagers.

Dans les dernières années, une importance a été donnée aux espaces verts urbains par les autorités, mais malheureusement à l'heure actuelle, la politique de verdissement des villes n'est rien de plus qu'un revêtement vert au-dessus d'éléments essentiels tels que les infrastructures pour le trafic, l'énergie, l'approvisionnement en eau et la production

alimentaire. Rien n'a changé dans notre organisation économique et sociale: pour la plupart, nous sommes incapables de dépasser les opérations micro-cosmétiques telles que les toitures végétalisées, les façades vertes et les zones à faible trafic.

À l'instar des villes algérienne, la ville de Constantine souffre d'une Pénurie aiguë en matière des espaces verts urbains, la plupart des ces espaces a été réalisé à l'époque coloniale (Jardin Bennacer, Bayrouth, Sousse...etc). Après l'indépendance et lors du deuxième plan quadriennal 1974-1977, les autorités ont donné importance pour le secteur du logement et de l'urbanisme pour prendre en charge la crise du logement qui était à son apogée. A travers ce plan, une politique urbaine intégrée au développement national a été mise en œuvre. Cela s'est matérialisé par la création de grands programmes de construction de logements sous la forme de Z.H.U.N à l'est et au nord de Constantine. La croissance de Constantine au cours des années 1980 s'est faite en dehors de son périmètre urbain avec la création du ZHUN de Békira au Nord, de Zouaghi au Sud et de Boussouf à l'Ouest. De plus, des lotissements individuels étaient situés sur ces mêmes sites. L'expansion urbaine de cette ville s'est poursuivie sans planification selon les axes de communication.

Cette croissance urbaine se traduit par une réduction de la surface verte. La ville de Constantine comptait 150 hectares de forêts urbaines après l'indépendance, alors que; actuellement, il ne compte que 50 hectares. La forêt d'El Mansorah comprenait auparavant 61 hectares, actuellement elle n'occupe que 7,11 hectares. La forêt du secteur de Sidi Mebrouk occupait autrefois une superficie de 20 hectares, elle n'occupe actuellement que 13 hectares. D'autres forêts telles que «la forêt de Sidi Djellis qui occupait auparavant 32 hectares et la forêt de Sidi M'cid qui occupait 8 hectares» ont complètement disparu (Ali Khoudja, 2011)

La ville souffre d'une carence aiguë en matière des aires de jeux, des jardins des parcs et des forêts urbaines. Une vue aérienne sur la ville dévoile le caractère imperméable de ce tissu dense et étalé. Une dominance du béton, d'asphalte et des matériaux de construction à faible albédo qui favorisent le stockage d'énergie et l'augmentation de la température de l'air. Les espaces verts existants destinés au délasserment et loisir ne répondent pas aux aspirations des usagers qui se retrouvent toujours obligés de se déplacer vers d'autres régions pour passer des moments de loisir (Benhassine, 2010) , et ne contribuent pas à l'amélioration de climat urbain. Ces espaces verts publics n'offrent aucune protection aux usagers qui se trouvent toujours insatisfait de l'état actuel des ces espaces spécialement dans la saison chaude.

2-Questions de recherche

Le problème nécessite des investigations pour sa prise en charge afin de bien quantifier l'impact de l'espace vert sur le microclimat, pour cela les questions méthodologiques suivantes s'imposent :

1-Quelle sont les effets de la couverture végétale de la ville de Constantine sur son climat urbain et son microclimat ? Et comment influence cette couverture sur le confort des usagers de l'espace extérieur ?

2-Pourquoi le centre urbain de Constantine est très chaud en saison sèche ? Comment peut-on quantifier l'impact de l'espace vert sur le microclimat ? Et comment peut on atténuer l'îlot de chaleur urbain et rafraichir les espaces extérieurs ?

3-Hypothèses

Afin de bien mener cette étude, il est indispensable de formuler des hypothèses qui constituent le début de cette investigation :

1-**l'espace vert** de la ville de Constantine influence **son climat urbain et microclimat** positivement, la bonne **configuration spatiale du végétal** contribue à **l'amélioration du confort thermique extérieur** influence positivement **l'usage de l'espace extérieur**.

2-**La quantification de l'impact de l'espace vert** sur le microclimat et **l'évaluation de confort des usagers** dans les espaces extérieurs de Constantine sont des moyens pertinents qui nous aident à trouver les meilleures solutions pour rendre les espaces extérieurs agréables à vivre.

4-Objectifs

Suite à l'hypothèse formulée, nous avons fixé des objectifs à atteindre dans le cadre de cette étude comme suit:

- Identifier l'état actuel des espaces verts urbains de la ville de Constantine, estimer l'existant et calculer le déficit selon la norme Algérienne.
- Evaluer l'impact de la couverture végétale sur le climat urbain.
- Evaluer le confort thermique des usagers dans quelques espaces verts et leur fréquentation ;

-Identifier l'impact de la configuration spatiale de cette couverture sur l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain.

5- Le cas contexte d'étude :

Notre cas d'étude est la ville de Constantine, capitale de l'Est Algérien, elle se situe à environ 431 km de la capitale Alger et à 245 km des frontières Algéro-tunisiennes, à 89 km de Skikda vers le Nord et à 235 km de Biskra vers le Sud. Sa position lui procure situation stratégique en situant à équidistance du littoral au Nord et le massif des Aurès au sud, et constituant un relais entre les villes du sud et les villes côtières.

Elle est entourés par Skikda au Nord, Mila à l'Ouest, Guelma à l'Est et Oum El Bouaghi au Sud, elle est considérée parmi les wilayas les plus importantes du pays, elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 2297,20 Km². Elle est située entre 350m et 1100m d'altitude, entre latitude 36° 17' et la longitude 6° 37'.

La ville se situe au cœur d'un pincement entre les montagnes (djebel Ouahch et Djebel Chettaba) sur un grand rocher localisé sur les deux cotés de OUED RHUMEL, le site est marqué par la juxtaposition de deux plateaux (El Mansourah et Ain El Bey).

6-L'analyse conceptuelle :

- Les hypothèses énoncées révèlent des concepts clés nécessitant une analyse particulière pour que l'étude soit réussite :

-**l'espace vert** de la ville de Constantine influence **son climat urbain et microclimat** positivement, la bonne **configuration spatiale du végétal** contribue à **l'amélioration du confort thermique extérieur** influence positivement **l'usage de l'espace extérieur.**

-**La quantification de l'impact de l'espace vert** sur le microclimat et **l'évaluation de confort des usagers** dans les espaces extérieurs de Constantine sont des moyens pertinents qui nous aident à trouver les meilleures solutions pour rendre les espaces extérieurs agréables à vivre.

Donc notre recherche essaye de mettre en relation plusieurs concepts qui sont **le végétal urbain** et son impact sur **le microclimat** et **le confort thermique extérieur** ainsi que **l'usage des espaces public** à Constantine

6-1-Le végétal urbain

Les espaces verts sont des zones ou portion de zones urbaines non construites et recouvertes totalement ou partiellement de végétation, situées à l'intérieur de zones urbaines, ou devant être urbanisées. La végétation urbaine décrit l'assemblage total de plantes à l'intérieur et sur le périmètre des villes. Cela comprend une diversité de plantes dans un large éventail d'habitats. Ils sont établis et gérés pour diverses raisons et présentent une valeur économique, sociale, esthétique et écologique.

Les espaces verts urbains, en particulier les parcs et les jardins publics, constituent des ressources propices à la détente et aux loisirs. Idéalement, cela aide à la guérison émotionnelle (thérapeutique) et à la relaxation physique. Dans l'ensemble, la végétation est un élément important, sinon essentiel, de l'environnement urbain. Les espaces verts urbains sont nos alliées pour aider à promouvoir la santé et le bien-être des citoyens, apportant une contribution vitale non seulement à la qualité du cadre de vie, mais aussi à l'attractivité de nos villes

6-2-Le microclimat :

Le microclimat est la synthèse des conditions physiques ambiantes (par exemple, la distribution dans le temps et dans l'espace, les valeurs et tendances fluctuantes, les valeurs moyennes et extrêmes, les gradients spatiaux et la fréquence des oscillations) en raison de variables atmosphériques (la température, l'humidité, l'ensoleillement, la vitesse) ou échanges avec d'autres organismes (émission infrarouge, chauffage, éclairage, ventilation) sur une période représentative de toutes les conditions déterminées par les facteurs de forçage naturel et artificiel » (Camuffo, D. 2014).

Ils sont les interactions dynamiques et localisées entre différents processus de la couche superficielle, tels que les échanges d'énergie et de matière, les processus de rayonnement et les effets de la surface sous-jacente (Foken. T, 2008). Celles-ci sont à nouveau déterminées par le paysage, les conditions du sol, la végétation, l'utilisation des terres et la rétention d'eau. Le microclimat extérieur, associé à la sécurité, à l'accessibilité et à la qualité de vie, est l'une des qualités les plus importantes des espaces ouverts publics et l'un des principaux facteurs qui déterminent la perception et l'évaluation individuelles des lieux. C'est un facteur important de la durabilité sociale d'un espace urbain au niveau local. La décision des personnes d'utiliser ou non des espaces publics est également influencée par le microclimat extérieur.

6-3-Le confort thermique extérieur

(Fanger, 1970) le définit comme étant l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction humaine avec l'environnement thermique. Selon (Merrouche, 2011), Le confort thermique est d'abord un phénomène physique soumis à une faible part de subjectivité. Le fonctionnement correct de la « machine humaine » implique une température intérieure constante de 37°C environ.

Cette température est le résultat de la production de la chaleur interne et des conditions d'échanges de chaleur entre le corps et l'ambiance.

C'est une fonction complexe des conditions atmosphériques et des facteurs physiques, physiologiques, psychologiques et comportementaux. Le confort humain dans les espaces extérieurs est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité du microclimat urbain et pour fournir des lignes directrices pour un développement urbain durable. Le confort thermique est l'un des facteurs qui influencent les différentes activités des utilisateurs. L'intensité de ces activités est inversement proportionnelle au niveau de gêne ressenti par les utilisateurs de l'espace public lorsqu'ils sont exposés aux conditions climatiques. Par conséquent, la réduction de l'inconfort thermique dans les espaces publics peut améliorer la qualité de vie d'un public en particulier face aux intempéries et à la température.

Selon (Reiter. S, 2007), les avantages du confort des usagers dans l'espace extérieur sont nombreux, on peut citer:

- L'amélioration de la qualité du cadre de vie à l'extérieur ;
- L'accroissement de l'utilisation de ces espaces urbains (place, placette...) pour les rencontres, mixité, détente... ;
- La limitation des nuisances environnementales
- La diminution des consommations d'énergie liées à l'utilisation de l'espace extérieur ;
- La valorisation de l'image de la ville.

6-4-Impact de la végétation sur le microclimat et le confort des usagers

L'espace vert urbain est de plus en plus reconnue comme une option prometteuse pour atténuer les effets indésirables d'îlot de chaleur urbain en réduisant la capacité de stockage thermique et en créant des surfaces plus réfléchissantes (albédo élevé) qui réduisent la quantité de rayonnement solaire absorbé (Sun, R. & Chen, L, 2017). Pendant ce temps, la transpiration des espaces verts urbains et l'ombrage du couvert forestier peuvent refroidir l'environnement en bloquant directement le rayonnement solaire et en empêchant le chauffage de la surface du sol et de l'air (Hoag, H, 2015 ; Zhou, W et al, 2017). De nombreuses études ont montré que l'effet de refroidissement des espaces verts urbains dépend de la taille de ceux-ci. En règle générale, bien que pas toujours, la taille des espaces verts urbains est positivement corrélée à l'intensité du refroidissement et la relation tend à être non linéaire, (Zhou, W et al, 2017 ; Gaffin, S. R., 2012).

De nombreuses études ont été menées sur les bienfaits rafraîchissants des arbres et de la végétation dans les villes. Des réductions de la température de surface jusqu'à 20 ° C peuvent être possibles par temps chaud et ensoleillé. Bien que de nombreuses études se concentrent

sur les avantages de l'évapotranspiration des arbres urbains, il est important de noter que les arbres affectent également les régimes de vent dans les villes. Ainsi, en modifiant les régimes de vent, les arbres peuvent altérer l'efficacité des brises de refroidissement et peuvent jouer un rôle important dans les processus de dispersion ainsi que dans l'élimination des polluants par dépôt.

Un autre effet de la végétation dans le milieu urbain et celui de l'ombrage, cet effet limite l'apport d'énergie radiative sur le piéton, et sur les surfaces de sol et de bâtiments. Cette baisse de rayonnement incident dépend notamment de la densité de feuillage de l'arbre, de la taille des feuilles et de la géométrie de la couronne (le type de l'arbre); elle peut entraîner une baisse significative de la température de surface de sol et des bâtiments, et donc de consommation de l'énergie et du transfert de la chaleur à l'atmosphère, ce qui tend à diminuer l'lot de chaleur urbain (Brunet. Y, 2016).

6-5-L'espace public

« *L'espace public est l'épine dorsale de toute production urbaine* » (BASSAND.M, 2001). Il inclut les espaces utilisés librement chaque jour par le grand public. C'est à travers lui que s'assure l'homogénéité du tissu urbain, et se réalise la cohésion sociale, Dès son émergence, le concept « d'espace public » n'a cessé de prendre sa part dans les recherches urbaines, sociales ou politiques, en ce qu'il offre comme diversité de champs qui intéressent plusieurs disciplines. Ainsi chaque discipline lui donnait une lecture originale selon sa vision professionnelle.

6-6-La pratique de l'espace extérieur

Selon (BERTRAND.M.J, LISTOWSKI. H, 1984) la pratique de l'espace dépend de sa perception, les espaces publics et particulièrement les places publiques sont des éléments de lecture de la ville, elles jouent le rôle de repères dont le besoin de lire l'espace pour s'orienter et pour le mieux pratiquer. En revanche (LEFEBVRE.H, 1970) renvoie la pratique de l'espace à des phénomènes d'appropriation, il déclare que les groupes sociaux sont les responsables de la production de l'espace et alors leur pratique, donc il renvoie la pratique de l'espace à des activités relatives à des groupes sociaux « *l'espace réel est celui de la pratique sociale* ».

D'autres chercheurs comme (Olofsson, 2016 ; Merrouche, 2011) renvoient la bonne pratique de l'espace public au confort des usagers au sein de l'espace, le confort thermique est une caractéristique principale qui détermine l'intensité de l'usage de l'espace.

- Tableau synthétique de l'analyse conceptuelle (concepts, dimensions et indicateurs) :

A travers les différents points de vue des théoriciens, et pour but d'affirmer ou infirmer l'hypothèse annoncée auparavant, le tableau 1 résume les concepts, les dimensions et les indicateurs tirés de l'analyse conceptuelle.

Tableau 1: récapitulation de l'analyse conceptuelle

Concepts	Dimensions	indicateurs
Le végétal urbain	Le type	Les arbres, les baliveaux les arbustes
		La pelouse
		Les plantes grimpantes
	La forme	-forme simple
		-forme complexe
	Les dimensions	-petite, moyenne, grande
		-dense, pas dense
L'implantation	-homogène, pas homogène -dispatchées, continues	
Espace urbain public	forme	-régulier
		-irrégulier
	taille	-grand
		-petit
	Aménagement	-Bancs, poubelles
		-Mobilier de l'éclairage public.
		-Mobilier de publication, Edicule
	Texture (traitement du sol)	-végétale
		-minérale
	Type	jardin public
places publique		
parcs		
rues et ruelles		
Le microclimat	paramètres de microclimat	température de l'air
		Humidité relative
		vitesse des vents
		rayonnement solaire
confort thermique extérieur	Indices de confort thermique	PMV
		PET
		T_{mrt}
		SET
		UTCI
La pratique	Type et modalité d'usage	-Rencontre
		-Rassemblement, manifestation
		-Loisir et jeu
		-Circulation
		-Commerce, échange
	appropriation	-Appropriation individuel
-Appropriation collective		

	Intensité d'usage	-Usage intense
		-Usage moins intense
		-Usage faible

7-la méthodologie de travail :

Le thème de recherche étant cerné se rapporte à l'impact de l'espace vert sur le microclimat et l'usage de l'espace extérieur, pour atteindre l'objectif visé, nous avons établi un processus du travail, donc une démarche méthodologique, selon la quelle nous avons divisé le travail en deux grandes parties : la partie théorique et la partie pratique comme suit (Figure 3):

7-1-La partie théorique :

Cette partie tentera d'expliquer la thématique des espaces verts urbains, elle constitue le support théorique des concepts énoncés précédemment. Elle est basée sur une analyse conceptuelle de l'hypothèse, à travers une revue de littérature. Les sources bibliographiques sont très variées, dans la mesure où nous avons essayé de consulter le maximum d'ouvrages, articles, mémoires, et thèses, ayant traité ce thème. Certains sites, et documents sur internet, nous ont ainsi aidés dans ce travail de recherche.

7-2-La partie pratique :

Pour pouvoir confirmer ou infirmer les hypothèses énoncées, le processus méthodologique sera comme suit :

7-2-1-la cartographique pour faire un inventaire de l'espace vert à Constantine: La méthode consiste à faire un document cartographique (un inventaire pour pouvoir quantifier l'espace vert existant), pour cela, nous avons utilisé le système d'information géographique (**ArcGIS 10.5**) et le logiciel d'observation de la terre (**Google Earth**). La création de la base de données géographique, nécessaire à l'étude des espaces verts, passe par trois étapes :

- ✓ vectorisation de tous les espaces verts de la ville de Constantine ;
- ✓ relevé de terrain et collecte de données ;
- ✓ intégration des données collectées dans **ArcGis 10.5**
- ✓ Faire un inventaire de l'état actuel des espaces verts de la ville de Constantine
- ✓ Calculer la carence et le déficit en espace vert par rapport à la norme algérienne

La vectorisation des espaces verts a été faite à travers le logiciel Google Earth à l'aide des images satellitaires pour délimiter les espaces verts, les arbres d'alignements et les zones boisées. Les images utilisées appartiennent au satellite de très haute résolution Landsat datant

du 29/01/2020, une fois la vectorisation sous **Google Earth** achevée, les fichiers vecteurs des espaces verts seront transférés vers **ArcGis 10.5** pour subir une projection cartographique afin de créer la base de données cartographiques, nécessaire pour l'étude spatiale et l'analyses, quantitative des espaces verts (création de l'inventaire) puis le calcul du ratio de l'espace vert par secteur.

7-2-2- Evaluation de l'impact de l'espace vert sur le climat urbain de la ville de Constantine à travers la télédétection : La méthode de travail se compose de deux parties comme suite:

A-Investigation de la relation de l'indice de végétation NDVI et la température de surface du sol LST et les ilots de refroidissement de la couverture végétale: l'ensemble de données utilisées dans cette étude est une série chronologique d'images Landsat saisies par les capteurs Landsat 5 TM, et Landsat 8 OLI/TIRS. Les images ont été téléchargés en tant qu'ensemble de données géo-référencées à partir du site web de l'United States Geological Survey (USGS) avec une résolution de 30m par pixel. Ces images ont été acquises par des intervalles de 5 ans et au cours de la même saison (la saison sèche) et exactement au mois de juin.

Le logiciel de traitement d'images utilisé est **ArcGIS** (version **10.5**), dans le but est de générer des cartes de NDVI (l'Indice différentiel normalisée de végétation) et LST (température de surface du sol), afin d'estimer l'ilot de refroidissement de l'espace vert. Une corrélation sera faite entre les deux indices à travers le logiciel **SAGA** pour comprendre l'impact de l'NDVI sur LST.

B-Investigation sur l'impact des changements de la composition et la configuration spatiale de l'espace vert sur la distribution spatiale de la température de surface LST et le microclimat: dans cette partie les images de Google Earth Pro vont nous servir pour faire la classification supervisée et générer la carte de l'usage du sol afin d'étudier les changements spatio-temporels de la couverture végétale de la ville de Constantine au fil du temps, les cartes de l'usage du sol seront transformées en fichier ASCII et analysées par le logiciel **FRAGSTATS 4.2.1** pour calculer les métriques paysagères. A la fin, une étude de la relation entre les métriques paysagères analysées et la température de surface du sol nous aide à comprendre l'impact de la configuration spatiale de l'espace vert sur le microclimat, pour cela nous allons étudier la corrélation entre ces indices par le biais de logiciel de statistique **SPSS 26**.

7-2-3-Evaluation de confort thermique des usagers dans les espaces verts de Constantine :

Cette étape consiste à évaluer le confort thermique des utilisateurs dans quelques espaces verts (jardins, parcs, squares) de Constantine ainsi que l'étude des modes et l'intensité de leur

fréquentation puis l'influence de l'espace vert sur cette fréquentation, pour atteindre cet objectif deux méthodes seront utilisées, à savoir :

- -La prise de mesures : le travail consiste à identifier des stations pour mesurer les données climatiques (température de l'aire, vitesse de vents, et l'humidité relative de l'aire), les mesure in situ seront prise en trois jours différents dans la saison sèche exactement au mois de juillet (20, 21 et 22 juillet) cette opération sera exécuter à l'aide des appareils de mesure. Les données collectées seront traité par un logiciel de simulation **RayMan** et **Sky Helios** Pour objectif de bien identifier l'effet du végétal sur le microclimat au sein d'un espace public
- La technique du questionnaire : cette technique nous permet d'interroger un nombre important des usagers de notre champ d'étude dans un temps précis. Notre questionnaire va être orienté aux habitants de la ville de Constantine exactement les usagers des espaces publics. 150 formulaires de questions seront distribués également sur cinq espaces publics (places publiques et jardins) d'une manière aléatoire, et simultanément avec la prise de mesures. Pour analyser et interpréter les résultats, le logiciel de statistique (**SPSS 26**) sera utilisé.

8-Structure de la thèse :

Cette thèse sera partagée en deux parties, chaque partie comporte des chapitres, précédés par un chapitre introductifs, et suivis d'une conclusion générale. Elle est structurée de la manière suivante (Figure 1) :

-La première tentera d'expliciter la thématique des espaces verts urbains, elle constitue le support théorique des concepts énoncés précédemment en se basant sur une consultation des revues de la littérature pour développer des connaissances sur la thématique et comprendre les différents concepts liés à notre étude. Elle se compose de :

- Un premier chapitre consacré à étudier les différentes notions sur le climat, la climatologie, le microclimat et le confort thermique extérieur, et les indices de confort thermique extérieur qui ont été présentés et subdivisés en trois catégories: modèles de bilan énergétique, indices empiriques et indices basés sur des équations linéaires.
- Un deuxième chapitre pour traiter le concept de végétal urbain en tant qu'élément important du système terrestre, qui aide à réguler le climat urbain et atténue l'îlot de chaleur urbain en créant un effet de refroidissement, et assurer un confort des usagers

il traitera aussi le rôle du végétal urbain dans la ville, les différents types d'espaces vert et comment les adopter pour créer un paysage adéquat et un confort extérieur.

- Un troisième chapitre tend à étudier un concept d'actualité « la télédétection », dont l'objectif est de comprendre c'est quoi la télédétection, les différents types de satellites, la signature spectrale, l'apport de la télédétection dans l'étude de la couverture végétale, ainsi que la théorie de patrons du paysage (landscape patterns) dans l'écologie du paysage et les indices du paysage et son utilisation pour évaluer l'impact de l'espace vert sur le microclimat et la température de surface du sol.
- Un quatrième chapitre qui a met l'accent sur les études faites par plusieurs chercheurs dans multiples domaines (urbanistes, Architectes, géographes, météorologues, écologistes....etc.) sur les effets de l'espace vert sur le climat urbain et le microclimat, chacun et sa méthodologie. L'ensemble de ces études prouve que l'espace vert est un bon régulateur du climat en atténuant l'îlot de chaleur urbain.

-La deuxième partie de cette thèse se compose de quatre chapitres à travers lesquels on va vérifier les hypothèses précédemment posées, en ayant recours à une approche analytique basé sur la cartographie, la télédétection et la simulation suivie par une enquête sur terrain pour collecter des données sur les aspirations des usagers des espaces verts de la ville de Constantine, cette partie se compose de :

- Un premier chapitre consacré pour étudier la ville de Constantine, en commençant par la situation géographique, administrative et démographique, puis une étude bioclimatique se compose premièrement d'une analyse de différentes données climatiques récoltées par la station météorologique d'Ain El Bay. Deuxièmement, faire une correction des températures et des précipitations de deux stations (Chettaba et Djbel El Ouahch) les plus élevées et la création de gradient thermique des températures pour pouvoir ressortir la température de n'importe quelle altitude. Une autre étape d'analyse, est celle de définition des étages bioclimatiques et l'établissement des graphes ombro-thermique pour bien cerner la période humide et sèche durant toute l'année. A la fin du chapitre nous représentons le potentiel forestier de la ville.
- Un deuxième chapitre tentera de faire une étude spatio-temporelle de l'espace vert de la ville de Constantine, autrement dit, une étude historique (la genèse de l'espace vert) qui va nous éclaircir les étape de création de la trame verte de la ville de Constantine,

et autre étude spatiale à travers la cartographie et l'analyse thématique dans l'ArcGis 10.5 pour quantifier les différents types d'espace vert constituants de la trame verte, et les localiser dans les différents quartier en créant une base de données qui va nous servir à étudier le manque en espace vert.

- Un troisième chapitre d'évaluation de l'impact de la couverture végétale de la ville de Constantine sur son climat urbain pour atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU), en analysant son effet sur la température de surface du sol (LST) dus au changement de cette couverture végétale au fil du temps à l'aide de la technique de télédétection.
- Un quatrième dernier chapitre consacré pour étudier le confort thermique des usagers dans quelques espaces verts de la ville de Constantine, une simulation sera faite avec les logiciels RayMan et Sky Helios pour estimer les indices de Confort. Une enquête sur terrain sera utilisée aussi pour étudier les aspirations des usagers ainsi que l'impact de l'espace vert sur leur fréquentation.

-A l'instar de toutes les recherches scientifiques, la nôtre se termine par une conclusion générale, en synthétisant des points de vues liées directement aux résultats de la recherche, ainsi que quelques éléments de réflexions, présentant les limites de la présente recherche, et les perspectives d'investigations futures.

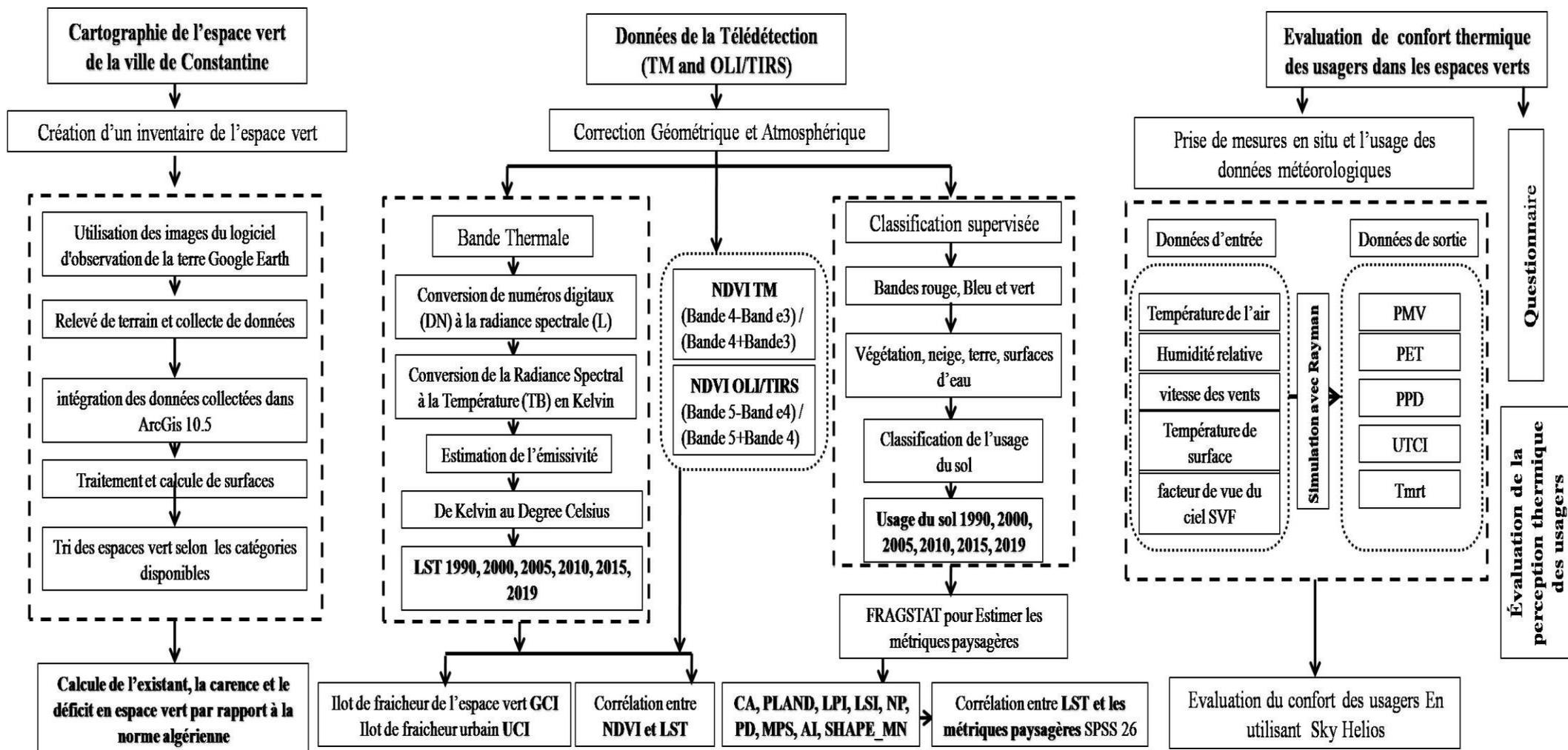


Figure 1 : Processus méthodologique (Auteurs, 2020)

Première partie

Etude théorique

Chapitre n°1 :

Climat, microclimat et

confort thermique extérieur

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

(B. Givoni)

-Introduction :

Le système planétaire est une machine géante, les différents constituants du système que sont l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère échangent en permanence de l'énergie, de l'eau et de la matière, recyclant ainsi l'énergie venue du soleil. Les transferts d'eau et d'énergie qui se produisent à l'interface avec l'atmosphère relèvent de la climatologie. La climatologie s'est longtemps préoccupée d'inventorier, de classer et de nommer les climats autour de ce qui était permanent, régulier d'une année à l'autre, afin d'élargir la connaissance des climats actuels et de leurs variabilités et les comparer avec les climats passés pour bien contrôler les changements climatiques.

Le climat urbain est un climat différent de celui de la campagne proche, la ville en modifiant le climat agit directement sur les problèmes de santé liés à la pollution et aux vagues de chaleur, sur le confort en espace extérieur et sur l'utilisation d'énergie dans les bâtiments.

Le microclimat extérieur, associé à la sécurité, à l'accessibilité et à la qualité de vie, est l'une des qualités les plus importantes des espaces ouverts publics et l'un des principaux facteurs qui déterminent la perception et l'évaluation individuelles des lieux. C'est un facteur important de la durabilité sociale d'un espace urbain au niveau local. La décision des personnes d'utiliser ou non des espaces publics est principalement influencée par le microclimat extérieur. D'autre part, les caractéristiques spatiales telles que la forme, la configuration et la combinaison des matériaux de surface influencent le microclimat urbain. Le confort thermique du citadin et la qualité de l'air qu'il respire sont des éléments essentiels à prendre en compte lorsqu'on s'intéresse au bien-être et à la santé de la population urbaine. Cependant, le confort thermique influe directement sur l'intensité d'utilisation des espaces ouverts publics et des activités de plein air. Les caractéristiques du microclimat sont très importantes, car les conditions thermiques de l'environnement influent sur le comportement des individus

Le chapitre présent est consacré à faire un bref aperçu en premier lieu sur la climatologie et le climat, puis nous allons aborder la notion du confort thermique dans les espaces extérieurs en présentant les différentes recherches ayant traité cette thématique.

I-Climat et climatologie :

I-1-Climatologie

La climatologie est l'étude de climat, c'est l'ensemble des états de l'atmosphère sur une longue période, Selon (HUFTY A, 2001), c'est la combinaison de l'étude des échanges énergétiques et hydrique entre la surface de la terre et l'atmosphère ainsi que la succession des

conditions météorologiques et leurs fréquences sur de longues périodes dans le temps, qui peut influencer l'existence de l'être humain sur la terre.

Elle est donc une science rétrospective qui se fonde sur des séries d'observations antérieures (10 ans au moins et 30 ans si possible). Elle s'intéresse essentiellement à la classification des climats à travers leurs caractéristiques, répartition et extension spatiales, facteurs d'explication et évolutions (Koli & Kangah, 2011).

I-2-Le climat

L'atmosphère terrestre tient une grande place dans l'étude des climats, alors ce qui se passe dans l'atmosphère terrestre est fonction de l'énergie solaire donc les climats de la terre dépendent de la puissance énergétique émise par le soleil et surtout de la position de la terre par rapport au soleil (Koli & Kangah, 2011). Le climat peut être défini comme :

- Selon (HUFTY, 2001), c'est la somme des temps journaliers pendant toute l'année. Le climat local est l'état moyen des éléments qui constituent l'atmosphère au-dessus d'un lieu durant une longue période.

- Selon (GIVONO, 1978), le climat d'une région donnée est déterminé par des régimes de variations de plusieurs éléments et par leurs combinaisons. Les principaux éléments climatiques à considérer, lors de la conception des bâtiments, sont le rayonnement solaire, le rayonnement de grande longueur d'onde du ciel, la température d'air, l'humidité, le vent et les précipitations.

- Selon (Chémery, 2006), c'est la combinaison des états de l'atmosphère (température, vent, humidité.....etc.) en un lieu donné et sur une période définie (mois, année, millénaire).

-Le climat correspond à une synthèse des temps qu'il fait dans un lieu sur une longue période c.-à-d. la synthèse des conditions atmosphériques à long terme d'un lieu.

I-3- Classification des climats

La classification de Koppen est inventée en 1920, c'est une classification des climats fondée sur les précipitations et les températures, cette carte reste une référence grâce à ces mises à jour fréquentes, dans les domaines de la géographie, la biologie, l'hydrologie, la climatologie à travers ses recherches sur l'évolution des climats (Figure 1).

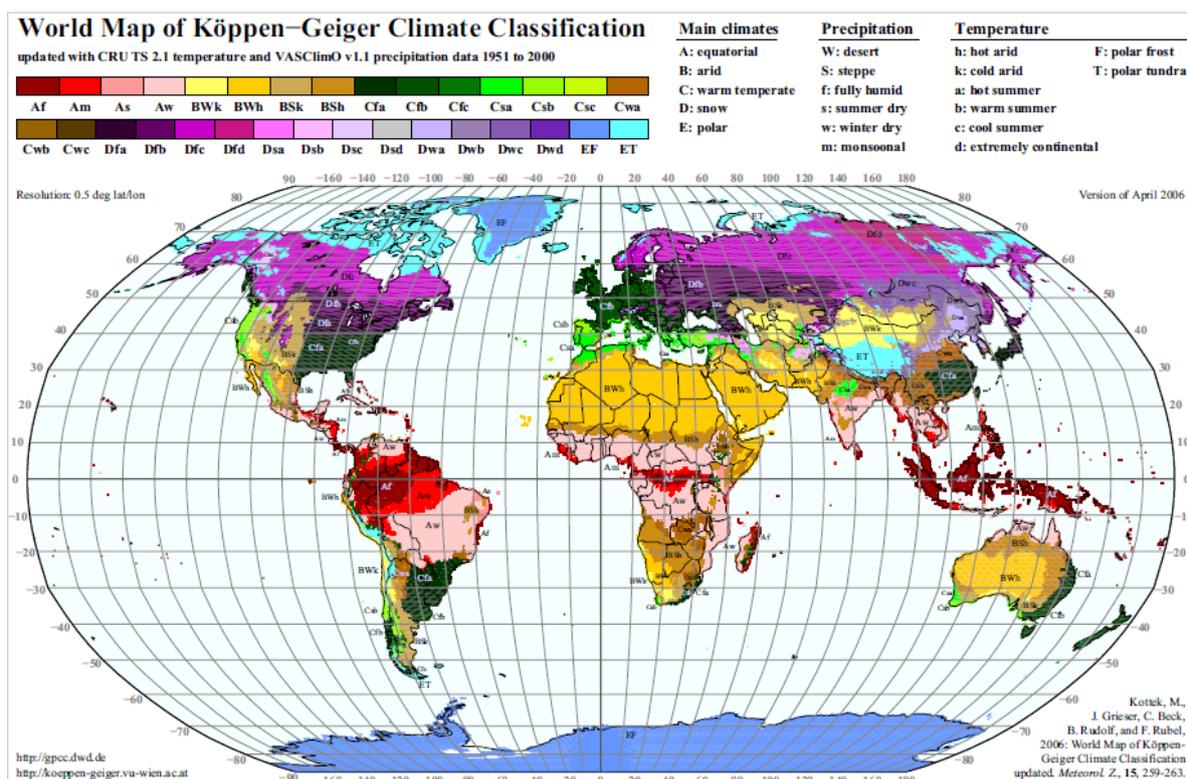


Figure n°1: classification des climats mondiaux (HUFTY, 2001)

Selon cette classification le climat est repéré par un code de deux ou trois lettres comme suit (Hufty, 2001 ; Bonan 2016):

I-3-1-Classification selon la première lettre : Dans les grandes lignes, les climats mondiaux s'étalent de A à E, en allant de l'équateur aux pôles, cette catégorie prend en considération les températures moyennes annuelles, mensuelles et les précipitations (Tableau 1).

Tableau n°1 : classification des climats selon la température et les précipitations (Hufty, 2001 ; Bonan 2016).

Code	Type	Description
A	Climat tropical	- Température moyenne de chaque mois de l'année > 18°C
B		- Pas de saison hivernale - Fortes précipitations annuelles (supérieure à l'évaporation annuelle)
C	Climat sec	- Evaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles
D		- Aucun cours d'eau permanent.
E	Climat tempéré chaud	- Température moyenne du mois le plus froid comprises entre -3°C et 18°C.
F		- Température moyenne du mois le plus chaud > 10°C - Les saisons été et hiver sont bien définies.
G	Climat tempéré froid	- Température moyenne du mois le plus froid < -3°C
H		- Température moyenne du mois le plus chaud > 10°C - Les saisons été et hiver sont bien définies.
I	Climat polaire	- Température moyenne du mois le plus chaud < 10°C
J		- La saison d'été est très peu marquée.

I-3-2-Classification selon la deuxième lettre : cette catégorie prend en considération le régime pluviométrique, on peut citer les types suivants (voir tableau 2)

Tableau n°2 : classification des climats selon le régime pluviométrique (Hufty , 2001 ; Bonan 2016).

Code	Type	il s'applique	description :
S	-Climat de steppe	B	-précipitations annuelles comprise entre 380 et 760mm
W	-Climat désertique	B	- précipitations annuelles < 250mm
f	-Climat humide	A-C-D	-précipitations tous les mois de l'année -pas de saison sèche
w		A-C-D	- saison sèche en hiver
s		A-C-D	-saison sèche en été
m	-Climat mousson	A	-précipitations annuelles > 1500mm -précipitation du mois le plus sec < 60mm
T		E	-Température moyenne du mois le plus chaud comprise entre 0°C et 10°C
F		E	- Température moyenne du mois le plus chaud < 0°C.
M		E	-Précipitations abondantes, Hiver doux

I-3-3-Classification selon la troisième lettre : Pour affiner les types B, C et D, une troisième lettre précise les variations de température (Tableau 3):

Tableau n°3 : classification des climats selon le régime pluviométrique (Hufty , 2001 ; Bonan 2016).

code	description	s'applique
a : été chaud	-Température moyenne du mois le plus chaud > 22°C	C-D
b : été tempéré	-Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C -Température moyenne des 4 mois les plus chauds > 10°C	C-D
c : été court et frais	-Température moyenne du mois le plus chaud < 22°C -Températures moyennes mensuelles > 10°C pour moins de 4mois -Température moyenne du mois le plus froid < -3°C	C-D
d : hiver très froid	- Température moyenne du mois le plus froid < -3°C	D
h : sec et chaud	-Température moyenne annuelle > 18°C	B
K : sec et froid	- Température moyenne annuelle < 18°C	B

I-4-Les échelles du climat

Selon (Chémery, 2006), le climat est généralement bordé de quatre échelles spatiales, imbriquées les unes dans les autres, les plus petites dépendent des plus grandes, qui sont (Figure 2):

I-4-1-Macroclimat (global) : il est représenté par les caractéristiques climatiques principales d'un pays ou d'une surface de grande ampleur, il est influencé par les facteurs astronomiques, la circulation astronomique, les facteurs géographiques.

I-4-2-Mésoclimat (climat régional) : concerne un espace plus petit que le macroclimat, il représente les paramètres climatiques régionaux influencés par les conditions géographiques

locales telles que la topographie, la présence de masses importantes d'eau (mer, lac de grande taille,...), de végétation (forêts,...) ou de bâtiments (zones urbaines,...).

I-4-3-Topoclimat (climat local) : concerne des espaces plus petits que le mésoclimat, il s'applique à des espaces de l'ordre du kilomètre ou de dizaines de kilomètres. A cette échelle, le type de climat régional, le relief, la nature du sol, les étendues aquatiques (océan, lacs ...) jouent un rôle important et influent sur les phénomènes de vents, d'humidité et d'écart de température

I-4-4-le microclimat : il désigne des conditions climatiques limitées et spéciales à une petite région géographique, significativement distinctes du climat où se situe cette région, on peut constater dans une même région des variations locales dues à différents facteurs tels que l'altitude, la végétation, les vents et les constructions (Grundström et al, 2003). Il définit les conditions climatiques locales d'un site particulier. Il se réfère à des espaces de petites dimensions tels qu'une rue ou une place.

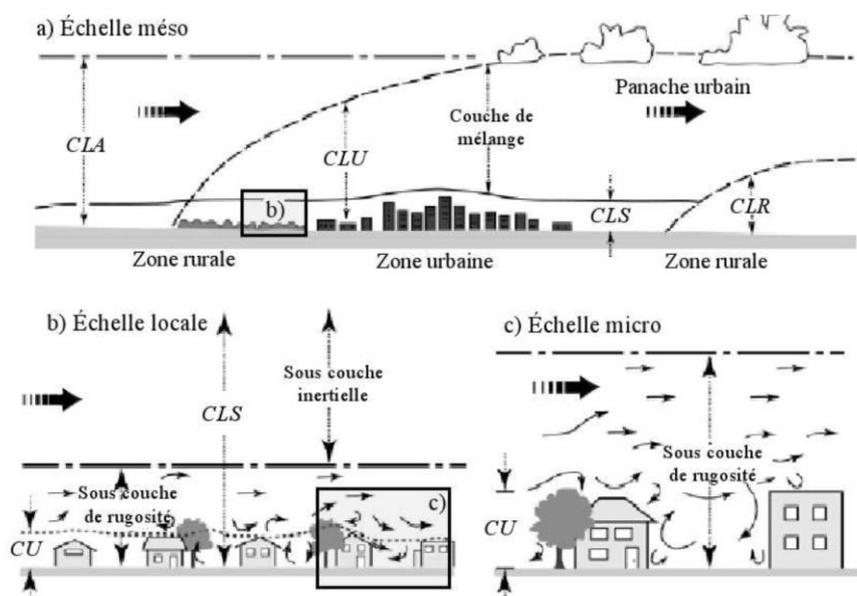


Figure 2: Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU), adapté de (Oke T.R, 2006)

II-Le microclimat urbain

Plus de la moitié de la population mondiale vit de nos jours en ville, cette proportion atteignant 80% dans les pays développés, cette concentration populaire engendre l'augmentation de l'environnement bâti et la diminution des surfaces vertes, ce qui provoque des changements climatiques autour de la ville, donc le climat urbain correspond à un climat modifié et se différencie en général du climat de la campagne avoisinante.

Le climat urbain est caractérisé par une amplification des valeurs de température de l'air, une diminution des valeurs d'humidité de l'air et une modération de la vitesse du vent, susceptibles

de créer des conditions microclimatiques désagréables pour les personnes, notamment pendant la saison chaude.

Le microclimat est la synthèse des conditions physiques ambiantes (la distribution dans le temps et dans l'espace, les valeurs et tendances fluctuantes, les valeurs moyennes et extrêmes, les gradients spatiaux et la fréquence des oscillations) en raison de variables atmosphériques (la température, l'humidité, l'ensoleillement, la vitesse) ou échanges avec d'autres organismes (émission infrarouge, chauffage, éclairage, ventilation) sur une période représentative de toutes les conditions déterminées par les facteurs de forçage naturel et artificiel » (Camuffo, 2014).

Ils sont les interactions dynamiques et localisées entre différents processus de la couche superficielle, tels que les échanges d'énergie et de matière, les processus de rayonnement et les effets de la surface sous-jacente (Foken, 2008). Celles-ci sont à nouveau déterminées par le paysage, les conditions du sol, la végétation, l'utilisation des terres et la rétention d'eau.

II-1-Les composants du microclimat

II-1-1-L'humidité du sol

L'humidité du sol est l'un des déterminants les plus importants du microclimat. La conductivité thermique et la capacité thermique du sol augmentent considérablement en présence d'humidité du sol (Bonan G, 2016).

L'évapotranspiration est le processus de transfert de l'eau de la surface vers l'atmosphère, qui consomme beaucoup d'énergie par rapport au chauffage de l'air. Ainsi, les zones où l'humidité du sol est disponible présentent un microclimat plus équilibré avec des températures de l'air et du sol plus basses. Cela facilite non seulement la croissance des plantes, mais affecte également les conditions météorologiques et les précipitations locales. Au contraire, lorsque l'humidité du sol est limitée, plus d'énergie est disponible pour le chauffage sensible et la température de l'air à la surface augmente. Au cours de la dernière décennie, de nombreuses recherches ont été menées sur la relation entre un manque d'humidité du sol et la survenue de températures extrêmes et de vagues de chaleur, à l'échelle locale et régionale (Seneviratne et al., 2010). L'influence équilibrée de l'humidité du sol est également prise en compte pour les basses températures, car les sols humides restent au chaud plus longtemps que les sols secs pendant les périodes de gel.

II-1-2-La température du sol :

La température du sol est déterminée par le rayonnement entrant, la conductivité thermique et la capacité calorifique du sol. La couleur du sol influence la mesure dans laquelle le rayonnement entrant est absorbé ou réfléchi. Un sol plus sombre a tendance à absorber une

fraction plus élevée du rayonnement solaire, tandis que des sols plus légers ont tendance à refléter le rayonnement et à être plus froids. La conductivité thermique est la vitesse à laquelle un sol transfère de la chaleur, et une conductivité plus élevée signifie que le rayonnement peut entrer et sortir du sol à un taux plus élevé. En d'autres termes, il indique la vitesse à laquelle un sol se réchauffe et se refroidit. Les sols à haute conductivité thermique perdent de l'énergie plus rapidement et se refroidissent donc plus rapidement.

Les facteurs qui déterminent la conductivité thermique et la capacité thermique du sol sont la texture du sol ou la composition minérale, la porosité, l'humidité du sol et la matière organique. La présence d'humidité dans le sol augmente considérablement la conductivité thermique, car l'eau est vingt fois plus conductrice que l'air (Bonan, 2016). La matière organique du sol a une très faible conductivité thermique par rapport aux sols minéraux et agit donc comme un isolant qui empêche la chaleur d'entrer dans le sol pendant la journée et l'empêche de s'échapper pendant la nuit.

Le transfert de chaleur dans le sol pendant la journée éloigne la chaleur de la surface directe et abaisse la température. Lorsque la surface est plus fraîche la nuit, la direction du transfert de chaleur du sol est inversée et la chaleur est libérée à la surface, ce qui permet d'équilibrer les extrêmes. Le même processus se produit également sur des échelles de temps plus longues, la chaleur étant stockée pendant les mois les plus chauds et relâchée pendant les mois les plus froids (Bonan, 2016). La température du sol influe sur la croissance des cultures en fournissant la chaleur nécessaire aux graines, aux racines des plantes et aux micro-organismes présents dans le sol. Les températures élevées du sol peuvent nuire à la croissance des plantes, tandis que les températures extrêmes peuvent bloquer les processus biologiques des micro-organismes (FAO, 2016).

II-1-3-La température de l'air

Bien que la température générale de l'air soit le résultat de divers processus de radiation, les conditions du profil de température à quelques mètres de la surface changent rapidement. La température, ainsi que l'humidité et le vent, sont influencés par les processus de surface et les propriétés avec lesquelles il interagit. La végétation modifie le bilan radiatif par les ombres tout en constituant une barrière contre le vent (Gliessman, 2015).

La figure 3 montre le cycle de température quotidien typique dans une forêt. La température maximale de l'air se situe dans la partie supérieure de la cime, généralement environ une à deux heures après midi (Foken, 2008). En dessous de la couronne, les températures diurnes sont plus basses. La nuit, des températures minimales se produisent dans la partie supérieure de la couronne en raison du refroidissement de la surface de la Terre et de l'air proche du sol,

appelé refroidissement par radiation. Cela se produit particulièrement avec un ciel dégagé, un vent calme et une faible humidité. Le soir, une forêt est plus chaude que ses environs.

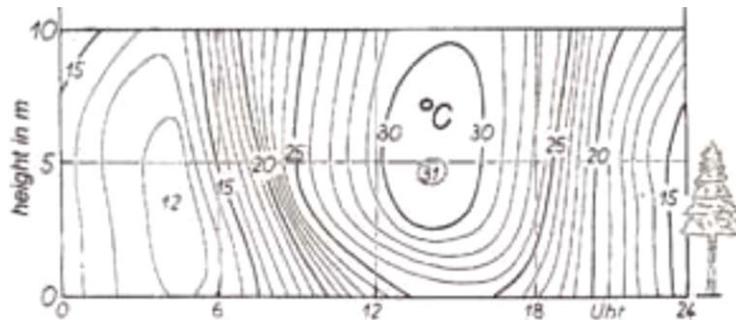


Figure 3 : Cycle quotidien de la température de l'air dans et au-dessus d'une forêt (Foken T, 2008)

II-1-4-L'humidité de l'air

L'humidité élevée de l'air ralentit la transpiration des plantes, car l'air humide n'absorbe pas la vapeur d'eau aussi facilement que l'air sec. Ici, la présence de vent local est essentielle pour mélanger l'atmosphère locale, car elle éloigne l'air humide de la végétation (Nicholson 2012; Bonan, 2016). L'humidité élevée de l'air, combinée aux variations de la température de l'air, peut entraîner des précipitations dans un paysage, au cas où l'humidité de l'air atteint le point de saturation.

Les vents locaux jouent également un rôle dans la formation de rosée. Alors que des vents légers ont contribué à la formation de rosée dans des sites non protégés, des vents modérés à forts ont inhibé la formation de rosée (Richards K, 2004). La présence de végétation servant de brise-vent ou fournissant de l'ombre joue un rôle dans la formation et la durée de la rosée. En réduisant la vitesse du vent, les brise-vent peuvent contribuer à la formation de rosée, mais également à la réduire, car les couches d'air chaud et local ne sont pas éliminées. L'ombre de la végétation aide à réduire les températures de surface locales, ce qui augmente les risques de formation de rosée (Agam & Berliner, 2006). La présence de vent pour transporter l'humidité de l'air peut jouer un rôle important dans l'augmentation et la diminution de l'humidité locale. Un exemple dramatique est la mousson, où de l'air chaud chargé d'humidité pénètre à l'intérieur des terres.

II-1-5- les vents (direction et vitesse)

Le vent peut provoquer des températures plus chaudes ou plus froides en fonction de la température ambiante (Bonan, 2016; Gliessman, 2015). En outre, le mouvement de l'air dans le couvert végétal est essentiel pour maintenir de bons niveaux de CO₂ pour la croissance, éliminer l'excès d'humidité et abaisser le niveau global d'humidité, réduisant ainsi le risque de maladies.

Les paysages ont tendance à présenter des surfaces hétérogènes présentant des caractéristiques de surface très différentes (Foken, 2008). En combinaison avec le vent, cela peut créer un système d'écoulement compliqué, dépendant de la rugosité de la surface et du profil d'humidité et de température. Ces profils peuvent se déplacer sous le vent, formant une couche de discontinuité appelée couche limite interne. De cette manière, les zones voisines peuvent affecter certains types d'utilisation des sols et les niveaux de température et d'humidité de surface correspondants (Figure 4).

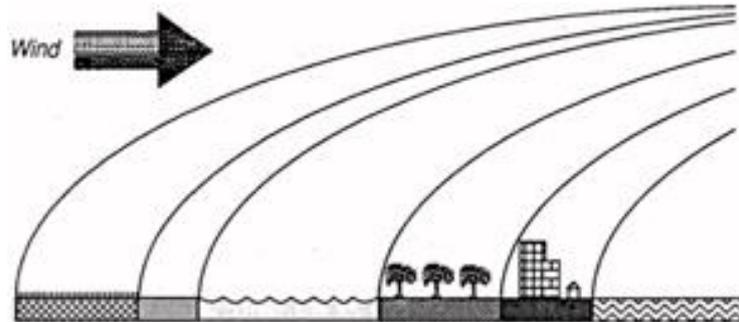


Figure 4: Génération de couches limites internes au-dessus d'une surface non homogène (Foken T, 2008)

II-2- Les paramètres qui influencent le microclimat urbain

- ✓ La Morphologie, la densité et la taille de la ville ;
- ✓ La couverture minérale et végétale de la ville ;
- ✓ Les étendues d'eau ;
- ✓ L'Albédo de matériaux ;
- ✓ Les activités anthropiques.

II-3- L'îlot de chaleur urbain

La caractéristique principale du climat urbain est l'îlot de chaleur urbain (ICU), un phénomène décrit pour la première fois en 1818, fait référence au phénomène de températures atmosphériques et de surface plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones rurales environnantes (Oke, T.R 1973 ; Oke T.R & Hannel F.G, 1970 ; Voogt J.A, 2004). En règle générale, la formation de (ICU) est principalement causée par les modifications du paysage dues au développement urbain, qui se traduisent par une augmentation de la température de surface de la terre (LST). Plus spécifiquement, le phénomène (ICU) est influencé par la réduction de la végétation dans les zones urbaines, les propriétés des matériaux urbains, la géométrie urbaine, la chaleur anthropique, les conditions météorologiques et la localisation (Voogt, 2004) (Figure 5).

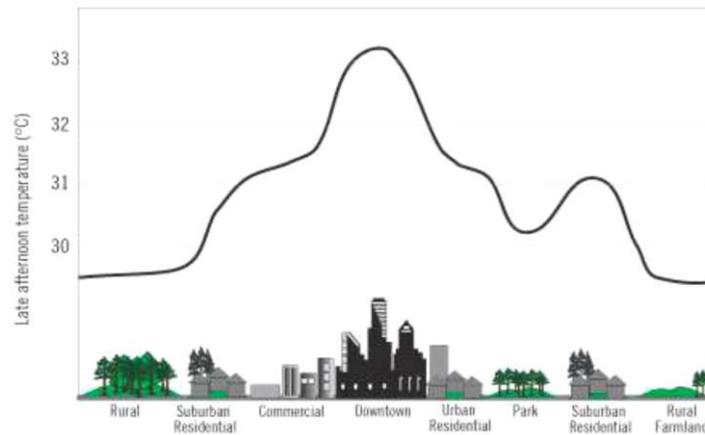


Figure 5 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain (Oke T.R, 1973)

En effet, comme le signalent (Rizwan et al, 2008), l'îlot de chaleur urbain est la réponse mutuelle de plusieurs facteurs qui peuvent être répartis entre ceux qui sont contrôlables et ceux qui ne le sont pas (Figure 6).

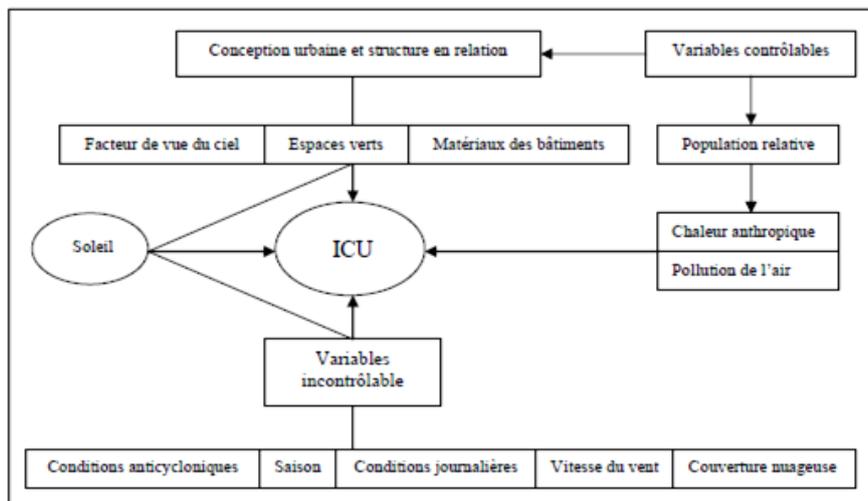


Figure 6: Formation de l'îlot de chaleur urbain (Rizwan A.M et al. 2008).

Les processus physiques qui sont responsables sur la génération de l'ICU sont :

- ✓ Accumulation et stockage de la chaleur dans les constructions ;
- ✓ Altération du bilan d'eau (réduction de l'évapotranspiration due à la végétation et augmentation par rejets des activités industrielles)
- ✓ Augmentation de la production de gaz à effet de serre et altération du bilan radiatif ;
- ✓ Altération du cycle diurne des flux de chaleur sensible, par rayonnement et par conduction, notamment lors du refroidissement nocturne.
- ✓ Production de chaleur sensible anthropogénique ;
- ✓ La topographie d'une zone urbaine et les écoulements aérauliques.
- ✓ La morphologie urbaine et son effet sur la réduction de la vitesse de vent ;

Selon (Le Bras, 2015), l'étude de la différence des bilans d'énergie des surfaces rurales et urbaines permet de comprendre la formation de ce phénomène, donc le bilan d'énergie d'une surface rurale s'écrit comme suite:

$$Q^* = Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

Sachant que:

- Q^* est le flux de rayonnement infrarouge et solaire net ;
- Q_H est le flux de chaleur sensible ;
- Q_{LE} est le flux de chaleur latente ;
- ΔQ_S est le terme de stockage de chaleur dans le sol et les bâtiments ;
- ΔQ_A l'advection de la chaleur par le vent.

Pour les surfaces urbaines, (Oke, 1981) a formulé le bilan énergétique d'une surface urbaine en reprend le bilan effectué à la campagne et lui ajoutant un flux anthropique Q_F dû aux activités anthropiques comme le trafic routier, les activités industrielles, le chauffage ou la climatisation des bâtiments, donc le bilan énergétique d'une surface urbaine s'écrit comme suite :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (2)$$

II-3-1-Les types de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

Selon (Le Bras, 2015), il existe trois types d'ICU:

- ✓ L'îlot de chaleur urbain souterrain dont les villes ont une tendance en effet à avoir un sous-sol plus chaud qu'à la campagne ;
- ✓ Les îlots de chaleur urbain de surface sont mesurés en fonction de la température de surface de la terre (LST) ;
- ✓ tandis que les îlots de chaleur urbain atmosphériques sont mesurés en fonction de la température de l'air, et sont souvent classés en ICU de couche de couverture et en ICU de couche limite. Les villes produisent des ICU indépendamment de leur taille et de leur emplacement, bien que l'effet diminue souvent avec la taille de la ville (Aniello et al, 1995; Oke, 1973).

II-3-2-Les causes de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

Parmi les causes de l'îlot de chaleur urbain on cite (Le Bras , 2015):

- ✓ Les propriétés thermiques des bâtiments, le piégeage¹ radiatif et la convection qui est plus faible en ville aident à un meilleur stockage et relâchement de la chaleur par les

¹ Il consiste en l'absorption progressive des flux radiatifs issus des multi-réflexions sur les parois des bâtiments et sur le sol qui ne sont pas systématiquement redirigées vers le ciel

bâtiments et les routes en ville, ainsi une grande partie du rayonnement solaire est converti en chaleur sensible plutôt qu'en chaleur latente ;

- ✓ La morphologie de la ville offre une plus grande surface d'échange thermique qu'une surface naturelle. L'absorption du rayonnement solaire due au piégeage radiatif par les surfaces verticales et horizontales de la ville ainsi que par les réflexions multiples sur ces surfaces ;
- ✓ Les rues des villes ayant un facteur de vue du ciel² élevé retiennent une grande quantité de rayonnement infrarouge ;
- ✓ Ainsi l'énergie stockée dans les bâtiments la nuit est difficilement rejetée à l'atmosphère à cause de la rétention du rayonnement infrarouge par les surfaces verticales urbaines ;
- ✓ Des émissions anthropiques plus grandes dues au trafic routiers, aux activités industrielles ou au chauffage et à la climatisation. Qui peuvent augmenter la température en ville.

II-3-3-Les caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

- ✓ La morphologie urbaine définit l'effet d'îlot de chaleur urbain ;
- ✓ Des écarts de température notables sont observés aux frontières marquées entre milieu rural et urbain ;
- ✓ Le rafraîchissement nocturne en milieu urbain est atténué ;
- ✓ L'augmentation de température en début de journée est plus rapide en milieu rural et on peut même observer temporairement une température plus faible en ville ;
- ✓ L'inertie du milieu urbain est notamment due aux matériaux et revêtements des surfaces urbaines (Musy, 2015).

II-3-4-Les impacts de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

Les températures élevées causées par l'ICU, notamment en été, peuvent affecter l'environnement et la qualité de la vie de la ville. Ils peuvent causer des problèmes de santé liés à la chaleur en contribuant à l'inconfort général, aux difficultés respiratoires, aux crampes de chaleur et à l'épuisement, au coup de chaleur non fatal et à la mortalité liée à la chaleur. Les ICU peuvent également intensifier les vagues de chaleur dans les villes, avec des périodes de temps anormalement chaud et souvent humide. Les populations sensibles sont particulièrement exposées à ces événements (Clarke, 1972 ; EPA). Selon (Euro-surveillance, 2005), on estime le nombre de décès excédentaires survenus en Angleterre, au pays de Galles,

² Le facteur de vue du ciel est défini comme la partie du ciel qui n'est pas obstruée par une structure urbaine. Le facteur de vue du ciel vaut 1 pour un ciel dégagé et 0 lorsqu'il est complètement obstrué

en France, en Italie et au Portugal pendant et immédiatement après les vagues de chaleur de l'été 2003 à 22 080 décès. Une préoccupation en matière d'efficacité énergétique, car l'augmentation des températures urbaines augmente également la consommation d'énergie, la demande énergétique de pointe et les prix de l'énergie, tout en augmentant considérablement l'empreinte écologique des villes (Akbari et al, 1992; Hassid et al, 2000).

De plus, les îlots de chaleur peuvent entraîner une dégradation de la qualité de l'air car le taux de production d'ozone photochimique est accéléré à des températures plus élevées et les émissions de précurseurs d'ozone sont augmentées.²² De plus, les centrales thermiques à combustible fossile émettent des gaz à effet de serre, en particulier le CO₂, qui contribue au climat mondial changement (Taha H, 1994 ; Sarrat C, 2006)

III-Le confort thermique dans les espaces extérieurs

III-1-Définition

(Fanger, 1970) le définit comme étant l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction humaine avec l'environnement thermique. Selon (ASHRAE, 1993b) le confort thermique est atteint lorsque l'individu exprime une satisfaction au sujet de son environnement. Il correspond à une motivation simple et permanente qui le pousse à créer, certaines situations climatiques, à en maintenir certaines d'entre elles et à les juger en termes d'agrément ou de désagrément (Galeou et al. 1989). Pour (Givoni, 1978) c'est l'absence d'une sensation de l'inconfort dus soit au froid soit à la chaleur, et comme un état impliquant l'agrément.

De sa part, (Merrouche, 2010) définit le confort thermique comme une interaction permanente entre le métabolisme humain, la tenue vestimentaire, et les données climatiques (la température d'air, la température moyenne radiante et la vitesse d'air).

Donc le confort thermique est un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique, c'est aussi la condition dans laquelle aucune contrainte significative n'est imposée aux mécanismes thermorégulateurs du corps humain. Il permet l'obtention de conditions optimales pour tous les systèmes fonctionnels de l'organisme.

Selon (Reiter, 2007), les avantages du confort des usagers dans l'espace extérieur sont nombreux, on peut citer:

- L'amélioration de la qualité du cadre de vie à l'extérieur ;
- L'accroissement de l'utilisation de ces espaces urbains (place, placette...) pour les rencontres, mixité, détente... ;
- La limitation des nuisances environnementales ;
- La diminution des consommations d'énergie liées à l'utilisation de l'espace extérieur ;

-La valorisation de l'image de la ville.

III-2-Les aspects du confort thermique

À chaque modification de l'activité métabolique ou des conditions environnementales, le corps humain a tendance à s'adapter, essentiellement de trois manières différentes (Nikolopoulou et Steemers, 2003) et (Reiter, 2007):

- ✓ Adaptation physique: changements physiques causés par une personne, être actif (changer de vêtements, boire de l'alcool ou exercer des activités qui affectent la production de chaleur métabolique) ou réactif (ouvrir un parasol pour se protéger du soleil).
- ✓ Adaptation physiologique: appelée aussi acclimatation physiologique, c'est une modification des réponses physiologiques à un certain stimulus, elle est liée à l'exposition répétée à un certain environnement thermique, autrement dit c'est une réponse physiologique du corps qui tend à diminuer le stress lié à une exposition inconfortable. Selon (Fanger, 1970), les gens sont à l'aise si le corps est en équilibre thermique (température corporelle comprise entre 36,5 et 37,5 ° C), si le taux de transpiration est dans les limites de confort et si la température de la peau est de 30 °C aux extrémités et de 34 °C à 35 °C. Ce genre de mécanismes est crucial dans des situations d'inconfort prolongé amenant à des risques importants pour la santé
- ✓ Adaptation psychologique: c'est une modification de la perception d'une information sensorielle, (comme le caractère naturel du climat, les attentes, expérience, temps d'exposition, la raison d'être dans l'espace), elle couvre un domaine nettement plus large que la prise en compte de l'expérience par rapport à des expositions passées : elle dépend de tous les aspects subjectifs et contextuels de notre perception.

III-3-Les échanges thermiques

La chaleur métabolique générée dans le corps est dissipée dans l'environnement par la peau et les poumons par convection et rayonnement sous forme de chaleur sensible et par évaporation sous forme de chaleur latente.

Le transfert de chaleur sensible comprend :

- Le réchauffement de l'air inspiré représente un transfert de chaleur sensible dans les poumons et est proportionnel à l'élévation de température de l'air inspiré ;
- convection et transfert de chaleur par radiation de la peau ;

Le transfert de chaleur latente inclut

- La chaleur latente représente la chaleur de vaporisation de l'eau lorsqu'elle s'évapore dans les poumons et sur la peau en absorbant la chaleur corporelle ;

Le bilan énergétique de l'individu est une combinaison d'équations ou de relations empiriques (coefficients d'échange et certains paramètres physiologiques). Il est calculé à travers de cette formule :

$$M = \phi_{CLO} - \phi_{conv} - \phi_{GLO} - E_{dif} - \phi_{res} - E_{res} - E_{rsW} \quad (3)$$

Les types d'échanges thermiques entre le corps et l'ambiance (Figure 7):

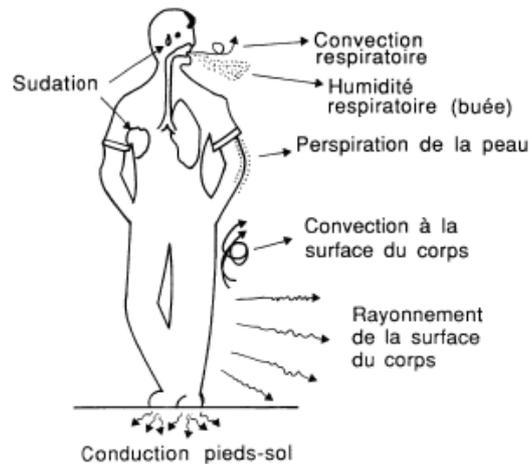


Figure 7: les différents types des échanges thermiques (Depecker *et al.* 1989)

III-3-1-Le rayonnement de la surface du corps (les échanges radiatifs)

Les échanges thermiques par radiation s'effectuent entre des surfaces distantes l'une de l'autre et à températures différentes. Le rayonnement se produit de la surface de la peau ou des vêtements vers les surfaces qui ont une température inférieure. Un échange inverse et simultané peut se produire s'il existe une surface à une température supérieure à la peau ou aux vêtements (Le Guay. M, 2010), il existe deux types :

- Le rayonnement de grande longueur d'onde : La formule principale pour calculer ce type d'échanges entre l'individu et son environnement peut se faire grâce à la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\phi_{GLO} = F_{eff} F_{cl} \epsilon \sigma [(T_{cl} + 273.2)^4 - (T_{mrt} + 273.2)^4] \quad (4)$$

Sachant que :

F_{eff} : le facteur de surface effective de rayonnement (c'est le rapport entre la surface effective de rayonnement de l'individu et sa surface totale, on adopte en pratique une valeur de 0.7,

ϵ : l'émissivité moyenne de la peau et des vêtements dans l'infrarouge lointain, soit environ 0.97. (Vinet. J, 2000)

- Rayonnement de courte longueur d'onde : il inclut la fraction de l'énergie du rayonnement solaire incident ($S \downarrow$) qui est directement absorbée par la peau, son calcul peut se faire à travers cette formule :

$$\Phi_{CLO} = ((1 - \alpha_{sk}) * \tau_{cl} * S \downarrow) / F_{cl} \quad (5)$$

Sachant que :

τ_{cl} le coefficient de transmission du vêtement ;

α_{sk} l'abédo solaire de la peau ;

F_{cl} la fraction entre la surface du vêtement et la surface de la peau (Vinet. J, 2000).

III-3-2-La convection de surface du corps

L'air ambiant au contact de la peau ou des vêtements se réchauffe et emporte de la chaleur. La quantité échangée dépend directement de la vitesse relative de l'air par rapport au corps humain. Une personne qui se déplace dans un air calme est une situation équivalente à une personne immobile dans un air en mouvement. Si la personne se déplace en même temps que l'air, il est nécessaire de connaître leurs directions respectives.

Si la vitesse de l'air relative est nulle, la convection est naturelle. L'air au contact de la surface chaude, s'échauffe à son tour, se dilate, devient plus léger que l'air ambiant et monte naturellement. Dans le cas contraire, la convection est forcée. La quantité de chaleur transmise à l'air est alors très supérieure et proportionnelle à l'écart de température entre la peau (ou le vêtement) et l'air ambiant (Le Guay. M, 2010).

On peut calculer la convection à travers cette équation (Vinet. J, 2000):

$$\Phi_{conv} = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \quad (6)$$

Sachant que :

H_c est un coefficient de convection, selon la norme ISO 7730 on peut le calculer comme suite :

$$\text{En convection naturelle : } h_c = 2.38 (T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad (7)$$

$$\text{En convection forcée : } h_c = 12.1 U^{0.5} \quad (8)$$

Sachant que U est la vitesse de l'air par rapport à la personne (Vinet. J, 2000):

III-3-3-La convection respiratoire

La circulation d'air ambiant à l'intérieur de nos poumons représente une perte de chaleur. On distingue :

- La chaleur sensible : l'air expiré est plus chaud que l'air inspiré,
- La chaleur latente : l'air expiré contient plus de vapeur d'eau que l'air inspiré.

Cette perte de chaleur est directement proportionnelle au débit d'air respiré, lui-même proportionnel au métabolisme. Avec une activité normale en intérieur, elle est faible, de l'ordre de 3 à 10 W (Le Guay, 2010).

Selon (Vinet. J, 2000) on peut calculer les échange par respiration à l'aide de ces deux équations :

$$\phi_{res} = 0.0014 * M * (34 - T_{air}) \quad (9)$$

$$E_{res} = 0.0173 * M * (5.87 - H_{Ra} * P_v(T_{air})) \quad (10)$$

Avec, M en W/m², T_{air} et H_{Ra} la température sèche et l'humidité relative de l'air, et P_v(T_{air}) la pression de vapeur d'eau à la température T_a exprimée en kPa

III-3-4- La convection de la surface de la peau

Appelée aussi les pertes par diffusion, ou pertes par perspiration, c'est une perte non contrôlée d'humidité du corps humain, due à la porosité de la peau, un mécanisme de régulation très efficace et constitue le meilleur indice physiologique de stress thermique. Elle dépend de la température de la peau et de la quantité de vapeur contenue dans l'air ambiant. La diffusion est plus importante en hiver qu'en été, car l'air ambiant est généralement plus sec. Néanmoins, la puissance correspondante varie peu et reste de l'ordre de 18 W (Le Guay. M, 2010). Ce type d'échange (E_{sk}) se varie entre deux valeurs: une valeur minimum d'évaporation diffuse (E_{dif}) et une valeur maximale (E_{max}) lorsque 100 % de la peau est couverte de sueur. Ces deux types de pertes dépendent des mouvements d'air, du gradient de pression de vapeur entre la surface de la peau à travers les vêtements et l'air ambiant, ainsi que de la résistance au transfert de masse de vapeur d'eau due aux vêtements (Vinet. J, 2000).

$$E_{dif} = 4 + 0.12 (p_{ssk} - p_a) \quad (11)$$

Sachant que :

p_{ssk} : pression saturante de la vapeur d'eau à la température de la peau [Pa]

p_a : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'ambiance [Pa]

III-3-5-Les pertes par sudation

C'est une perte supplémentaire d'humidité dans le but de refroidir le corps humain. Ce mécanisme se déclenche si l'activité est importante ou l'ambiance excessivement chaude. La sudation est très efficace tant que la sueur s'évapore et ne ruisselle pas. L'augmentation de la vitesse de l'air permet en général d'augmenter l'évaporation à la surface de la peau. Mais si l'air ambiant est saturé en humidité, comme dans un sauna, la sueur ne peut s'évaporer et ne produit donc aucun refroidissement (Le Guay. M, 2010). L'inconfort augmente avec la valeur de cet indice qui avertit le corps d'un recours à un processus de sueur. Dans le cas d'une peau

entièrement saturée d'eau, la valeur maximale de l'évaporation est calculée comme suite (Vinet, 2000):

$$E_{max} = h_e (p_{ssk} - p_a) \quad (12)$$

Sachant que, h_e est le coefficient d'échange thermique par évaporation h_e (W/m².Pa) on peut le calculer à partir de cette équation :

$$h_e = L_r \cdot h_c \quad (13)$$

Sachant que, L_r une constante qui dépend des substances en présence et de la pression atmosphérique.

L'évaporation réelle de la peau, qui est la somme des pertes par diffusion et par transpiration «régulatrice» ($E_{dif} + E_{rs}$), l'équation de calcul est comme suite :

$$E_{sk} = \omega L_r h_c (p_{ssk} - p_a) \quad (14)$$

ω est un coefficient adimensionnel qui caractérise la mouillure cutanée. Il est égal au rapport entre l'évaporation réelle et l'évaporation maximale :

$$\omega = E_{sk} / E_{max} \quad (15)$$

III-4-Les paramètres du confort thermique :

Selon (Vinet, 2010) les paramètres du confort thermique sont divisés comme suit :

III-4-1-Paramètres relatifs à l'environnement

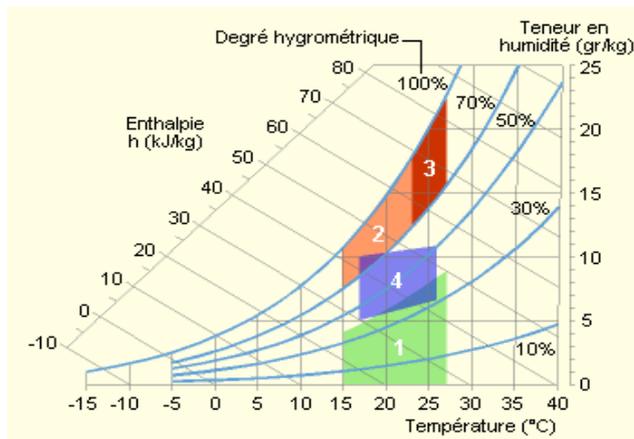
- La température ambiante de l'air T_a : elle est mesurée à l'abri de tout rayonnement, à une hauteur d'environ 1,50 mètre du sol. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'homme au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires (Boulfani, 2010).
- La température moyenne radiante : Une mesure artificielle pour exprimer le degré d'exposition au rayonnement environnemental est la température moyenne radiante (°C), définie comme «la température de surface uniforme d'une enceinte noire imaginaire dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur rayonnante l'espace non uniforme réel » (ASHRAE, 2010). La température moyenne radiante est influencée par le rayonnement solaire à ondes courtes (composants directs, diffus et réfléchis) et par le rayonnement terrestre (atmosphérique et environnemental) (Kántor et Unger, 2011); (Jendritzky et Nübler, 1981) ont défini le premier exemple de calcul de la T_{mr} exportée vers l'environnement extérieur, en répertoriant les flux de rayonnement issus des données météorologiques.

- L'humidité relative de l'air (HR), qui est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température t_a et la quantité maximale d'eau contenue à la même température.
- La vitesse de l'air, qui influence les échanges de chaleur par convection. Dans le bâtiment, les vitesses de l'air ne dépassent généralement pas 0,2 m/s.

Pour le confort dans les espaces extérieurs, il faut prendre en compte aussi les paramètres suivants :

- Les apports solaires (directs, indirects et diffus)
- La température de la voûte céleste
- Les phénomènes naturels : les précipitations (la pluie, la grêle, la neige, etc.) (Vinet. J, 2010)

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, l'humidité relative recommandée soit gardée entre 40 et 65 %. Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant (Figure 8):



1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
2. et 3: Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
3. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
4. Polygone de confort hygrothermique

Figure 8: diagramme de confort de Givoni (Fauconnier, 1992)

III-4-2-Paramètres relatifs à l'individu

Selon (vinet. J, 2000) ces paramètres sont :

III-4-2-1-Les mécanismes de thermorégulation

L'homme est un être homéotherme qui tend à maintenir sa température interne constante, cette dernière doit être comprise entre 36.8 °C et 37.2°C en état de repos et entre 37.0 °C et 37.5 °C en état de travail.

La température moyenne de la peau peut évoluer entre 33.5 °C et 34.5 °C chez l'homme dévêtu et au repos et entre 33.0 °C et 34.5 °C chez l'homme vêtu, elle est fortement dépendante de la température ambiante et est quasi indépendante du métabolisme, on peut la définir par cette équation (Alvarez et al. 1992, cité par Vinet. J, 2000) :

$$T_{sk} = 29.55 + 0.196 T_a - 1.064 M * (1 - 0.295 I_{cl}) \quad (16)$$

Sachant que :

T_a : température ambiante, M est le métabolisme et I_{cl} est l'isolation des vêtements.

En cas ou le corps soumis à des situations de l'inconfort, il va réagir avec des mécanismes de thermorégulation pour maintenir la température interne constante. En temps froid le corps réagit avec un mécanisme thermo-protecteur qui est le frisson. Mais en temps chaud le corps réagit avec deux mécanismes, la vasodilatation (phénomène permettant une augmentation du transfert de chaleur entre la peau et l'extérieur) et la transpiration.

III-4-2-2-Le métabolisme

C'est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci constante (généralement autour de $36,7^{\circ}\text{C}$). Un métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos (Boulfani. W, 2010).

Le métabolisme peut se décomposer en une partie purement thermique (M_{th}) et une partie «mécanique» (W) :

$$M = M_{th} + W \quad (17)$$

Sachant que : le rendement mécanique ($\eta_w = W/M$) n'excède pas 0.2 (Vinet, 2000). Il existe une autre unité, le met, qui correspond à $58,15\text{W}/\text{m}^2$ (métabolisme moyen d'une personne assise au repos). Le tableau 4 résume quelques valeurs du métabolisme pour différentes activités (un homme de 70kg et surface de corps S_a : 1.8 m²).

Tableau 4: valeurs du métabolisme pour différentes activités (Depecker et al. 1989)

Activité	M (W)	M _{th} (W)	W (W)
Sommeil	75	75	0
Assis, au repos	105 - 110	105 - 110	0
Assis, écriture	125	125	0
Debout, relax	125 - 130	125 - 130	0
Travail de laboratoire	170	170	0
Enseignement	170	170	0
Activité dans la maison	180	180	0
Danse slow	125	125	0
Debout, travail léger des bras	180	160	20
Vente	210	200	10
Gymnastique	360	330	30
Marche rapide (4.8 km/h pente 5 %)	420	375	45
Tennis	480	450	30
Creusement de tranchées	630	510	120
Marche forcée (6.4 km/h pente 5 %)	640	580	60
Squash	750	700	50
Basket ball	790	750	40

III-4-2-3-L'habillement

Il représente une isolation thermique ou une résistance thermique aux échanges de chaleur entre le corps et l'environnement. On le considère comme une deuxième barrière thermique (le premier est la peau), en influençant sur les échanges de chaleur convective et radiative

(Boulfani, 2010). La tenue vestimentaire a plusieurs effets, elle réduit le gain de chaleur sèche de l'environnement environnant, ainsi qu'ils augmentent l'humidité et réduisent la vitesse de l'air en contact avec la peau, ce qui se traduit par une diminution du refroidissement résultant de l'évaporation de la sueur (Givoni, 1978). Le niveau d'habillement est caractérisé par une valeur relative, exprimée en « Clo », l'unité d'habillement qui représente l'isolation apportée par une tenue d'intérieur typique d'hiver dont (1 clo= 0.155 m².K/W) (Vinet, 2000). Le tableau 5 resume les valeurs des isolations thermiques de quelques types de vêtements (Depecker et al. 1989).

Tableau 5: valeur de l'isolation thermique de quelque vêtement (Depecker et al. 1989).

Vêtements d'hommes	Icl. 10 ⁴	Vêtements de femmes	Icl. 10 ⁴
Maillot de corps	93	Slip	20
Tee shirt	140	Combinaison courte	200
Tee shirt à manches	155	Blouse légère	310
Caleçon long	155	Blouse chaude	450
Chemise légère		Combinaison longue	300
Manches courtes	220	Tee shirt à manches	310
Manches longues	450	Robe légère	340
Chemise chaude		Robe chaude	1080
Manches courtes	390	Jupe légère	155
Manches longues	450	Jupe chaude	340
Veste légère	230	Pantalon léger	400
Veste chaude	450	Pantalon chaud	680
Pantalon léger	250	Pull over léger	260
Pantalon chaud	500	Pull over chaud	570
Pull over léger	310	Cardigan léger	260
Pull over chaud	350	Cardigan chaud	570
Cardigan léger	340	Bas	16
Cardigan chaud	570	Collant	18
Chaussettes	60	Chaussures	
Chaussettes montantes	155	Sandales	30
Chaussures		Escarpins	60
Sandales	30	Bottes	125

Selon ASHRAE 55-81 on peut calculer la valeur de la tenue vestimentaire à travers cette formule :

$$I \text{ (ens)} = 0.82 \sum I \text{ (pièces)} \quad (18)$$

III-5-Les indices de confort thermique

Les indices du confort thermique sont divisés en trois catégories comme suit :

- indices thermiques ;
- indices empiriques ;
- Indices basés sur des équations linéaires.

III-5-1-Les indices thermiques :

Cette catégorie d'indices est basée sur le bilan énergétique de l'être humain et montre l'interrelation entre les activités métaboliques, les vêtements et les paramètres

environnementaux (température de l'air, température moyenne radiante, vitesse du vent, irradiation solaire et humidité relative) sur la perception thermique du piéton, on peut citer :

III-5-1-1-Température effective universelle (ETU)

(Nagano et Horikoshi, 2011) suggèrent que la température effective universelle est la température de l'air dans un environnement isothermique (50% d'humidité, 0,1 m · s⁻¹, vitesse du vent et isolation des vêtements égale à 0 clo) pour laquelle le corps humain a le même échange de chaleur que dans l'environnement réel. Il s'agit d'une amélioration d'études antérieures telles que ETVO (Nagano et Horikoshi, 2011a), ETF (Kurazumi et al., 2010) et ETFe (Kurazumi et al., 2011), en incluant la conduction de la chaleur et l'irradiation solaire corps humain.

L'équation de base de l'ETU (° C) est définie comme suit (Nagano et Horikoshi, 2011b):

$$ETU = t_{ao} + \frac{\sum NUATFi}{h_u} + \frac{\sum TVFi}{h_u} + \frac{\sum SERFLi}{h_u} + \frac{\sum TVFri}{h_u} + \frac{\sum ERFSi}{h_u} + \frac{\sum SEHFi}{h_u} + \frac{\sum TVFei}{h_u} + \frac{\sum SECFi}{h_u} \quad (19)$$

Sachant que :

- t_{ao} est la température de l'air (°C),
- h_u est le coefficient de transfert thermique normalisé égal à 7,5 (W.m⁻² .K⁻¹) ;
- $\sum NUATFi$ est le champ de température non uniforme de l'air (W.m⁻²) ;
- $\sum TVFi$ est le champ de vitesse thermique (W.m⁻²) ;
- $\sum SERFLi$ est le champ rayonnant à ondes longues efficace (W.m⁻²) ;
- $\sum TVFri$ est le champ de vitesse thermique lié au rayonnement (W.m⁻²) ;
- $\sum ERFSi$ est le champ radiant effectif des ondes courtes (W.m⁻²) ;
- $\sum SEHFi$ est le champ humide effectif standard (W.m⁻²) ;
- $\sum TVFei$ est le champ de vitesse thermique lié à l'évaporation (W.m⁻²) ;
- $\sum SECFi$ est le champ de conduction effectif standard (W.m⁻²) .

Cet indice prend en compte tous les paramètres environnementaux qui affectent le confort humain. Il est en mesure d'analyser les échanges conducteurs entre le corps humain et son environnement. En outre, l'impact de chaque paramètre est clairement défini séparément, ce qui aide l'utilisateur à identifier clairement les aspects critiques de l'étude de cas réalisée.

III-5-1-2-Le modèle COMFA

Le modèle COMFA a été développé pour la première fois par Brown et Gillespie (1995) en tant que modèle mathématique pour décrire le bilan énergétique humain sur la base de quatre éléments: le taux de transpiration, le bilan énergétique, la température centrale et la température de la peau. L'équation fondamentale qui décrit ce modèle est la suivante:

$$B = M + R_{RT} - C - E - L \quad (20)$$

Avec :

- M est la chaleur métabolique générée par une personne ($W.m^{-2}$) ;
- R_{RT} sont des rayonnements à ondes courtes et à ondes longues absorbés ($W.m^{-2}$) ;
- C est la chaleur sensible perdue par convection ($W.m^{-2}$) ;
- E est la perte de chaleur par évaporation due à la transpiration ($W.m^{-2}$) ;
- L est le rayonnement à ondes longues émis par une personne ($W.m^{-2}$).

Le bilan énergétique est exprimé selon une échelle thermique en 5 points allant de $-150W.m^{-2}$ (préférerait être beaucoup plus chaud) à $+150W.m^{-2}$ (préférerait être plus froid) (voir tableau)

Le modèle révisé permet un meilleur calcul de la sensation thermique pour les personnes exerçant une activité métabolique élevée, en redéfinissant les paramètres suivants: résistance des tissus, vitesse relative de l'air, température de la peau, résistance au vêtement et à la vapeur (Kenny et al., 2009a, b; Vanos et al., 2012a). Robert D.Brown (2009), dans ses travaux effectués lors de l'actualisation de cette méthode, a adopté sept échelles du confort des espaces extérieurs, compris entre -200 et +200 (Tableau 6).

Tableau 6: tableau d'évaluation de BUDJET énergétique (traité par l'auteur)

BUDJET w/m ²	Description	BUDJET w/m ² selon R.Brown	Description
Budget ≤ -150	Froid	Budget ≤ -201	Froid
-150 ≤ budget ≤ -50	Frais	-200 ≤ budget ≤ -120	Frais
-50 ≤ budget ≤ +50	Neutre	-120 ≤ budget ≤ -50	Légèremet frais
+50 ≤ budget ≤ +150	Légèremet chaud	-50 ≤ budget ≤ +50	Confortable
+150 ≤ budget	Chaud	+50 ≤ budget ≤ +120	Légèremet chaud
		+120 ≤ budget ≤ +200	Chaud
		+201 ≤ BUDJET	Très chaud

Enfin, une autre révision de COMFA s'appelle COMFA+; Ce modèle prend en compte l'impact des formes urbaines sur le bilan énergétique et introduit le Building ViewFactor (BVF) et le facteur de vue au sol (GVF) dans le calcul du TR (Angelotti et al., 2007).

III-5-1-3-L'indice de stress thermique (ST)

L'indice de stress thermique a été défini pour la première fois par Givoni (1963) et représente le rapport entre le taux de sueur sécrété par une personne nécessaire pour maintenir l'équilibre thermique et l'efficacité de refroidissement du corps, en fonction de la vitesse du vent, de l'humidité relative et des caractéristiques vestimentaires. Cet indice a été adapté par (Pearlmutter et al. 2007 a, b) pour les environnements urbains et exprimée en watts, puis corrélée à une échelle de sensation thermique à sept points dans laquelle 0 W représente la neutralité thermique et les transitions en sensations chaudes, chaudes et très chaudes se produisent par incréments successifs de 320 W (Pearlmutter et al., 2014). L'équation de base est définie comme (Erell et al., 2011):

$$\text{IST} = E \times \left(\frac{1}{f}\right) \quad (21)$$

Sachant que :

-E est le taux de refroidissement (W) produit par la transpiration qui est nécessaire à l'équilibre ;

- f est l'efficacité de la transpiration en refroidissement (sans dimension). La vitesse de refroidissement est exprimée par la somme de la chaleur métabolique, en fonction de l'activité humaine, et des échanges environnementaux dus au rayonnement et à la convection:

$$E = (M - W) \pm R_n \pm C \quad (22)$$

Sachant que :

-M est le taux métabolique du corps (W) ;

-W est l'énergie métabolique transformée en travail mécanique (W) ;

-R_n est l'échange environnemental net dû au rayonnement (W) ;

-C est l'échange environnemental dû à la convection (W).

L'efficacité de refroidissement de la transpiration est exprimée par le rapport entre la vitesse de refroidissement requise et la capacité d'évaporation de l'air comme suite :

$$\left(\frac{1}{f}\right) = \exp \left[0.6 \times \left(\frac{E}{E_{\text{max}}}\right) - 0.12 \right] \quad (23)$$

Avec E_{max} (W) est une expression de la capacité d'évaporation de l'air en fonction de la vitesse du vent, de l'humidité relative et de la température extérieure.

III-5-1-4-Le modèle MENEX

MENEX (modèle d'échange de chaleur chez l'homme) est un modèle de bilan thermique humain à partir duquel on peut déduire les indices bioclimatiques suivants: température subjective (°C), contrainte physiologique (sans dimension), température subjective (°C), Charge calorifique chez l'homme (sans dimension), perte en eau (g.h¹), risque de déshydratation (échelle descriptive), risque de surchauffe (minutes) et le risque de sur-refroidissement (minutes); l'équation générale du modèle MENEX est (Blazejczyk, 2005) :

$$S = M + Q + C + E + R_{\text{es}} \quad (24)$$

Sachant que :

-S est le stockage de chaleur net (W.m⁻²) ;

-M est la production de chaleur métabolique (W.m⁻²) ;

-Q est la balance de rayonnement (W.m⁻²) ;

-C est l'échange de chaleur par convection (W.m⁻²) ;

-E est la perte de chaleur par évaporation (W.m⁻²) ;

-R_{es} est la perte de chaleur par la respiration (W.m⁻²) ;

III-5-1-5-La température équivalente physiologique PET

C'est définie comme la «température de l'air à laquelle le bilan thermique du corps humain est maintenu avec une température centrale et une température de la peau égales à celles des conditions évaluées» (Höppe, 1999). Il est aussi défini comme la température de l'air dans un environnement intérieur local typique, sans vent ni rayonnement solaire, le bilan énergétique du corps humain est équilibré avec les mêmes températures internes et la même peau que celles obtenues dans les conditions permettant d'évaluer, T.Lin, le définit comme la température de l'air à laquelle, dans un réglage intérieur typique (température de l'air = température moyenne de rayonnement, humidité relative = 50%, vitesse du vent = 0,1m/ s). L'indice PET a été développé en 1987 par Mayer et Höppe et modifié par Höppe en 1993. Il se basé sur le modèle de bilan énergétique individuel de Munich (MEMI) et exprime les résultats thermophysiques obtenus par ce modèle à une température équivalente à l'air. (Höppe, 1999) définit l'équation d'équilibre du corps humain comme suit:

$$M + W + R + C + E_d + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (25)$$

Avec :

- M est l'activité métabolique ;
- W est la sortie de travail physique ;
- R est le rayonnement net du corps ;
- C est le flux de chaleur convectif ;
- E_d est le flux de chaleur latent pour évaporer l'eau en vapeur d'eau diffusant à travers la peau
- E_{Re} est la somme des flux de chaleur pour chauffer et humidifier l'air inspiré ;
- E_{Sw} est le flux de chaleur dû à l'évaporation de la sueur ;
- S est la chaleur stockée pour chauffer ou refroidir la masse corporelle ;

Toutes les valeurs sont exprimées en (W) et les pertes de chaleur ont un signe négatif. Selon la littérature, la sensation neutre de PET était adaptée à différents climats comme suite :

- Europe centrale et occidentale, zone neutre comprise entre 18 et 23 ° C (Matzarakis et Mayer, 1996) ;
- Climat chaud et humide de Taiwan, zone neutre entre 26 et 30 ° C (Lin et al., 2010) ;
- Climat côtier méditerranéen, zone neutre comprise entre 20 et 25 ° C (Cohen et al., 2013).

Un autre développement du PET est le mPET (PET modifié) qui améliore la capacité du modèle à réagir au changement d'humidité relative (par un modèle corporel à segment multiple simple) et à l'isolation des vêtements (par un modèle vestimentaire à plusieurs couches) (Chen et Matzarakis, 2014, 2015). Le PET présente certains avantages:

-Il est valable pour le climat méditerranéen à toutes les saisons et à toutes les échelles d'analyse (Matzarakis et al., 1999; Andrade, 2003);

-Il est exprimé en degrés centigrades, ce qui le rend facile à comprendre et à utiliser dans cette région (Andrade, 1998; Matzarakis et al., 1999);

-Il maintient des paramètres personnels constants et convient donc à l'analyse spatiale et temporelle des conditions bioclimatiques (Andrade, 2003);

-Il permet des prédictions ou des simulations à travers des changements de paramètres environnementaux (Matzarakis et al., 1999; Matzarakis et Amelung, 2008);

III-5-1-6-L'indice de vote moyen prévisible (PMV)

Aujourd'hui, l'un des indices thermiques les plus connus est l'équation de confort de Fanger, qui permet de calculer le vote moyen prédit prévisible (PMV). L'équation relie les paramètres classiques que sont la température de l'air, la température moyenne de rayonnement, l'hygrométrie, la vitesse de l'air, le métabolisme et la résistance thermique du vêtement. De plus, deux paramètres physiologiques sont ajoutés, la température moyenne de la peau et l'évacuation de la chaleur par transpiration. Fanger est arrivé à l'évaluation moyenne de l'environnement thermique par le PMV qui varie sur une échelle de 7 degrés entre -3 et +3 (voir tableau), mais Michael Bruse, dans ses travaux effectués lors de la mise à jour de son programme de simulation, a adopté neuf échelles de confort des espaces extérieurs, où la zone théorique de confort extérieur est comprise entre -4 et +4 (Tableau 7). Il est lié au pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) qui décrit le nombre de personnes insatisfaites de l'environnement thermique. Une description détaillée du modèle est donnée dans l'ISO 7730 (Organisation internationale de normalisation, 2005).

PMV et PPD ont d'abord été définis pour l'environnement intérieur (Fanger, 1970), puis, sous le nom de «Klima-Michel-Modell», adaptés aux conditions extérieures, en utilisant les données météorologiques comme entrée, en ajoutant les flux de radiations à ondes courtes et à ondes longues activité et habillement (Jendritzky et Nübler, 1981).

Tableau 7: valeurs du PMV selon Fanger et Michael Bruse (traité par l'auteur)

PMV selon Fanger	Description	PMV selon M. Bruse	Description
		Moins de -4	Extrêmement Froid
-3	Froid	Entre -3 et -4	Moyennement Froid
-2	Frais	Entre -2 et -3	Frais
-1	Légèrement frais	Entre -1 et -2	Légèrement frais
0	Confortable	Entre -1 et +1	Neutre
+1	Légèrement chaud	Entre +1 et +2	Légèrement tiède
+2	chaud	Entre +2 et +3	Tiède
+3	Très chaud	Entre +3 et +4	Moyennement chaud
		Plus de +4	Extrêmement chaud

Matzarakis et Mayer ont établi une relation entre l'échelle de confort du vote prédictif moyen (PMV) déterminée par les valeurs de Fanger et PET pour des niveaux d'activité et d'habillement équivalents en fixant des seuils aux classes de sensation thermique (Tableau 7) (Matzarakis et al., 1999). Il convient de noter que différents environnements thermiques peuvent correspondre à des valeurs égales de PET - par exemple, une valeur inférieure de T_a peut être compensée par un T_{mrt} supérieur.

III-5-1-7-Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD)

C'est le pourcentage de personnes insatisfaites par rapport à une situation. L'indice PPD prédit quantitativement le pourcentage de personnes insatisfaites, car trouvant l'ambiance thermique trop chaude ou trop froide et qui voteraient -3, -2, +2, +3. Pour obtenir une situation de confort thermique, il est recommandé que le PPD soit inférieur à 10%, ce qui correspond à un PMV compris entre -0,5 et +0,5. Dans la situation optimale (PMV = 0, ni chaud ni froid), le taux d'insatisfaction est de 5% parmi des personnes connaissant les mêmes conditions thermiques, métaboliques et vestimentaires, tandis que le taux d'insatisfaction augmente de la même manière si le PMV s'écarte de 0 vers le froid et vers le chaud (Figure 9).

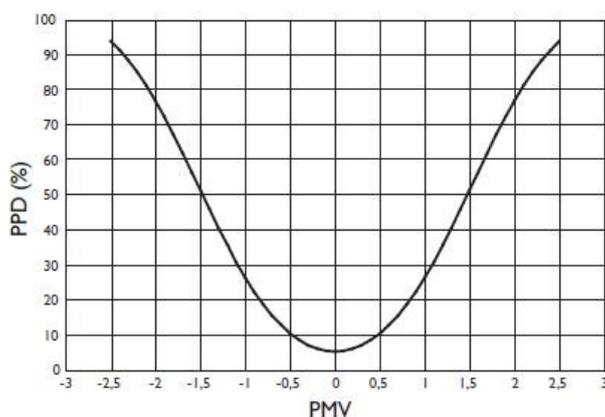


Figure 9: correspondance entre le PMV et PPD (<https://www.beswic.be/fr>)

III-5-1-8-La température effective standard (New Standard Effective Temperature (SET*))

La température effective standard (SET) est un développement ultérieur de la température effective (ET) (Gagge et al., 1971), elle est définie comme la température équivalente d'un environnement de référence isotherme dont l'humidité relative = 50%, vitesse du vent est inférieure à 1,5 (m·s) et la température de l'air égale à la température moyenne radiante, lorsqu'une personne aurait le même stress thermique et la même contrainte thermorégulatrice que dans l'environnement réel (Gagge et al., 1986). Le niveau d'activité est le même dans la situation réelle et dans la situation standard, l'environnement de référence est défini par un métabolisme (M)=1.2 met ainsi qu'une résistance des vêtements (Rclo)=0.9 clo .

La température effective extérieure (OUT_SET *) (Pickup et De Daer, 1999) correspond à l'adaptation extérieure de la température effective standard (SET *) en ajoutant la température moyenne radiante, et a été définie pour analyser le confort extérieur de la ville de Sydney (Spagnolo et de Dear, 2003 a, b). Le tableau 8 présente les échelles de la norme de la sensation.

Tableau 8 : Correspondance entre SET sensation et état physiologique (Gagge et al., 1986)

SET (C°)	sensation thermique	Etat physiologique d'un individu sédentaire
10,0-14,5	Froid	Frisson
14,5-17,5	Frais	Refroidissement lent du corps
17,5-22,2	Légèrement frais	Vasoconstriction
22,2-25,6	Confortable	Neutralité
25,6-30,0	Légèrement tiède	Sueur faible
30,0-34,5	Tiède	Sueur
34,5-37,5	Chaud	Sueur abondante
>37,5	Très chaud	Défaillance de la régulation

III-5-1-9-Indice thermique universel de climat (Universal Thermal Climate Index UTCI):

Il a été développé depuis 1999 par un groupe d'experts multidisciplinaires (thermophysiology, médecine du travail, physique, météorologie, biométéorologie et sciences de l'environnement), conçu par la Société internationale de biométéorologie puis par l'action COST Action 730 (Coopération scientifique et développement technique) (Jendritzky et al., 2012). UTCI est défini comme la température de l'air de référence (température de l'air égale à la température moyenne radiante, vitesse du vent = 0,5 m.s à 10 m, humidité relative = 50% jusqu'à une pression de vapeur d'eau constante de 20 hPa et taux métabolique = 135 w/m²) qui induisent la même contrainte thermique que la condition réelle; une échelle thermique de 10 points exprime la perception thermique de +46 ° C (contrainte thermique extrême) à -40 ° C (contrainte extrême de froid); la sensation de neutralité est comprise entre 9 et 26 ° C (Błażejczyk et al., 2010).

III-5-2-Les indices empiriques :

Les indices empiriques définissent le confort humain pour un climat spécifique et sont exprimés sous forme de régressions linéaires basées sur des études de terrain (surveillance et enquêtes sur site). Ces procédures sont appliquées aux emplacements sélectionnés spécifiques, où elles sont définies et validées. On cite :

- ✓ Le vote de sensation effective (Actual Sensation Vote ASV) ;
- ✓ La sensation thermique (thermal sensation TS) ;
- ✓ Le vote de sensation thermique (Thermal Sensation Vote TSV)

III-5-3-Les indices basés sur des équations linéaires

Ce groupe d'indices définit le confort humain en fonction de l'environnement thermique, en se concentrant sur l'impact de la température de l'air, de la vitesse du vent et de l'humidité relative, en négligeant le microclimat et le comportement humain. Les indices simplifiés conviennent aux études à long terme, telles que l'analyse historique du climat (Emmanuel, 2005)...etc. parmi ces indices on cite :

- ✓ La température apparente (Apparent Temperature AT) ;
- ✓ L'indice de l'inconfort (Discomfort Index DI) ;
- ✓ Indice de stress environnemental (Environmental Stress Index ESI) ;
- ✓ Indice de contrainte physiologique (Physiological Strain Index PSI) ;
- ✓ Indice de la température effective (Effective Temperature ET) ;
- ✓ L'indice Humidex (H) ;
- ✓ Indice de la chaleur (Heat Index HI).

Le tableau 9 résume les échelles thermiques de toutes les normes analysées précédemment.

Tableau 9 : les échelles thermiques des normes analysées (S. Coccolo et al, 2016).

Model	R	S	VH	H	W	SW	Cm	SC	C	Co	VC	EC
COMFA (W·m ⁻²)	(Gaitani et al., 2007)	> 150		150 to 50			50 to -50		-50 to -150			< -150
ETU (°C)	(Watanabe et al., 2014)		> 48		43	38	33					< 28
ITS (W)	(Pearlmutter et al., 2014)	> 800		800 to 480		480 to 160	160 to -160					< -160
MENEX, STI (°C)	(Blazejczyk, 2005)	> 70	69.9 to 55	54.9 to 46		45.9 to 32	31.9 to 22.6	22.5 to -0.4		-0.5 to -20	-20.1 to -38	< -38
PET (°C)	(Matzarakis et al., 1999)		41	41 to 35	35 to 29	29 to 23	23 to 18	18 to 13	13 to 8	8 to 4		< 4
PMV (-)	(International Organization for Standardization, 2005)		> 3		2	1	0	-1	-2			< -3
OUT _{SET} (°C)	(Tsitoura et al., 2014)		> 30			30 to 23	23 to 18	18 to 13				< 13
SEI* (°C)	(Lin et al., 2006)		> 40	40 to 35		35 to 30	30 to 20	20 to 15		15 to 10		10 to 5
UTCI (°C)	(Bröde et al., 2012a)	> 46	46 to 38	38 to 32		32 to 26	26 to 9	9 to 0	0 to -13	-13 to -27	-27 to -40	< -40
PT (°C)	(Jendritzky et al., n.d.)		> 38	38 to 32	32 to 26	26 to 20	20 to 0	0 to -13	-13 to -26	-26 to -39		< -39
ASV (-)	(Nikolopoulou, 2004)		> 2		1		0		-1			< -2
TS (-)	(Givoni et al., 2006)		3		2	1	0	-1	-2			-3
TSV (-)	(Lai et al., 2014b)			1			0					-1
DI (°C)	(Md Din et al., 2014)		> 26.5			26.4 to 20	19.9 to 15					< 14.9
H (°C)	(d'Ambrosio Alfano et al., 2011)		> 54	54 to 45	45 to 40	39 to 30	29 to 20					< 20
HI (°C)	(Blazejczyk et al., 2012)	> 54	54 to 41	41 to 32		32 to 27						< 27
ET (°C)	(Blazejczyk et al., 2012)		> 27	27 to 23		23 to 21	21 to 17	17 to 9		9 to 1		< 1
PE (kcal·m ⁻² ·h)	(Balaras et al., 1993)			< 5			5 to 10	11 to 15		16 to 22	23 to 30	> 30
RSI (-)	(Emmanuel, 2005)			> 0.3			0.3 to 0.1					
WBGT (°C)	(Blazejczyk et al., 2012)	> 30	30 to 28	28 to 24		24 to 18						< 18
WCI (°C)	(Blazejczyk et al., 2012)			> -10				-10 to -27		-28 to -39	-40 to -54	< -55

R (référence), S (étouffant), VH (très chaud), H (chaud), W (chaud), SW (légèrement chaud), Cm (confortable), SC (légèrement frais), C (frais), Co (Froid) VC (très froid) et EC (extrêmement froid). La couleur grise indique la zone confortable

Conclusion :

Le confort humain dans les espaces extérieurs est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité du microclimat urbain et pour fournir des lignes directrices pour un développement urbain durable. Le confort thermique est l'un des facteurs qui influencent les différentes activités des utilisateurs. L'intensité de ces activités est inversement proportionnelle au niveau de gêne ressenti par les utilisateurs de l'espace public lorsqu'ils sont exposés aux conditions climatiques. Par conséquent, la réduction de l'inconfort thermique dans les espaces publics

peut améliorer la qualité de vie d'un public en particulier face aux intempéries et à la température.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes notions sur le climat, la climatologie, le microclimat, le confort thermique extérieur, et les indices de confort qui ont été présentés et subdivisés en trois catégories: modèles de bilan énergétique, indices empiriques et indices basés sur des équations linéaires. Parmi ceux-ci, le PET est le modèle le plus largement utilisé, déjà appliqué et comparé par le contrôle sur site dans de nombreux endroits du monde; UTCI, qui est basé sur la science contemporaine, est le seul modèle appliqué à tous les climats, y compris polaires, et à toutes les échelles, de micro à la macro. OUT_SET * et SET sont bien validés pour les climats tempérés. Selon l'échelle thermique de référence, des modèles tels que PE convient à l'analyse du confort en extérieur pour les climats froids.

Toutes les sensations thermiques, du confort, au stress extrême du froid; de l'autre côté, des modèles tels que ITS, H, et HI présentent une échelle thermique détaillée pour les sensations chaudes, négligeant souvent les froides. D'autres modèles, tels que PET, OUT_SET * et SET*, présentent une échelle de sensation thermique détaillée entourant la zone de confort et sont moins détaillés pour les situations extrêmes de chaleur ou de froid. Les indices thermiques basés sur le bilan énergétique quantifient la sensation thermique du climat général au microclimat urbain (températures de surface et albédo, facteur de vision du ciel, etc.) en tenant compte des variables humaines (habillement et activité métabolique): ils décrivent le microclimat urbain.

Les indices empiriques décrivent avec précision les sensations thermiques des piétons et les facteurs environnementaux qui affectent le plus leur comportement thermique, mais ils ne conviennent que pour les villes analysées par ces indices.

Chapitre n°2 :

Le végétal urbain

« L'homme a un besoin plus vital d'arbres, de plantes et d'herbes que de béton, de pierre ou de bitume. »

Philippe St Marc, 1971

-Introduction

C'est encore difficile de cerner l'idée de nature en ville. Cette idée a été introduite dès le début du XX^{ème} siècle dans les projets d'urbanisme. En premiers temps et dans les premiers cahiers d'urbanisme, la nature était importante uniquement comme source de lumière, de soleil et de verdure. Les espaces verts étaient cependant en faible densité en milieu urbain, en considérant les parcs comme les principaux éléments de nature en ville bien qu'une large proportion soit constituée d'autres éléments verts jardin privatif, massif public, espace vert public...etc. Actuellement, accepter et promouvoir la nature dans la ville peut se justifier par différents arguments notamment sociaux et politiques (Laureau-Varet, M, 2015).

Les arbres et les plantes en tant qu'éléments importants du système terrestre, aident à réguler le climat urbain et atténuent l'îlot de chaleur urbain en créant un effet de refroidissement (Kong et al, 2014; Taha et al, 1988; Oliveira et al, 2011), donnant l'oxygène, absorbant le dioxyde de carbone, minimisant et interceptant les rayons du soleil, générant de l'ombre et absorbant les flux de radiations. En outre, le type et la densité de la végétation, la taille et la forme des espaces verts et la zone d'ombre des arbres sont tous des paramètres importants pour déterminer l'effet de refroidissement (Giridharan, 2008). Ainsi, lorsque les plantes et les arbres changent autour de nous, ces changements peuvent affecter notre santé, notre environnement et notre confort. Pour ces raisons, le sujet de la vie de la végétation devient une question d'une extrême importance pour le scientifique (Wu, 2014).

Les espaces verts urbains, en tant que contributeurs importants, peuvent constituer une part importante du développement durable. Les aménagements d'espaces verts urbains doivent prendre en compte des approches interdisciplinaires et intégratives telles que les aspects économiques, politiques, sociaux, culturels, de gestion et de planification visant à améliorer les installations et les services des espaces verts urbains existants.

Le chapitre présent est consacré pour l'étude de végétal, son rôle dans la ville, les différents types d'espaces vert et comment les adopter pour créer un paysage adéquat et un confort extérieur.

1-Définition

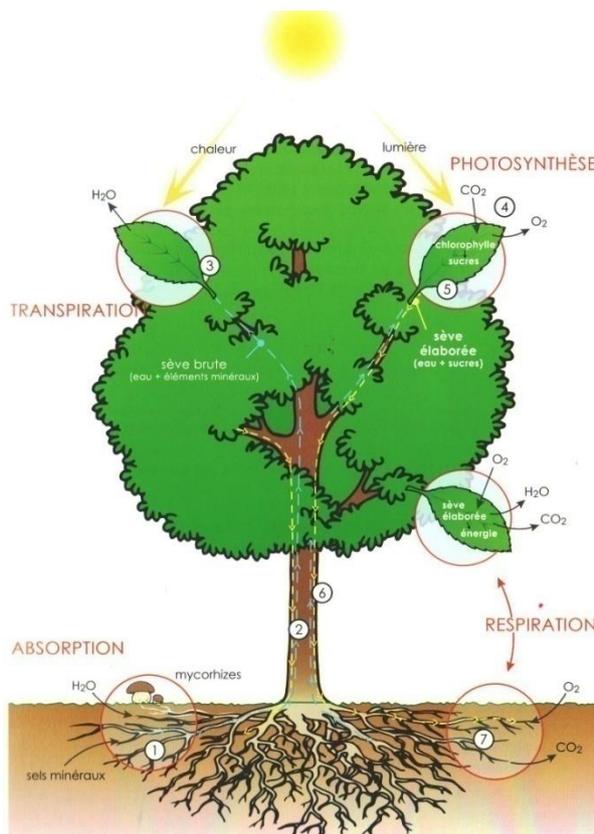
La définition convenue des espaces verts urbains par les écologistes, les économistes, les spécialistes des sciences sociales et les urbanistes est tous espaces publics et privés, principalement recouverts de végétation, qui sont directement ou indirectement à la disposition des utilisateurs.

✓ Selon (Gillig et al, 2008), l'arbre est un végétal vivant qui se développe et fonctionne selon les principaux mécanismes physiologiques suivants :

- l'absorption de l'eau et des sels minéraux ;
- la transpiration et la circulation de la sève brute ;
- la photosynthèse et la circulation de la sève élaborée ;
- la respiration (Figure 1).

✓ Selon (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992) un arbre présente un fût cylindrique ou légèrement conique surmonté d'un ensemble de plusieurs branches appelé tête ou couronne.

✓ Selon la loi n° 2007-06 du 13 mai 2007 relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts, les espaces verts sont des zones ou portion de zones urbaines non construites et recouvertes totalement ou partiellement de végétation, situées à l'intérieur de zones urbaines, ou devant être urbanisées,



Légende :

- 1-absorption de l'eau du sol et des minéraux ;
- 2-la montée des eaux et des minéraux sous forme de sève brute;
- 3-la transpiration par les feuilles grâce au stomate ;
- 4-les feuilles échange de gaz par les stomates ;
- 5-la production des glucides dans les feuilles par la photosynthèse ;
- 6- le phloème transporte la sève élaborée (sucre) vers les racines et les parties non photosynthétique de la plante ;
- 7-l'absorption de dioxygène contenu dans les poches d'air du sol par les racines, et le rejet du dioxyde de carbone.

Figure 1: le fonctionnement d'un arbre (Gillig et al, 2008)

2-Historique

Selon (Merlin & Choay, 1996), le mot espace vert est utilisé pour la première fois en France en 1925 par un conservateur des parcs et Jardins de Paris (J. C. N. Forestier). Ils voient que l'espace vert s'est développé par les périodes historiques comme suite :

-L'époque antique et médiévale, dont les jardins étaient en abondance car la ville était largement pénétrée par la campagne.

-Au 19^{ème} siècle, l'urbanisme Haussmannien met en place une politique d'aménagement des espaces verts dans les villes Françaises, dont les causes étaient de rendre la ville saine et hygiéniste.

-Dans nos jours, et avec l'urbanisation accélérée et les modes de vie qui se diffèrent d'un pays à un autre, les espaces verts prennent des formes différentes et occupent des superficies et des emplacements variables selon les besoins, les aires d'influences et la diversité du milieu urbain avoisinant.

Selon (Gillig et al, 2008) l'espace vert dans la ville est passé par les étapes suivantes :

-Au moyen-âge l'espace vert était peu présent au sein de la ville à cause de la morphologie de la ville qui est un espace clos et restreint retransché derrière des fortifications ; la seule présence de l'arbre était dans quelques jardins ou dans des lieux consacrés aux activités rythmant la vie comme les monastères et les lieux de commerce.

-Au 17^{ème} siècle, apparaît la notion de promenades arborées avec des mails plantés et des boulevards aménagés au pourtour des villes, préfigurant ainsi le développement moderne ;

-Au 18^{ème} siècle, apparaît une présence significative des arbres au sein de la ville, l'espace vert commence à être comme un enjeu essentiel du paysage, en effet, il apparaît un effort de la plantation des espaces verts par les citoyens, chaque citoyen plante une promenade a le droit de donner son nom à cette création (Gillig et al, 2008);

-Au 19^{ème} siècle, et avec l'essor des villes européennes, il annonce un âge d'or de l'espace vert urbain, l'urbanisme Haussmannien préconise les multiples alignements accompagnant les voies de circulation, c'est l'époque aussi dans la quelle les réglementations forestières commencent à s'appliquer sur les arbres urbains, il s'agit d'éviter les coupes abusives et non raisonnées.

-Au 20^{ème} siècle, l'urbanisation accélérée des villes a créé une explosion urbaine dont les conséquences étaient l'augmentation de besoin en logements pour créer de nouveaux quartiers, et l'élargissement des voies pour accueillir les automobiles, l'arbre est devenu un élément qui gêne cette nouvelle logique d'urbanisation. En effet, c'était une période de crise et un véritable bouleversement de la place de l'espace vert urbain au sein de la ville. Il fallait attendre les années 1970 pour que l'absence et le manque de végétal urbain se fasse ressentir, un retour vers la création et l'entretien des espaces vert urbain pour améliorer la qualité de vie des citoyens au sein de la ville.

3-Pourquoi un espace vert urbain (les bienfaits de la végétation urbaine)

Depuis son origine jusqu'aujourd'hui, l'homme vit avec les arbres, les apprécie et les utilise comme source de nourriture, source d'habillement, de se protéger...etc. l'espace vert à plusieurs bienfaits qui influence vie humaine, ces bienfaits sont comme suite:

3.1. Bienfaits environnementaux

3.1.1. Bienfaits écologiques

Les espaces verts urbains fournissent aux villes des services éco-systémiques allant du maintien de la biodiversité à la régulation du climat urbain. En comparaison avec les zones rurales, les différences d'apport en énergie solaire, de configuration des précipitations et de température sont courantes dans les zones urbaines. Le rayonnement solaire, la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative varient considérablement en raison de l'environnement bâti dans les villes (Heidt & Neef, 2008). L'effet îlot de chaleur urbain est provoqué par les grandes surfaces absorbant la chaleur, combinées à une consommation d'énergie élevée dans les villes. L'effet d'îlot thermique urbain peut augmenter les températures urbaines de 5°C (Bolund & Sven, 1999). Par conséquent, une plantation forestière adéquate, la végétation autour de la maison d'un citoyen, la gestion des plans d'eau par les autorités peuvent aider à atténuer la situation.

3.1.2. Contrôle de la pollution

La pollution dans les villes en tant que forme de polluants comprend les produits chimiques, les particules et les matières biologiques, qui se présentent sous forme de particules solides, de gouttelettes liquides ou de gaz. La pollution atmosphérique et sonore est un phénomène courant dans les zones urbaines. La présence de nombreux véhicules à moteur dans les zones urbaines produit du bruit et des polluants atmosphériques tels que le dioxyde de carbone et le monoxyde de carbone. Les émissions d'usines telles que le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont très toxiques pour l'homme et l'environnement. Les personnes les plus touchés par ces contaminants nuisibles sont les enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant de problèmes respiratoires (Sorensen et al, 1997). Le végétal urbain peut réduire directement les polluants atmosphériques lorsque les particules de poussière et de fumée sont piégées par la végétation. Les recherches ont montré qu'en moyenne, 85% de la pollution de l'air dans un parc peut être filtrée (Bolund & Sven, 1999).

La pollution sonore provenant du trafic et d'autres sources peut être stressante et créer des problèmes de santé pour les habitants des zones urbaines. Les coûts globaux du bruit ont été estimés à environ 0,2% à 2% du produit intérieur brut de l'Union européenne (Bolund & Sven,

1999). Les espaces verts urbains situés dans des villes surpeuplées peuvent largement réduire les niveaux de bruit en fonction de leur quantité, de leur qualité et de la distance qui les sépare de la source de pollution sonore. Dans les études contemporaines sur les espaces verts urbains, on considère l'écosystème urbain complexe, la conservation des espaces verts urbains afin de maintenir un réseau écologique naturel pour la durabilité environnementale dans les villes. Pour les villes dont l'économie est en pleine urbanisation et en croissance rapide, un pays comme la Chine devrait envisager la forme dynamique d'expansion urbaine pour gérer des espaces verts urbains efficaces qui contribueront à réduire le CO² global en maintenant, voire en augmentant la capacité d'absorption de CO² via l'environnement naturel (Huang, 2009).

3.1.3. Biodiversité et conservation de la nature

Les espaces verts servent de centre de protection pour la reproduction des espèces et la conservation des plantes, de la qualité des sols et de l'eau. Les espaces verts urbains assurent la liaison entre les zones urbaines et rurales. Ils fournissent un soulagement visuel, un changement saisonnier et un lien avec le monde naturel (Francis, 1997). Un réseau fonctionnel d'espaces verts est important pour le maintien des aspects écologiques d'un paysage urbain durable, avec des voies vertes et l'utilisation d'espèces de plantes adaptées aux conditions locales avec un faible coût de maintenance, autosuffisant et durable (Loures et al, 2007) (Figure 2).

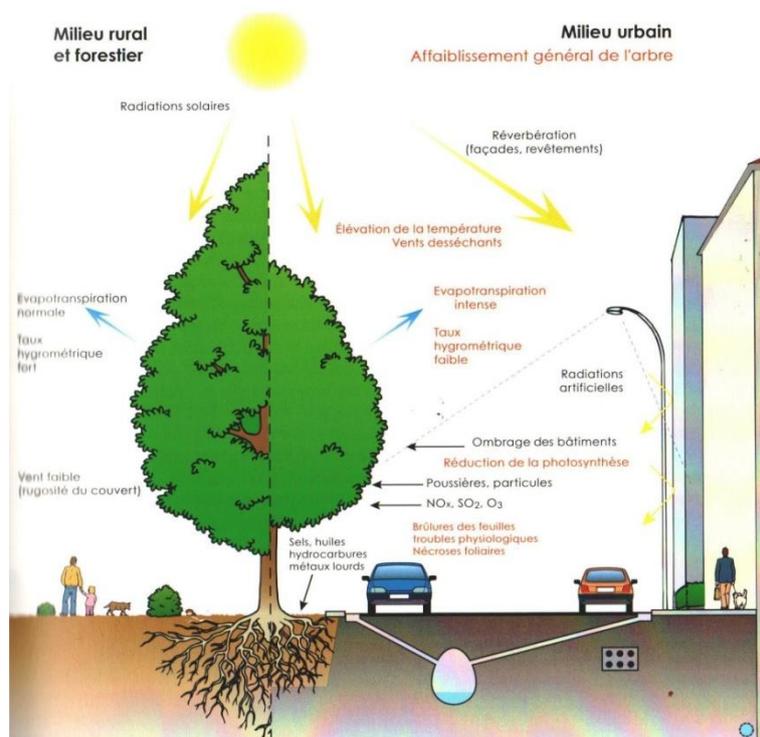


Figure 2: différence entre milieu urbain et rural en existence de la végétation (Gillig et al, 2008)

3.2. Bienfaits économiques et esthétiques

3.2.1. Économies d'énergie

Recourir à la végétation pour réduire les coûts énergétiques liés au refroidissement des bâtiments est de plus en plus reconnu comme une raison économique d'accroître les espaces verts et la plantation d'arbres dans les villes (Heidt. & Neef, 2008). Les plantes améliorent la circulation de l'air, fournissent de l'ombre. Ceci procure un effet de refroidissement et aide à réduire les températures de l'air. Un parc de 1,2 km sur 1,0 km peut produire une température d'air détectable entre le parc et la ville environnante, détectable à 4 km (Heidt. V & Neef. M, 2008). Une étude menée à Chicago a montré qu'une augmentation de 10% de la végétation dans la ville pourrait réduire de 5 à 10% la consommation totale d'énergie pour le chauffage et le refroidissement (Sorensen. M et al, 1997) (Figure 3).

3.2.2. Valeur de la propriété

Les zones de la ville avec suffisamment de verdure sont esthétiques et attrayantes pour les résidents. Néanmoins, les indicateurs montrent très clairement que les espaces verts et les aménagements paysagers augmentent la valeur des propriétés.

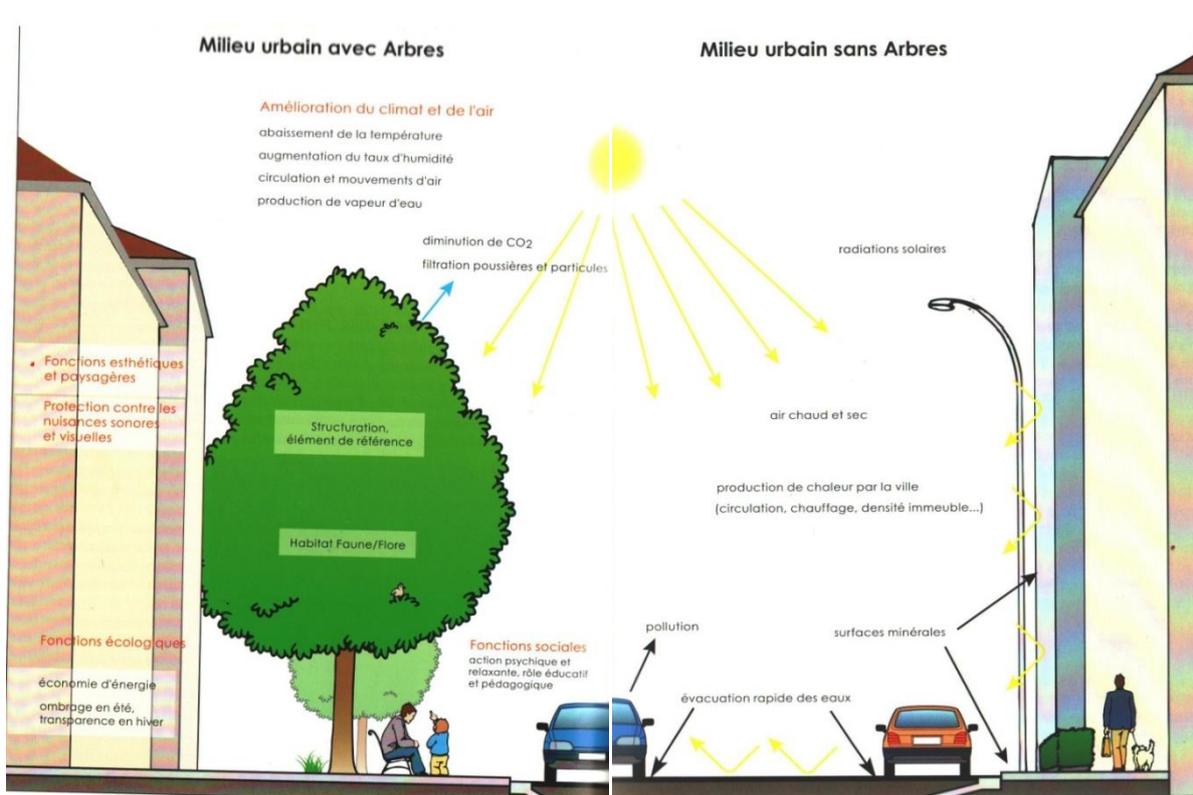


Figure 3: différence entre milieu urbain avec et sans arbre (Gillig et al, 2008)

3.3. Bienfaits sociaux et psychologiques

3.3.1. Loisirs et bien-être

Les gens satisfont à la plupart de leurs besoins en loisirs dans la localité où ils habitent. Les conclusions de (Nicol et Blake, 2000) montrent que plus de 80% de la population du Royaume-Uni vit dans des zones urbaines et que, par conséquent, les espaces verts situés dans les zones urbaines constituent une proportion durable des possibilités de loisirs en plein air. Une étude menée à Helsinki, en Finlande, indique que presque tous les habitants de la ville (97%) participent à des activités de plein air au cours de l'année. La moitié des résidents font des visites en plein air quotidiennement ou tous les deux jours (Neuvonen, 2007). Les espaces verts urbains constituent une ressource de proximité pour la détente; fournir de la chaleur émotionnelle (Heidt & Neef, 2008).

La figure 4 résume les 21 résultats scientifiques sur les bienfaits du végétal en ville.

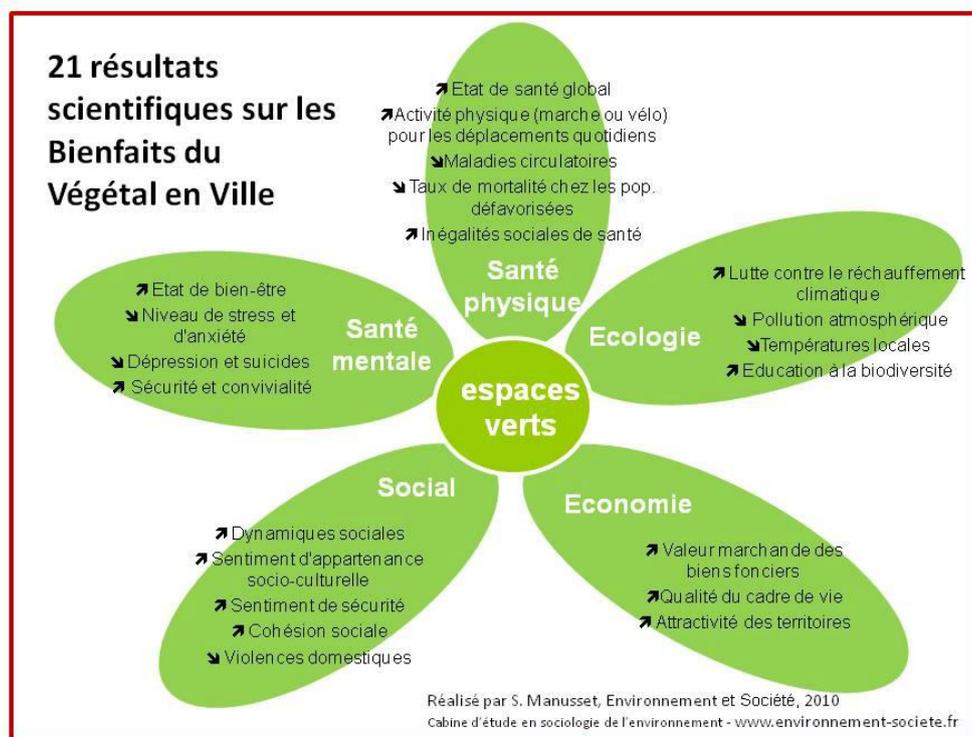


Figure 4: vision globale sur les bienfaits du végétal urbain (Manusset, S., 2010)

3.3.2. Santé humaine

Pour les personnes exposées à l'environnement naturel, le niveau de stress a diminué rapidement par rapport aux personnes exposées à l'environnement urbain, leur niveau de stress est resté élevé (Bolund & Sven, 1999). Dans le même article, les patients d'un hôpital dont les chambres faisaient face à un parc avaient un rétablissement 10% plus rapide et avaient besoin de 50% de médicaments contre la douleur moins forts que les patients dont les chambres faisaient face à un mur du bâtiment.

Cela indique clairement que les espaces verts urbains peuvent améliorer le bien-être physique et psychologique des citoyens. Une autre recherche effectuée dans des villes suédoises a

montré que plus les gens passent du temps à l'extérieur dans des espaces verts urbains, moins ils sont affectés par le stress (Grahn P & Stigsdotter. U. A, 2003). Les améliorations de la qualité de l'air dues à la végétation ont certainement un impact positif sur la santé physique, avec des avantages aussi évidents que la diminution des maladies respiratoires. Le lien entre l'homme et la nature est important pour le plaisir quotidien, la productivité au travail et la santé mentale en général (Sorensen. M et al, 1997).

Le tableau 1 résume les bienfaits de la végétation urbaine selon les écologistes :

Tableau 1: Principaux bénéfices des espaces verts (Bolund & Hunhammar 1999, modifié selon Morell, 2005).

Principaux bénéfices fréquemment attribués aux espaces verts urbains		
Bénéfices économiques	Bénéfices sociaux	Bénéfices environnementaux
Ajouter de la valeur à la propriété environnante, tant commerciale que résidentielle	-Offrir des lieux de contemplation et de réflexion, de détente, de loisirs informels, de paix, d'espace et de beauté.	-Aide à stabiliser les températures et l'humidité urbaines
-Contribuer à attirer les touristes	-Offrir des occasions d'améliorer sa santé et sa forme physique personnelle et de participer à une vaste gamme de sports et d'activités de plein air.	-Ralentir le ruissellement des eaux pluviales et réduire les infrastructures de drainage
-Encourager l'emploi et l'investissement étranger dans une région	-Offrir des espaces sûrs pour se rencontrer, parler et jouer, pour la libre association d'amis et d'étrangers, pour les familles et entre les générations	-Offrir des possibilités de recyclage des matières organiques
-Favoriser la création d'une image favorable d'un lieu	-Fournir des liens culturels avec le passé d'une région, en donnant un sentiment d'appartenance et d'identité.	Favoriser l'habitat de la faune et de la flore sauvages et favoriser la biodiversité
	-Offrir des occasions d'organiser des événements communautaires, des activités bénévoles et des collectes de fonds à des fins caritatives.	-Offrir des occasions d'organiser des événements communautaires, des activités bénévoles et des collectes de fonds à des fins caritatives.
	-Fournir une ressource éducative -une classe en plein air stimulant des idées sur l'art, le design, l'environnement et les sciences naturelles.	-Connaître les saisons et les liens entre le monde naturel et l'environnement urbain.

4-Les catégories de l'espace vert urbain

La loi n° 2007-06 du 13 mai 2007 relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts, fixe les catégories des espaces verts comme suit :

4-1-Les parcs urbains et périurbains : qui sont constitués par les espaces verts délimités et, éventuellement clôturés, constituant un espace de détente et de loisirs, et pouvant comporter des équipements de repos, de jeux et/ou de distraction, de sports et de restauration. Ils peuvent également comporter des plans d'eau, des circuits de promenade et des pistes cyclables;

4-2-les jardins publics : qui sont des lieux de repos ou de halte dans des zones urbaines et qui comportent des massifs fleuris ou des arbres. Cette catégorie comprend également les squares plantés, ainsi que les places et placettes publiques arborées;

4-3-les jardins spécialisés : qui comprennent :

4-3-1-Jardins botaniques : qui sont des institutions qui rassemblent des collections documentées de végétaux vivants à des fins de recherche scientifique, de conservation, d'exposition et d'enseignement. ;

4-3-2-Jardins collectifs : ça concerne les jardins du quartier, les jardins des hôpitaux, les jardins d'unités industrielles et les jardins d'hôtels.

4-3-3-Jardin ornemental: Espace aménagé où l'échantillon végétal ornemental prédomine.

4-3-4-Jardin résidentiel: Jardin aménagé pour le délasserment et l'esthétique, rattaché à un ensemble résidentiel.

4-3-5-Jardin particulier: Jardin rattaché à une habitation individuelle.

4-4-les forêts urbaines : qui comportent les bosquets, les groupes d'arbres, ainsi que toute zone urbaine boisée, y compris les ceintures vertes;

4-5-les alignements boisés : qui comprennent toutes les formations arborées situées le long des routes, autoroutes et autres voies de communication en leurs parties comprises dans des zones urbaines et périurbaines.

5-la typologie de végétation

Selon (Louafi Bellara, 2013) et (Ballot, 2010), la végétation peut être classé sous trois types comme suit:

5-1-Le végétal grimpant

Il est une plante capable de s'élever verticalement en s'appuyant, en s'accrochant ou en s'enroulant sur ou autour d'un support vertical. Il est utilisé généralement pour des raisons d'ornementation, leur effet sur le microclimat est restreint (Figure 5).

Les plantes grimpantes (clématites, jasmins, chèvrefeuilles...) qui offrent une floraison abondante et un feuillage décoratif tout en n'occupant qu'une faible surface au sol.

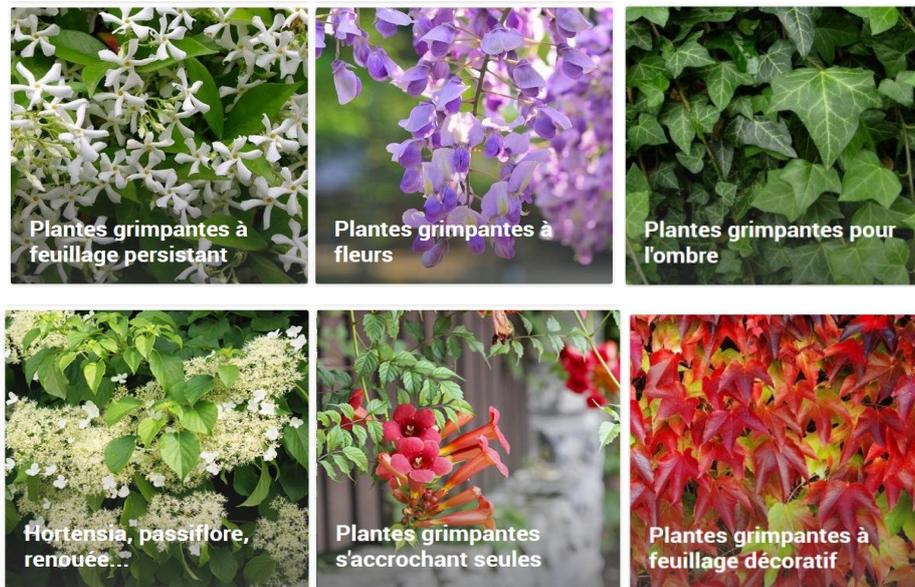


Figure 5: types du végétal grimpant (<https://www.gammvert.fr/2-1212-plantes-dexterieur/2-3082-plantes-grimpantes>)

5-2- la pelouse et la végétation couvrante

La végétation couvrante est une formation végétale de faible hauteur, une plante couvre-sol est une vivace arbustive rampante, qui forme un tapis pouvant être utilisée dans le jardin, en particulier pour recouvrir le sol d'une végétation couvrante. Les couvre-sols sont des plantes tapissantes de couverture dont le but est de protéger le sol des intempéries (lessivage, ruissellement, érosion), s'insérer en bordure à des fins décoratives et ornementales, ou encore dans des zones difficiles à enherber. Son effet sur le microclimat est limité au contrôle de la surface couverte (Figure 6 et 7).



Figure 6: Le thym serpolet



Figure 7: Thymus serpyllum

Sources (<https://www.aquaportail.com/fiche-plante-40-thymus-serpyllum.html>)

Une pelouse est une formation végétale herbacée, basse de faible hauteur, c'est une zone de terre plantée d'herbes, du trèfle et d'autres herbacées. Ils sont utilisés pour leur esthétique et dans le sport (Figure 8).

Les pelouses sont entretenues et coupées à une faible hauteur à l'aide d'une tondeuse à gazon.

La pelouse naturelle se confond avec une prairie herbeuse.



Figure 8: pelouse d'un jardin (<https://www.18h39.fr/articles/les-cles-pour-avoir-une-belle-pelouse.html>)

5-3-L'arbre urbain

Il contient plusieurs espèces et plusieurs types, on cite :

5-3-1-Selon la hauteur de tige : Selon (Deschamps & Daydé, 1992) la hauteur du tronc mesuré du sol à la première branche, on distingue (Figure 9) :

A-Arbre courte-tige et demi-tige : La hauteur des troncs, mesurée depuis le sol jusqu'à la première branche est comme suite :

-80 cm pour les arbres courte-tige

-130 cm pour les arbres demi-tige.

-Les écarts de formation sont pour - les arbres courte-tige: t 5cm - les arbres demi-tige t 10cm.

B-Arbre haute-tige : cette catégorie est divisée en 4 groupes selon les espèces et leur utilisation. On distingue :

Groupe 1: arbres d'espèces très vigoureux, de première grandeur, hauteur du tronc sous la tête 250cm ;

Groupe 2: arbres d'espèces de deuxième grandeur, hauteur du tronc sous la tête 225cm ;

Groupe 3: arbres d'espèces de troisième grandeur, hauteur du tronc sous la tête 200cm ;

Groupe 4: arbres d'espèces peu vigoureux, hauteur du tronc sous la tête 180cm ;

C-Les arbres d'avenue : ce sont des arbres de différentes espèces dont la hauteur minimale du tronc sous la tête est 300cm.

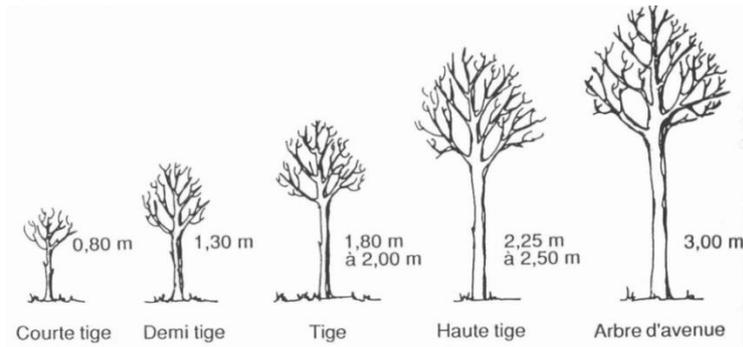


Figure 9: appellation des arbres en fonction de la hauteur du tronc ((Deschamps, C & Daydé, A ; 1992)

5-3-2-Les arbustes : c'est une plante ligneuse qui se diffère de l'arbre, on distingue deux types (Figure 10):

- Arbustes à feuilles persistantes (longévité des feuilles et d'autres organes chlorophylliens est supérieure d'un an ;
- arbustes à feuilles caduques dont la longévité des feuilles et d'autres organes chlorophylliens est inférieure à un an.



Figure 10: types d'arbuste (<https://www.gammvert.fr/2-1212-plantes-dexterieur/2-1231-arbustes>)

5-3-3-les baliveaux : ce sont des plantes obtenues par semi bouturage, c'est un jeune arbre en pépinière, dont le tronc est bien droit et commence à être bien ramifié. Il est appelé scion avant d'arriver au stade de baliveau. Agé de 2 à 4 ans, le jeune arbre ne mesure pas plus de 2 m 50 et la circonférence de son tronc à 1 mètre du sol ne fait pas plus de 6 cm (Figure 11).

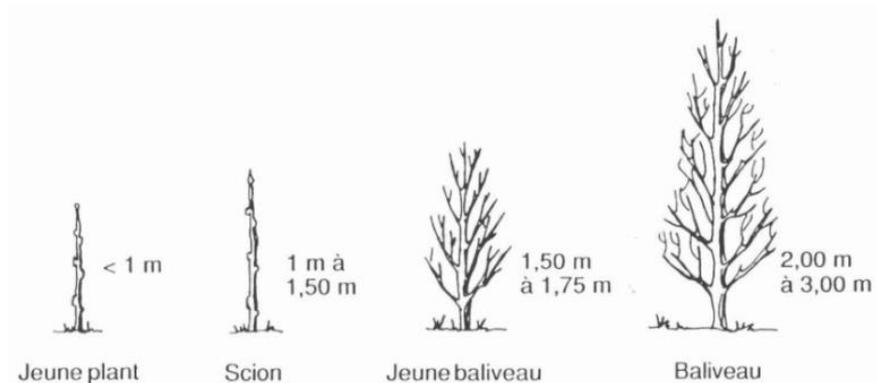


Figure 11 : appellation des végétations en fonction de la hauteur mesurée depuis le sol jusqu'à l'extrémité de la pousse (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992)

5-3-4- Selon la longévité des feuilles : on distingue :

A- Les arbres caducs : comme le chêne, le platane, l'érable, l'orme ou le bouleau, c'est un arbre qui perd ses feuilles à l'automne surtout, lorsque la durée du jour diminue, les arbres se mettent en sommeil. Leurs feuilles tombent pour leur permettre d'économiser de l'énergie. Ce type d'arbre apporte de l'ombre en été et de l'ensoleillement en hiver (Figure 12).

B- Les arbres conifères : ce sont des arbres ou d'arbustes très résistants, pouvant notamment très bien supporter la sécheresse ou le froid (Figure 12). Ils se distinguent des arbres caducs par trois caractéristiques :

- ce sont des résineux
- leur feuillage est composé d'aiguilles
- ils présentent des cônes (Deschamps & Daydé, 1992)

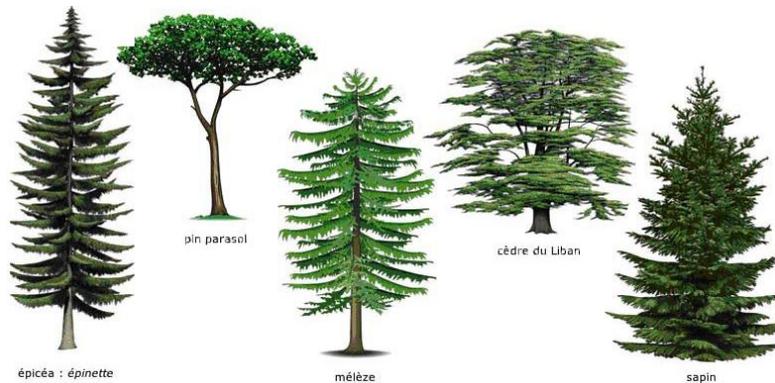


Figure 12: quelques arbres conifères

(<https://handivert.wordpress.com/reconnaissance-de-vegetaux/les-vegetaux/les-coniferes/>)

Selon les services écosystémiques, le tableau 2 suivant résume les différents types de végétation urbaine (Bolund & Hunhammar 1999, modifié selon Breuste et al., 2013).

Tableau 2 : Types de la végétation urbaine (Bolund & Hunhammar 1999, modifié selon Breuste et al., 2013).

Classe de végétation	structure de végétation	Principaux services écosystémiques existants	Principaux services écosystémiques potentiels
A) vestiges végétaux du paysage naturel d'origine	-Bois et forêts, zones humides	-Production de bois, fruits, loisirs, biodiversité, régulation microclimatique, drainage des eaux pluviales, traitement des eaux usées.	-Expérience nature
B) Végétation des paysages culturels formés par l'agriculture	-Les prairies, Jardins, champs, broussailles, herbiers, terres arables et Friches	- Production alimentaire, régulation microclimatique, drainage des eaux pluviales	- Loisirs, biodiversité, expérience de la nature
	-Vert décoratif (parterres de fleurs, petites pelouses, buissons, haies,	-Décoration, valeurs culturelles	-Biodiversité, drainage des eaux pluviales,

	etc.)		apprentissage de la nature
C) Végétation ornementale, horticole et urbaine aménagée	-Alignement d'arbre le long des voies de circulation ou comme accessoire pour remplir l'espace entre les immeubles d'habitation.	-Filtration de l'air, régulation du microclimat, drainage des eaux pluviales	-Loisirs, biodiversité
	-Jardins/parcs familiaux Arbres urbains	Loisirs, régulation du microclimat, filtration de l'air	Biodiversité, expérience de la nature
D) Végétation urbaine spontanée	Buisson herbacé spontané et végétation pré forestière	Biodiversité, régulation du microclimat	Biodiversité, apprentissage de la nature, expérience de la nature, loisirs

6-Impact de l'espace vert sur le microclimat

La végétation est un facteur du climat (Pagney, 2000), c'est une source d'humidité et de rafraichissement grâce à l'ombre qu'elle offre et le phénomène d'évapotranspiration qu'elle génère, son effet sur le microclimat se diffère selon la nature de l'espace vert (parc, jardin, arbre d'alignement...etc.) et le type de la végétation (arbre, arbustes, pelouse...etc.) (Colombert, 2008).

Selon (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003) la végétation réduit la température de l'air en ombrant directement les surfaces et en modérant le gain de chaleur solaire par évapotranspiration des plantes et par la conversion du rayonnement solaire incident en chaleur latente. En outre, la température plus basse qui en résulte entraîne une réduction du rayonnement à ondes longues émis par les feuilles au sol, par opposition aux surfaces dures artificielles environnantes, soumettant ainsi les personnes à une charge radiante réduite.

Plus spécifiquement, l'effet microclimatique des arbres est obtenu par plusieurs procédés:

- ✓ réduction des gains de chaleur solaire sur les fenêtres, les murs et les toits grâce à l'ombrage ;
- ✓ réduction de l'échange des ondes longues du bâtiment avec le ciel ainsi que les températures de surface des bâtiments sont abaissées par l'ombrage ;
- ✓ -réduction des gains de chaleur par conduction et convection en abaissant les températures sèches par évapotranspiration en été;
- ✓ augmentation du refroidissement latent en ajoutant de l'humidité à l'air par évapotranspiration.

Selon (Reiter, 2007) le feuillage des arbres dans les régions fortement boisées intercepte de 60% à 90% de la radiation solaire, empêchant l'augmentation de température du sol en journée. Par ailleurs, les arbres empêchent l'émission du rayonnement terrestre vers la voûte

céleste pendant la nuit, limitant ainsi la chute de température nocturne. Ça explique les valeurs d'écart de température qui sont moins importants dans les régions boisées que dans les zones urbaines (voir Figure 13 et 14).

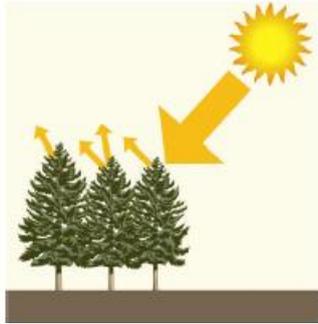


Figure 13: interception de radiation solaire par le feuillage (Reiter. S, 2007)



Figure 14: émission du rayonnement solaire dans les zones boisées et dégagées (Reiter. S, 2007)

(Gomez et al. 2001) montre dans son étude sur l'amélioration, particulièrement en été, des conditions climatiques et du confort au sein des espaces vert (pelouses, buissons, rues avec alignement d'arbres, etc.), qu'il faut 10ha d'espace vert pour perdre 1°C, 50ha pour 2°C et 200ha pour 3°C.

Selon (Bernatzky, 1982), les arbres et les espaces verts contribuent de façon importante à l'amélioration du climat des villes. Ils diminuent considérablement la température à travers l'évaporation et peuvent permettre une ventilation de la ville surchauffée, sale et polluée et offrir ainsi un air frais. Les arbres des avenues jusqu'à 70% et sans leurs feuilles (en hiver), les plantes peuvent conserver jusqu'à 60% de leur efficacité. Les parcs peuvent filtrer jusqu'à 80% de la pollution de l'air. Et il montre aussi que pour une forêt de hêtres 83,8% de l'énergie reçue sert à l'évaporation, dans une ville, 60% de cette énergie sert à réchauffer l'air.

L'étude de (Louafi & Abdou , 2012) menée sur deux espaces à l'université de Constantine, Algérie ; le premier est l'esplanade de l'Université de Constantine, qui est caractérisée par une vaste étendue du béton totalement dépourvue de tout type de végétation, le deuxième est un espace végétalisé destiné à la création des étudiants, cette étude montre que la présence de la végétation modifie les rayonnements solaires dans l'espace extérieur, la température et l'humidité relative et favorise le jeu de lumière pour un confort visuel efficace.

Linacre cité par (Merrouche, 2011) met un tableau dans le quel il cerne l'effet de l'arbre urbain selon l'échelle de mise en œuvre dans la ville (voir tableau 3).

Tableau 3: effets des arbres urbains selon l'échelle de mise en œuvre dans la ville dépassant le million d'habitants (Merrouche, 2011).

échelle unité	Forme Construite	Situation arbre	Phénomènes climatique concerné	Haut (m)	Large (m)	Long. (m)
Bâtiments	Jardin Sillage	Arbre isolé	aéraulique ombre	10	10	10
canyons	Rue	Arbres d'alignement sur avenue/ mail	Tourbillon, ombre, température	10	30	300
Quartier	Ilot urbain Usine	Parc urbain bois	Brise locale		500	500
Zone urbaine	Centre ville Résidentiel/ Industriel	Ceinture verte Foret suburbaine	Quantité de l'air topo-climat		5000	5000
Ville	Totalité Aire construite	Foret urbaine	Modification chaleur humidité, brise urbaine Dôme pollution précipitations		25000	25000

6-1-Effet de refroidissement de l'air et atténuation de température

L'urbanisation a considérablement transformé les surfaces naturelles en structures urbaines imperméables, qui modifient les matériaux, l'énergie, le rayonnement et la composition de la structure atmosphérique dans la couche proche de la surface (Oke, 2002 ; Forman. R. T, 2014). Au cours de l'urbanisation, la modification des surfaces, les modifications des matériaux de surface des bâtiments et l'émission de chaleur anthropique ont provoqué l'effet d'îlot de chaleur urbain, qui a pour conséquence que la température dans les zones urbaines est supérieure à celle des zones rurales environnantes (Akbari & Kolokotsa, 2016). De plus, le changement climatique est de plus en plus reconnu comme un facteur important aggravant l'effet d'îlot de chaleur urbain (Coumou. & Robinson, 2013). L'effet d'îlot de chaleur urbain a eu de nombreux effets négatifs, tels que la dégradation de la qualité de l'air, la consommation accrue d'énergie et d'eau, et la dégradation de la santé et du bien-être des citoyens (Akbari & Kolokotsa, 2016 ; Yu et al, 2017).

L'espace vert urbain est de plus en plus reconnue comme une option prometteuse pour atténuer les effets indésirables d'îlot de chaleur urbain en réduisant la capacité de stockage thermique et en créant des surfaces plus réfléchissantes (albédo élevé) qui réduisent la quantité de rayonnement solaire absorbé (Sun & Chen, 2017). Pendant ce temps, la transpiration des espaces verts urbains et l'ombrage du couvert forestier peuvent refroidir l'environnement en bloquant directement le rayonnement solaire et en empêchant le chauffage de la surface du sol et de l'air (Hoag, 2015 ; Zhou, W et al, 2017) (voir figure 15). De nombreuses études ont montré que l'effet de refroidissement des espaces verts urbains dépend de la taille de ceux-ci. En règle générale, bien que, la taille des espaces verts urbains est

positivement corrélée à l'intensité du refroidissement et la relation tend à être non linéaire, (Zhou et al, 2017 ; Gaffin, 2012)

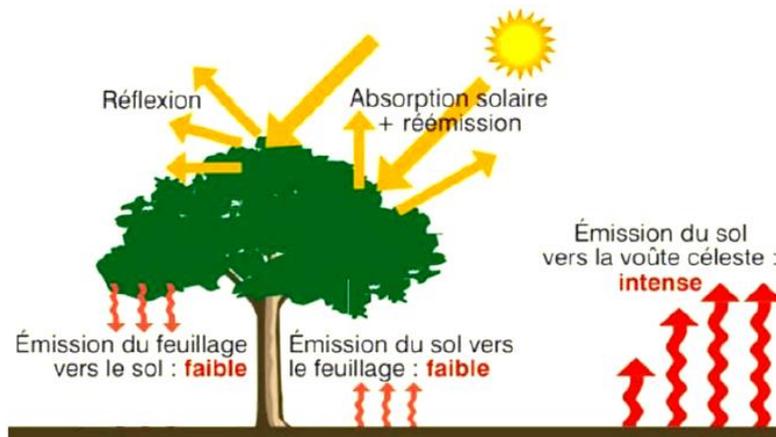


Figure 15 : effet de la végétation sur la température de l'air et de surface de sol (Reiter, 2007)

En outre, des études ont prédit et souligné que les conditions climatiques de fond et la relation pluie-chaleur pourraient influencer sur l'effet de refroidissement de l'espace vert urbain, qu'il convient d'examiner de plus près (Zhao, 2014 ; Spronken-Smith & Oke, 1998). Les résultats de recherche de (Jansson et al, 2007) ont identifié une intensité de refroidissement des espaces verts dans les climats continentaux allant de 0,5° C à 2,0° C, tandis que (Rchid, 2012) a constaté qu'il pouvait atteindre environ 4,5°C dans les climats chauds du désert. (Oliveira et al, 2011) ont également supposé que le faible effet de refroidissement des espaces verts était très probablement associé à des taux d'humidité élevés et à une évapotranspiration réduite. Cependant, l'un des problèmes et défis est que la plupart des études connexes dans ce domaine sont basées sur une ville spécifique. Les études de cas spécifiques ne fournissent pas une compréhension plus large des effets du refroidissement de l'espace vert urbain dans le contexte d'un monde en mutation climatique. Par conséquent, (Yu et al, 2017) ont suggéré qu'il était crucial de traiter une étude basée sur une zone climatique afin de mieux comprendre les effets du refroidissement de l'échelle de la ville à l'échelle mondiale.

6-2-Effet de l'ombrage

Un autre effet de la végétation dans le milieu urbain est l'effet d'ombrage, cet effet limite l'apport d'énergie radiative sur le piéton, et sur les surfaces du sol et de bâtiments. Cette baisse de rayonnement incident dépend notamment de la densité de feuillage de l'arbre, de la taille des feuilles et de la géométrie de la couronne (le type de l'arbre); elle peut entraîner une baisse significative de la température de surface de sol et des bâtiments, et donc de consommation de l'énergie et du transfert de la chaleur à l'atmosphère, ce qui tend à diminuer

l'lot de chaleur urbain. Les arbres à feuilles caduques ont l'avantage de laisser passer le rayonnement en hiver tout en offrant de l'ombrage en été (Brunet. Y, 2016).

L'arbre urbain peut constituer un écran grâce à son feuillage, on peut distinguer 3 écrans comme suite :

- ✓ Les arbres conifères considérés comme un écran opaque.
- ✓ les arbres à feuilles caduques considérés comme un écran qui sera transparent par la chute de ces feuilles;
- ✓ un écran transparent (certains arbres fruitiers ou certaines espèces de pins).

Selon (Louafi Bellara, 2013) l'ombre produit par les arbres peut réduire l'apport de chaleur dans les bâtiments en réduisant les températures de surface de leur environnement. Et atténuer également l'effet d'éblouissement et de réverbération en bloquant la lumière diffuse réfléchie du ciel et des surfaces environnantes.

L'effet de l'ombre des arbres se diffère selon le type d'implantation comme suite :

6-2-1-Effet d'ombrage d'un arbre isolé

L'arbre isolé est un arbre qui se détache dans le paysage urbain en jouant plusieurs fonction tel que : l'ornementation d'un carrefour ou d'une place publique, un lieu de rencontre, un repère pour les usagers de l'espace...etc. La forme, la taille, l'espèce et la qualité du feuillage sont les principaux paramètres à prendre en compte lors du choix de l'arbre parce qu'ils peuvent influencer son effet d'ombrage voire son importance dans le milieu urbain (Gillig et al, 2008). L'implantation de l'arbre par rapport au cheminement aussi influe l'ambiance et l'usage de l'espace. (Figure 16)

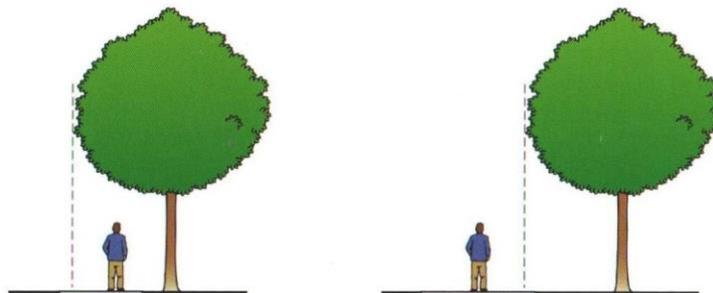


Figure 16: influence de l'implantation de l'arbre isolé sur le cheminement et l'usage de l'espace (Gillig et al, 2008).

6-2-2-L'arbre d'alignement

C'est un ensemble d'arbre planté à distance régulière en déterminant un axe de circulation tel qu'une route, une rue, une allé ...etc. (Gillig et al, 2008). Un ensemble d'arbres d'alignement peut avoir un effet significatif sur le microclimat à une échelle plus grande. Cet ensemble d'arbre engendre un effet d'humidification de l'air ainsi qu'un effet de refroidissements de

l'air de l'ordre de 2 à 3 °C par une belle journée d'été. L'effet d'ombrage peut avoir d'autres conséquences indirectes tel que la limitation de l'émission de COV (composés organiques volatils, voir plus loin), occasionnée par l'évaporation du carburant des véhicules (Figure 17).

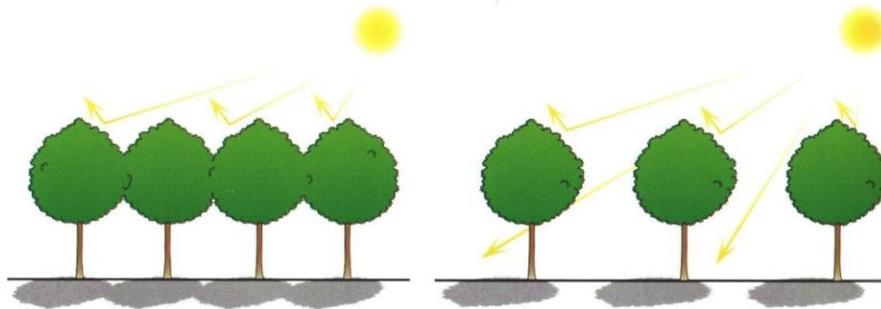


Figure 17: influence de type d'implantation sur la perception de l'espace et son ambiance (Gillig et al, 2008).

Selon Vinet (2000), lors de l'intégration des arbres dans l'espace urbain, il est important de prendre en considération les dimensions des arbres car ils sont des paramètres importants qui influencent l'ombre générée ainsi que l'occupation de l'espace (Figure 19). (COOMBES, 1993) a proposé une représentation de neuf arbres parmi les plus communs en indiquant les hauteurs maximales du tronc et l'arbre en entier à taille adulte ainsi que son profil en été et en hiver (Figure 18).

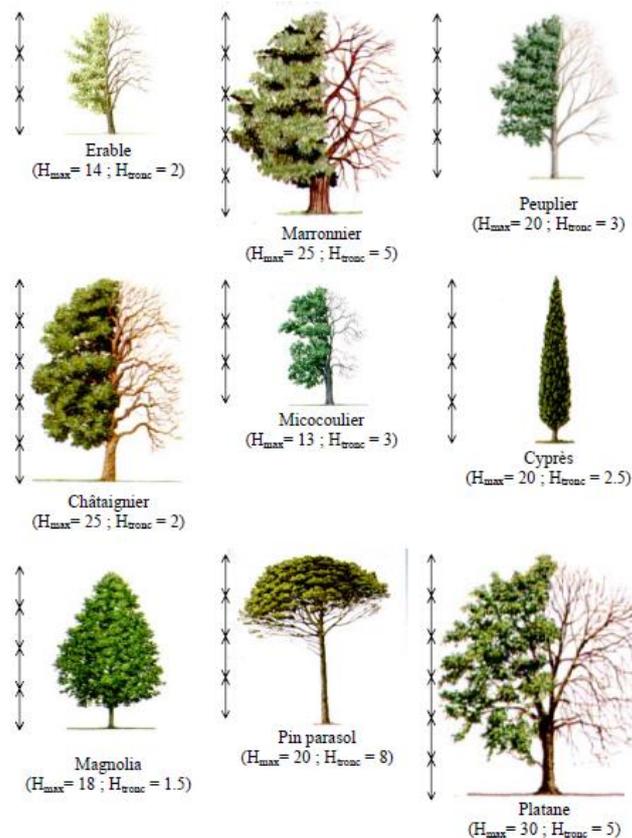


Figure 18 : dimensions de neuf arbres les plus communs (COOMBES A. J. 1993).

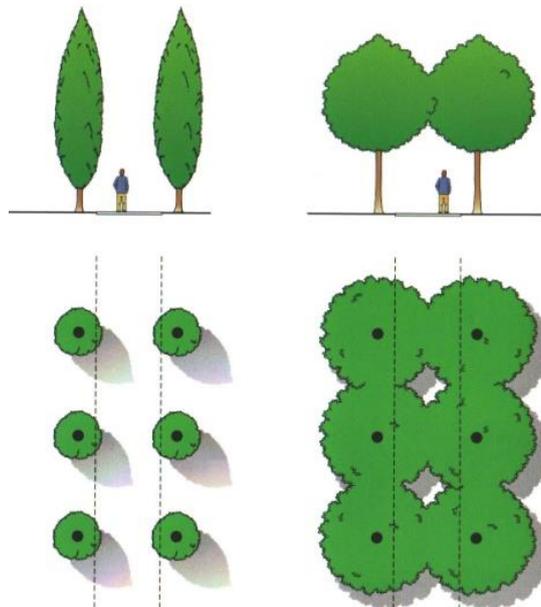


Figure 19: impact de l'espèce sélectionnée sur les ambiances créées

6-3- Effet de la pelouse

Selon (Brunet, 2016), les résultats de plusieurs études qui sont menés sur la pelouse ont montré que même avec plus de 75 % de surface de sol engazonnées, la température minimale ne diminuerait que d'environ 0,5°C, tandis que la température maximale diminuerait de 1 à 2°C. Les baisses obtenues par l'engazonnement des surfaces disponibles sont modérées; la pelouse ne produit pas d'ombrage, il agit essentiellement sur le flux d'évaporation, (Ballout, 2010). L'effet thermique de la pelouse sera lisible lors de son exposition au rayonnement solaire, elle s'échauffe moins en la comparant à une surface minérale, selon (Ballout, 2010), à l'ombre il existe une légère différence entre la température de la pelouse et celle d'une surface minérale (1°C), tandis qu'au soleil, cette différence peut aller jusqu'à 11°C.

Une étude de (Oke, 1979) sur le bilan d'énergie d'une pelouse de surface d'environ 160m² en zone suburbaine de Vancouver (Canada) durant la période estivale (août 1978). Le site d'expérience était un site varié entouré par des arbres conifères de 15 à 20m d'hauteur à l'est, des haies de 1,50 m de haut à l'ouest, La pelouse était constituée d'un gazon ras qui avait été arrosé avant l'expérience. Cette expérience montre bien un régime d'évapotranspiration supérieure à la normale, ce qui peut donc s'expliquer par l'advection de chaleur sensible des surfaces voisines c.-à-d. l'advection d'air plus chaud et plus sec venant de la direction des vents permet d'augmenter les taux d'évapotranspiration et de créer un effet oasis. Les résultats de cette étude ont été confirmés par (Manin, 2007), pour lui les surfaces végétalisées et les toits verts constituent de bons refroidisseurs si ils sont suffisamment irrigués, car ils permettent de refroidir les nuits urbaines à travers son effet d'oasis, mais lorsqu'ils sont secs

deviennent de véritables pièges à énergie solaire et redistribuent davantage de chaleur à l'air ambiant que la même surface en béton (Manin, 2007).

6-4-Les toitures et les façades vertes

Ces dernières années plusieurs études ont été menées sur ce sujet, pour bien déterminer l'effet de la végétation couvrante sur les façades et les toitures, les résultats montrent que l'impact des façades végétales sur la température de l'air est faible, sauf si tous les murs sont couverts de végétation. Ainsi leur impact sur le confort du piéton est très faible. (Brunet, 2016).

Ils sont aussi un bon isolant avec un feuillage dense qui améliore la consommation énergétique, aussi bien en hiver pour le chauffage qu'en été pour la climatisation ;

-L'énergie radiative absorbée par la toiture végétale est moins importante tandis que l'énergie réfléchie et transmis au milieu environnant est plus faible ;

-La toiture végétale a une évapotranspiration très importante (Brunet, 2016).

La façade verte, Le « mur vert » ou « mur végétalisé » ou encore le « jardin vertical » sont des termes utilisés pour décrire toute forme de végétalisation verticale. Les façades végétales utilisent des plantes grimpantes ; dont les plantes sont enracinées au sol mais parfois elles sont cultivées dans des bacs placés en bas ou en haut du mur (Djedjig, 2013). La façade végétale améliore le confort visuel du piéton, et elle induit une charge radiative plus faible sur le piéton car la végétation s'échauffant beaucoup moins qu'un mur nue exposé au soleil.

6-5-Modification des échanges radiatifs

La végétation est un moyen efficace pour limiter l'îlot de chaleur urbain et créer un confort thermique dans les espaces extérieurs en été. La végétation modifie les échanges radiatifs et thermiques du climat urbain à travers 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, même si la stabilité nocturne la limite quelque peu ;
- La transpiration des plantes, qui concerne tous les types de végétaux mais qui se produit le jour ; Ces deux processus combinés sont à l'origine d'un effet qualifié d'oasis, par opposition à l'îlot de chaleur. Les facteurs climatiques qui contrôlent le taux de transpiration sont l'ensoleillement, la température, l'humidité de l'air, la force du vent mais aussi la disponibilité en eau du sol (voir figure 20 a).
- La volumétrie de la végétation (la hauteur et la densité foliaire)

- Les arbres interceptent une partie du rayonnement solaire incident en journée, en créant des effets d'ombrage sur les surfaces artificielles environnantes qui limitent leur réchauffement (voir figure 20 b)

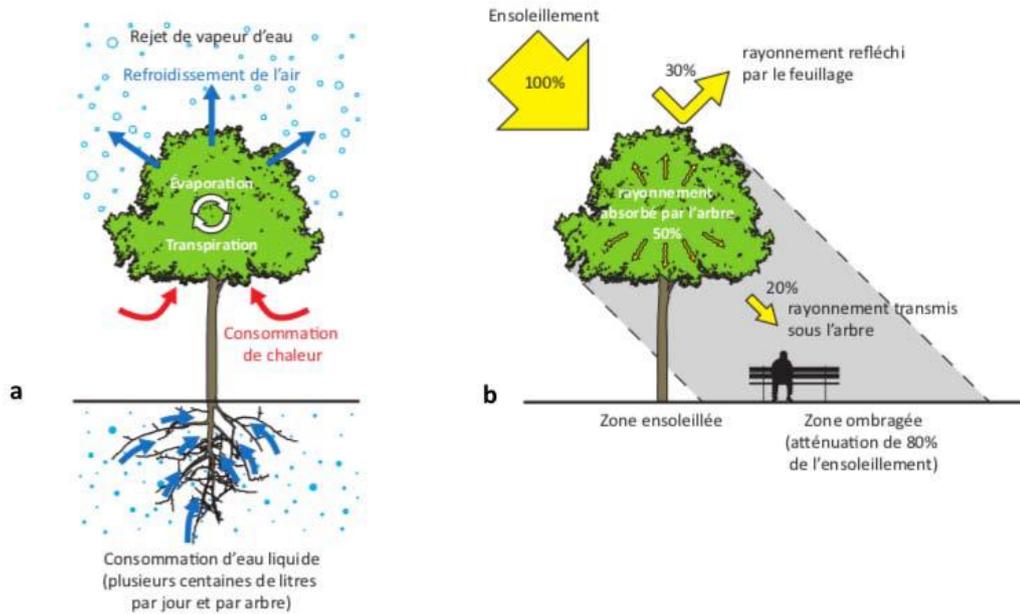


Figure 20: Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat (APUR, 2007)

-L'absorption des radiations provenant du soleil et des surfaces environnantes permet aux arbres de réduire l'écart entre les températures diurnes et nocturnes, avec la végétation les journées seront moins chaudes et les nuits plus fraîches.

6-6-Effet sur les vents

Selon (Louafi, 2013), les arbres apportent une rugosité au sol ce qui permet de diminuer la vitesse des vents, donc la vitesse de vent dans une forêt est inférieure par rapport à un terrain nu. L'utilisation de la morphologie de végétation est un bon moyen pour ralentir les vents dans les sites urbains exposés au vent violents (voir figure 21)

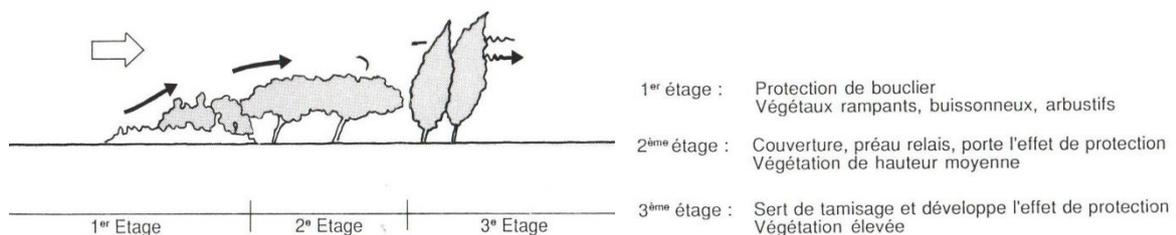


Figure 21: Utilisation de la morphologie de la végétation pour diminuer la vitesse de vent (Deschamps & Daydé, 1992)

Les brises de vent sont utilisées pour la création de microclimats, ils ont pour objet d'améliorer le confort d'un aménagement spécifique qui exige un abri en hiver et un ombrage

en été (comme les aires de jeu, les terrains de sport, les ensembles résidentiels ...etc.). Dans la conception d'un brise-vent, le rôle d'un talus ralentit considérablement la vitesse de vent et améliorer l'effet d'escalade du vent et de la neige. (voir figure 22)

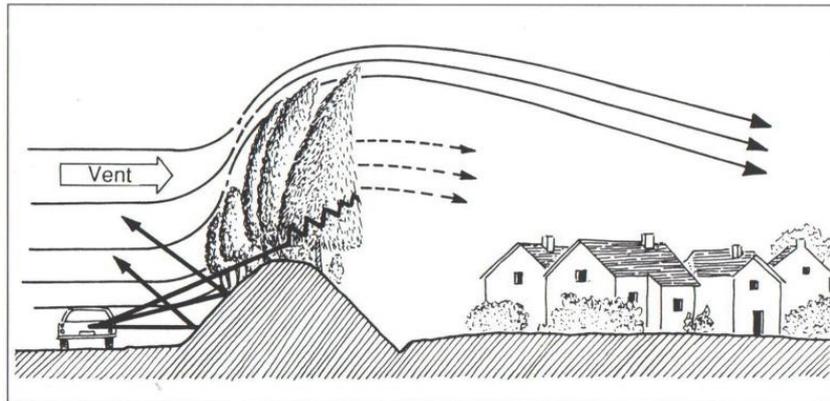


Figure 22 : utilisation de la végétation comme brise de vents (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992)

Selon (Deschamps & Daydé, 1992), la réduction de la vitesse de vent mesurée derrière une haie d'aubépine non feuillue de 2,5m de haut, avec une intensité de vent de 100% est de : 52% à 1m de haie, 59% à 4m de haie, 61% à 7m de haie, 63% à 10m de haie, 74% à 13m de haie, 80% à 16m de haie, 82% à 19m de haie et 91% à 22m de haie

6-7-atténuation de bruit

D'après (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992), un écran de pins noirs d'Autriche de 4.5m de haut précédée d'une bande de cotoneaster buissonneux peut créer un amortissement de 10 à 15dB (A) à 30m derrière les pins, la source étant située à 12m environ en avant des Cotoneasters (mesuré à hauteur d'homme).voir figure.

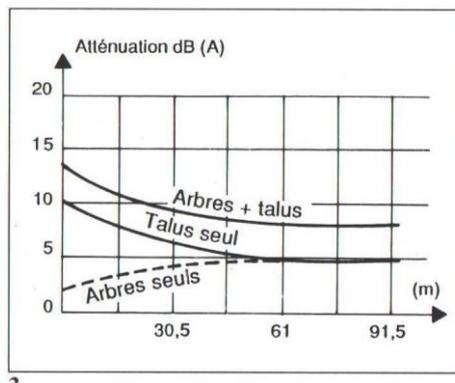


Figure 23: Comparaison de l'atténuation acoustique de trois écrans végétaux (Deschamps, C & Daydé, A ; 1992)

7-Caractéristiques de la végétation

7-1- L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (*ET*) est le phénomène combiné de perte en eau par évaporation directe et par transpiration (Guyot, 1999). Selon (Kurn et al., 1994), l'estimation de la réduction de la

température de l'air urbain due à l'évapotranspiration est importante. Il a été proposé d'utiliser les données publiées sur les taux d'évapotranspiration maximaux pour différents types de végétation, et le volume d'air avec lequel l'air refroidi est mélangé, par unité de temps. La contribution de l'évapotranspiration peut être déterminée à l'aide d'estimations de l'évapotranspiration de référence, ET_0 , qui correspond au taux d'évapotranspiration d'une culture de référence, en mm par jour, dans des conditions climatologiques spécifiques. L'évapotranspiration d'un type de végétation donné, ET_c , est déterminée en multipliant ET_0 par un coefficient de culture, K_c :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

-Un coefficient de culture de 0,7 a été utilisé, typique des arbres tels que l'olivier et les agrumes.

Selon (Jensen & Haise, 1963), ET_0 est calculé à partir d'une équation de régression, reliant l'évapotranspiration potentielle (ET_0) à la température moyenne de l'air (T_a) et au rayonnement solaire absorbé (R_s), c'est-à-dire en termes d'évaporation équivalente au rayonnement solaire, mm par jour:

$$ET_0 = (0.0232T_a - 0.078)R_s \quad (2)$$

Cette équation peut être réécrite en termes de rayonnement solaire incident (I) sous la forme $I(1-a)$, où a est l'albédo de l'herbe, supposé égal à 0,2:

$$ET_0 = 0.8 (0.0232T_a - 0.078) I \quad (3)$$

7-2-Albédo

L'albédo affecte l'accès au soleil et à la lumière du jour; il s'agit donc également d'un paramètre important pour les aspects thermiques de la végétation, car il affecte la quantité de rayonnement entrant sur le site qui est éliminé par évapotranspiration.

Les chiffres moyens pour l'albédo se situent autour de 0,20–0,23 pour la végétation. Cependant, il est utile d'identifier le « adaptation écologique » relatif de la végétation, où les espèces présentes dans les climats chauds-secs et à faible pluviométrie et forte demande en évaporation ont des albédos plus élevés, tendant à réduire leur charge thermique solaire.

Une valeur de 0,30 est donc utilisée, pour le contexte climatique d'Athènes, pour les arbres à feuilles caduques. Pour les plantes à feuilles persistantes, la valeur à utiliser est 0,23 (Stanhil et al, 1966).

7-3-La transmission

Ce paramètre fait référence à l'effet de la végétation sur les accès solaires et à la lumière du jour et varie en fonction de la saison, en particulier pour les arbres à feuilles caduques. Cela

est particulièrement important pour modéliser l'effet d'ombrage de la végétation sur les bâtiments et les espaces ouverts à proximité. Une valeur de 0,13 pour l'été et de 0,80 pour l'hiver pour les feuillus et de 0,13 pour les arbres à feuilles persistantes a été utilisée (voir figure24).

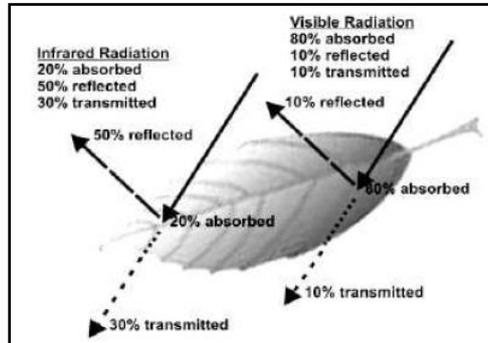


Figure 24: Absorption, transmission et réflexion de la radiation par feuillage (Shahidan et al., 2007)
Le tableau 4 montre quelques espèces d'arbres avec leur pourcentage du rayonnement global transmis (%) et rayonnement mesuré au dessous des arbres (W/m^2)

Tableau 4: espèce et transmission du rayonnement solaire (Gomez et al., 1998)

espèce	pourcentage du rayonnement global transmis (%)	rayonnement mesuré au dessous des arbres (W/m^2)
Acer negundo	15.2	88.6
Catpa Bignoinoides	1.5	85.8
Getis Australis	0.6	91.0
Ceratonia Silicua	0.8	83.6
Cercis Siliquastrum	2.2	90.1
Citrus Aurantium	4.5	87.0
Ficus Macrophila	0.3	93.8
Gledistsia Triacanthos	0.9	89.0
Ligustrum Japonicum	9.8	89.0
Melia Azedarach	12.6	89.1
Mioporum Pictum	0.7	91.4
Morus Alba	5.2	77.5
Nerium Oleander	0.8	91.6
Olea Europea	0.2	89.8
Phoenis Dactilifera	1.9	90.6
Pinus Alepensis	1.2	85.8
platanus Acerofilia	8.6	85.8
Populus Alba Bolleana	5.1	94.3
Robinia Pseudoacacia	7.7	86.0
Sophora Japonica	3.4	93.2

7-4-la perméabilité

Ce paramètre concerne la perméabilité de la végétation au vent. Comme nous ne modélisons que les conditions estivales, une moyenne de 0,40, extraite de la littérature, a été utilisée.

8-Comment réaliser une plantation

Tout projet de réalisation d'une plantation nécessite une étude précise de l'ensemble des caractéristiques du site, pour définir un concept de plantation adapté et en adéquation avec les multiples contraintes du milieu urbain, selon (Gillig et al, 2008), les étapes à suivre pour réaliser une plantation sont comme suit :

8-1-L'analyse environnementale et paysagère : pour acquérir plus des informations dans ce volet cette analyse doit porter sur les points suivants :

8-1-1-les conditions du milieu : les choix des espèces de végétation les plus adéquate à planter dans un site dépend des conditions climatiques de sites puisqu'elles influent directement cette plantation,

Il s'agit de prendre en compte :

- La climatologie ;
- L'altitude ;
- La topographie ;
- L'exposition ;
- La présence éventuelle de vents dominants et embruns (Gillig et al, 2008).

8-1-2- le paysage et les ambiances : l'étude de ce point est pour objectif d'apprécier la qualité du milieu concerné, donc il est nécessaire de qualifier :

- Les composantes paysagères et les ambiances de milieu ;
- Le patrimoine arboré ;
- Les caractéristiques de l'utilisation de l'espace.

8-1-3-l'étude sociale : l'identification des aspirations des usagers est un point très important pour réussir tout projet urbain et notamment celui de réaliser une plantation, donc une étude sociale est importante pour bien définir ces aspirations, un sondage auprès des usagers, et la discussion avec eux sont des moyens qui permettent la prise en compte leurs demandes (Gillig et al, 2008).

8-2- l'étude de sol : cette étude est indispensable pour déterminer les modes d'implantation donc Il convient d'observer :

- Les paramètres physiques: profil du sol, structure et texture d'horizons, densité apparente, perméabilité latérale et de fond de fosse;
- Les paramètres chimiques: pH. Matières organiques, éléments fertilisants disponibles et de réserves;
- Les paramètres biologiques: activité de la faune du sol et présence de racines;

-Le régime hydrique du sol, les conditions de drainage et la profondeur de la nappe.

Il est indispensable aussi de connaître les contraintes du site tel que :

-Le caractère et les contraintes du site en fonction de sa situation: urbain ou périurbain, la proximité de façades vitrées...etc.

-Les éventuelles pollutions;

-Les exigences et les préventions en matière de circulation et les gabarits ;

-Les types de revêtements de surface en place ;

-L'espace aérien disponible, la présence éventuelle de ligne à haute tension...etc. ;

-Les volumes souterrains à disposition, en tenant compte des infrastructures et de la localisation des réseaux (eau gaz, électricité, téléphone, câble, eaux claires, eaux usées, etc) ;

-L'évolution prévisible du site. (Gillig et al, 2008).

-La norme Algérienne dans la loi n° 2007-06 du 13 mai 2007 relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts, fixe les normes de conception des espaces verts comme suite :

Art. 29. Pour toute conception d'espaces verts, le concepteur public ou privé est tenu dans une optique d'homogénéité et d'unité, de prendre en considération les facteurs suivants :

- ✓ le caractère du site ;
- ✓ les vues à conserver, à mettre en valeur ou celles à masquer ;
- ✓ les ressources de terrain ;
- ✓ les espèces et variétés végétales de la région concernée ;
- ✓ le patrimoine architectural de la zone ou de la région ;
- ✓ les servitudes et les contraintes liées à la mitoyenneté, au régime des eaux, au droit de passage, au bornage, aux alignements de voirie, nivellements, plantations, aux canalisations souterraines et aux installations électriques souterraines.

Art. 30. Les emplacements réservés aux espaces verts dans les zones urbaines doivent être pris en considération lors de l'élaboration ou de la révision des instruments d'urbanisme.

Le tableau suivant montre la relation entre la nature de site de plantation et la végétation

Tableau 5: relation site-végétation (Stefulesco, 1993)

dispositifs urbains	Type ou caractéristique	Végétation
	Anciennes (dans ensembles médiévaux)	Peu ou pas plantées, Arbres monumentaux
place	Classique	Dépourvues de végétation à l'origine puis plantées
	A ordonnancement végétal Places-jardins, squares	Plantation en trame régulière Ambiance de nature, lieux de dépaysement et de tranquillité
Rues	Voies de circulation d'une largeur inférieure à 20 m	Plantation latérale (espace privé). Végétation d'emprunt. Traitement des clôtures, haies
Ruelles, cours, sentes	Réseaux d'accès aux quartiers de faible densité	Végétation plus ou moins décidée, pergolas, plantes décoratives
Ceintures vertes	Promenades associées aux enceintes	Lignes d'arbres
Boulevards	Voies de circulation qui entourent partiellement la ville, le quartier	Plantation sur les trottoirs et les terrepleins
Déviations	Voies de contournement	Mise en valeur du paysage, des points de vue, des ronds-points
Allées	Espaces de cheminement linéaire	Lignes d'arbres
Cours	Espaces de forme rectangulaire, orientés vers un point de vue remarquable	Ordonnancement végétal et architecturé planté sur sa longueur de lignes d'arbres
Avenues	Rues conduisant à une ville ou à un lieu prestigieux	Plantation de 25 à 30 m de hauteur, symétrie longitudinale
Quais, rives,	Espaces à proximité de l'eau (rivière, fleuve, lac, océan)	Plantation d'alignement Arbres isolés ou bosquet
Esplanades	Compositions monumentales liées à un paysage exceptionnel	La végétation a un rôle d'accompagnement en cadrant la vue
jardin	Classiques Pittoresques	Plantation régulière, symétrique Rappel de la nature et de la campagne
Espaces verts	Formes d'occupations du sol qui s'accompagnent de présence végétale	Surfaces plantées, espaces libres, ambiances végétales isolées de la circulation et de la ville, terre-pleins engazonnés, aires de jeux

9-Les défis de la gestion des espaces verts urbains

9-1-Facteurs socio-économiques et démographiques

L'urbanisation élevée et le rythme de développement social et économique résultant de l'augmentation de la population dans les villes (sachant que 62% de la population mondiale vivra dans des zones urbaines vers l'an 2020), du manque d'infrastructures, du trafic encombré, de la dégradation de l'environnement et de la pénurie de logements (Masakazu, 2003).

La pollution de l'eau et de l'air est la principale menace pour la santé et la sécurité dans les villes. Surtout ceux qui sont pauvres et qui ne disposent pas de systèmes de ventilation

adéquats, la pollution de l'air est dangereuse pour les femmes et les enfants car ils sont régulièrement exposés et les maladies d'origine hydrique se rencontrent le plus souvent dans les groupes à faibles revenus en raison d'un manque d'assainissement, de drainage et de collecte des déchets solides services (Masakazu, 2003). La reconversion des terres agricoles et des forêts en zones urbaines et le développement des infrastructures dans les zones urbaines constituent un autre défi majeur en Asie. En conséquence, l'élimination généralisée de la végétation pour soutenir l'écosystème urbain, la surexploitation des eaux souterraines et une pression supplémentaire sur les zones avoisinantes peuvent être encore plus sensibles à l'environnement et même augmenter la fréquence d'inondations dans les zones urbaines (Masakazu, 2003).

Les villes couvrent 02% de l'espace terrestre mondial mais consomment 75% des ressources naturelles. Exposer les citoyens à la biodiversité locale peut également susciter un intérêt pour les questions environnementales, d'autant plus que la première rencontre des gens avec l'environnement a souvent lieu dans leur ville ou leur village plutôt que dans des endroits éloignés (Balram & Dragicevic, 2005). Le manque d'espaces verts établis et zonés est un facteur d'étalement urbain alors que les gens se déplacent vers la périphérie d'une ville pour se rapprocher du cadre rural qui a l'air d'un environnement plus sain. Pour répondre aux besoins socio-économiques, environnementaux et psychologiques des citoyens, il faudrait définir un critère basé sur les attitudes de l'utilisateur perçu pour créer des utilisations appropriées du sol et aménager des installations dans les espaces verts urbains des villes (Balram & Dragicevic, 2005)

Les autorités de planification ont été invitées à adopter une approche stratégique et à planifier de manière positive la création d'espaces verts. Cela visait à protéger efficacement les installations existantes, à résister aux nouvelles opportunités de développement susceptibles de réduire les activités de loisir, d'assurer l'accessibilité et de fournir des espaces verts et des installations de loisirs de bonne qualité (Laing, Miller, 2006).

9-2- Aspects quantitatifs des espaces verts urbains

Comprendre la relation entre la population urbaine et le nombre d'espaces verts est particulièrement important pour évaluer leur fonctionnalité et, bien sûr, pour planifier leur fourniture. Les termes couramment utilisés pour désigner la quantité d'espaces verts sont le ratio d'espaces verts, la couverture en espaces verts et la superficie en espaces verts par habitant (Xion-Jun, 2009). Il est très difficile de mesurer la quantité appropriée de terres nécessaires et l'attribution de terres et de calculer la distance par rapport à la zone

résidentielle, et en particulier de mettre en œuvre la mesure, visant à créer des espaces verts urbains offrant des services adéquats dans les pays très peuplés.

Une étude portant sur 26 villes de 15 pays européens considère quatre groupes des 26 villes en fonction de la taille de leur population, telles que Métropole, Grandes villes, Villes de taille moyenne et Petites villes (Tuzin & Leeuwen, 2002).

Pour comprendre la disponibilité des espaces verts urbains en Europe, l'étude effectue une analyse factorielle en prenant en compte les facteurs «d'utilisation mixte des sols» (zones résidentielles, zones industrielles, zones forestières et agricoles); «Environnement créé par l'homme» (comme les zones bâties et les espaces verts urbains); et de l'eau. Et l'étude montre que la métropole a un score élevé sur l'environnement créé par l'homme, qui comprend les zones bâties et l'espace vert. Considérant les quatre groupes de variables tels que les espaces verts urbains, les forêts, les zones agricoles et l'eau, une autre analyse factorielle montre les deux catégories de villes incluses dans l'étude «Zones vertes naturelles» (N) (telles que les zones forestières et agricoles). Et «zones vertes urbaines» (U) (comme les zones urbaines et les zones urbaines). Enfin, l'étude conclut que la métropole et les grandes villes ont un score élevé sur le facteur vert urbain. Du fait de l'ancienneté des villes, leur densité de population est élevée et les villes perdent des zones et des ressources naturelles. De plus, les villes de taille moyenne obtiennent un score relativement élevé sur le facteur vert naturel en raison de la disponibilité d'espaces verts naturels (Tuzin. B, Leeuwen. E, 2002).

Cependant, l'étude suggère d'investir davantage dans les espaces verts urbains des métropoles et moins d'investir dans les espaces verts urbains des villes de taille moyenne (Tuzin & Leeuwen, 2002). Mais il est important de préserver les espaces verts urbains ou verts naturels. Pour confirmer la conservation et améliorer la qualité des espaces verts urbains ou des espaces verts naturels, des mesures, un suivi, une planification, une gestion appropriés, basés sur une approche participative et intégrée, sont essentiels dans les villes des pays développés et, plus important encore, dans les villes. Dans les pays en développement. Alors que la plupart des villes, en particulier dans les pays en développement, continuent de croître en population, la diminution de l'espace urbain semble se poursuivre, aux dépens des zones bâties. Malgré la tendance, des études montrent que les gens sont prêts à payer le prix fort pour l'accroissement des espaces verts (Altunkasa. F & Uslu. C, 2004).

Le mouvement des parcs urbains a été créé dans le but d'accroître la qualité de vie en ville de l'ère de la révolution industrielle. Le mouvement a vu la création d'espaces verts massifs, en particulier de parcs urbains tels que le parc central de New York, le parc Bos d'Amsterdam, le parc municipal de Porto (Loures et al., 2007).

La distance ou le temps de marche depuis la maison semble être la condition préalable la plus importante pour l'utilisation des espaces verts (Herzele & Wiedeman, 2003). Les personnes proches d'un espace vert l'utilisent plus fréquemment. Des études ont montré que la localisation et la répartition des espaces verts dans la ville influençaient la participation des personnes. Une étude réalisée à Helsinki, en Finlande, a montré qu'une bonne quantité d'espaces verts et un accès facile (une courte distance) à un espace de loisirs augmentent le nombre de visites et que les personnes vivant à proximité (moins de 0,5 km) visitent les espaces verts plus fréquemment (> 4 fois par semaine) (Neuvonen, 2007). Une étude réalisée dans des villes suédoises a montré que dans l'ensemble, les personnes ayant un accès immédiat à des jardins ou à des jardins verdoyants sont également plus susceptibles de visiter des espaces verts publics. En effet, ceux qui possèdent leur propre jardin passent également plus de temps dans les espaces verts publics que ceux qui ne possèdent pas leur propre jardin (Grahn & Stigsdotter, 2003).

Les espaces verts publics doivent être au centre du quartier et ne pas dépasser cinq minutes à pied pour la plupart des résidents, des bâtiments publics ou des magasins (Etzioni, 1998). Par conséquent, l'accessibilité et la proximité sont des facteurs très importants à prendre en compte lors de la planification et de la conception d'un espace vert urbain. La distance à parcourir à pied ou à vélo doit être suffisamment courte et comporter un minimum d'obstacles le long du trajet. De ce fait, certains pays ont formulé des recommandations pour l'aménagement d'espaces verts accessibles. Par exemple, la Grande-Bretagne a des normes telles qu'un espace vert naturel accessible à moins de 300 mètres des maisons; réserves naturelles locales statutaires fournies à un niveau minimal de 1 hectare par millier d'habitants, au moins un site accessible de 20 hectares situé à moins de 2 kilomètres de la maison; un site accessible de 100 hectares dans un rayon de 5 kilomètres de la maison et un site accessible de 500 hectares à une distance de 10 kilomètres de la maison (Moughtin. C & Shirley. P, 2005).

9-3- Aspects qualitatifs des espaces verts urbains

L'évaluation des espaces verts récréatifs doit être centrée sur la diversité des qualités disponibles, sur un lieu suffisamment satisfaisant et intéressant pour inciter les gens à rester et à profiter de la présence (Herzele & Wiedeman, 2003). Une étude menée dans l'ouest du Colorado a montré que les personnes jouissent d'opportunités physiques et sociales variées dans les espaces verts. Les avantages que les gens souhaitent peuvent être directement liés à une activité de loisir particulière et à des caractéristiques physiques, sociales et de gestion. La plupart des gens ont invoqué le fait de s'éloigner des exigences de la vie quotidienne et de réduire le stress pour se rendre dans les espaces verts (Stein & Lee, 1995).

La planification des espaces verts urbains requiert l'opinion du concepteur et l'intégration de la vue des utilisateurs. Par exemple, une étude dans la ville de Madina a montré que le plus grand nombre d'utilisateurs (71%) souhaitait de l'herbe / du gazon et le plus grand nombre d'utilisateurs (84%) des plantes à feuilles persistantes dans leurs espaces verts (Irum et al., 2002). Cela indique qu'au cours du processus de planification et de gestion, il convient de prendre en compte la perception des utilisateurs. Si les stratégies de développement des espaces verts urbains ne parviennent pas à inclure la participation des parties prenantes, ce sera le reflet de la négligence des fonctions sociales et environnementales (Balram. S & Dragicevic. S, 2005). Une étude réalisée à Ankara, en Turquie, a montré que les utilisateurs d'espaces verts préféraient s'asseoir sur un banc, se promener et courir, un paysage agréable, des éléments visuels, la proximité de l'eau et une atmosphère paisible. Dans le but de créer un espace vert de qualité, les normes doivent être établies localement, pour tenir compte des activités et des changements futurs. La participation du public au processus de planification et de conception est très importante pour intégrer ses valeurs et son mode de vie dans le processus (Oguz. D, 2000).

-Conclusion

Le terme «végétation urbaine» décrit l'assemblage total de plantes (y compris les forêts urbaines) à l'intérieur et sur le périmètre des villes et des villages. Cela comprend une diversité de plantes dans un large éventail d'habitats. Ils sont établis et gérés pour diverses raisons et présentent une valeur économique, sociale, esthétique et écologique. La valeur écologique de la végétation urbaine se trouve dans sa contribution à la protection de la biodiversité et le maintien des processus écologiques et des systèmes de survie. Quant à la valeur sociale, la végétation urbaine contribue à la qualité de vie par son influence sur le bien-être psychologique et physiologique des individus. Des améliorations de la qualité de vie se manifestent également au niveau communautaire. Dans l'ensemble, la végétation est un élément important, sinon essentiel, de l'environnement urbain. Les espaces verts urbains sont nos alliées pour aider à promouvoir la santé et le bien-être des citoyens, apportant une contribution vitale non seulement à la qualité du cadre de vie, mais aussi à l'attractivité de nos villes

De nombreuses études ont été menées sur les bienfaits rafraîchissants des arbres et de la végétation dans les villes. Des réductions de la température de surface jusqu'à 20° C peuvent être possibles par temps chaud et ensoleillé. Bien que de nombreuses études se concentrent sur les avantages de l'évapotranspiration des arbres urbains, il est important de noter que les

arbres affectent également les régimes de vent dans les villes. Ainsi, en modifiant les régimes de vent, les arbres peuvent altérer l'efficacité des brises de refroidissement et peuvent jouer un rôle important dans les processus de dispersion ainsi que dans l'élimination des polluants par dépôt.

L'augmentation de la végétation et la réduction de la surface imperméable en milieu urbain, l'ajout ou l'expansion de toitures vertes et la mise en œuvre de chaussées perméables peut atténuer l'îlot de chaleur urbain et rend la ville plus confortable.

Chapitre n°3 :

L'apport de la télédétection dans
l'étude de la végétation

-Introduction :

La télédétection est actuellement une activité mondiale, familière et quotidienne qui a de nombreuses applications dans les domaines scientifiques, gouvernementaux, industriels et privés. Ces applications vont de la surveillance globale des ressources à de telles activités comme l'aménagement du territoire, le développement immobilier, l'intervention en cas de catastrophe naturelle et la planification de l'utilisation des terres. Une grande partie de la technologie actuelle de télédétection par satellite résulte directement ou indirectement du programme Landsat, lancé en 1967 (ancien nom du programme : Earth Resources Technology Satellite ERTS) avant d'être renommé. Le programme Landsat a été la première activité officielle de recherche et de développement dans le domaine civil, visant à utiliser des satellites pour surveiller les ressources terrestres à l'échelle mondiale. Le programme a été entrepris par la NASA en collaboration avec le département de l'Intérieur des États-Unis. Landsat-1 a été lancé en 1972 et le programme se poursuit jusqu'à aujourd'hui, en lançant récemment Landsat-8 en 2013.

La télédétection se révèle être un outil tout à fait approprié pour étudier le fonctionnement et suivre l'évolution de la végétation. Grâce aux satellites il est possible en effet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variées. Ils permettent en outre d'estimer le rayonnement solaire global, ainsi que certains paramètres caractéristiques des couverts végétaux, comme la quantité de biomasse, ou la fraction du rayonnement photosynthétique actif. Outils d'une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques qui gouvernent la dynamique des écosystèmes végétaux, les données de télédétection peuvent aussi être utilisées pour informer les politiques sur les conséquences d'éventuels changements de la répartition mondiale des couverts végétaux, de façon à mettre en place des solutions de gestion plus durables.

Le chapitre présent est consacré pour étudier ce concept d'actualité « la télédétection », l'objectif est de comprendre c'est quoi la télédétection, les différents types de satellites, la signature spectrale, l'apport de la télédétection dans l'étude de la couverture végétale, ainsi que la théorie de patrons du paysage (landscape patterns) dans l'écologie du paysage et les indices du paysage ainsi que son utilisation pour évaluer l'impact de l'espace vert sur le microclimat et la température de surface du sol.

I- La télédétection :

I-1-c'est quoi la télédétection ?

La télédétection est la science et l'art d'obtenir des informations sur un objet, ou phénomène par l'analyse de données acquises par un dispositif qui n'est pas un dispositif en contact avec l'objet, la zone ou le phénomène à l'étude (Lillesand *et al*, 2015). Donc elle est l'acquisition d'informations à distance en utilisant des capteurs installés à bord d'aéronefs ou de satellites pour détecter l'énergie électromagnétique diffusée ou émise par la surface de la Terre. Cette énergie est associée à une large gamme de longueurs d'onde, formant le spectre électromagnétique. La longueur d'onde est généralement mesurée en micromètres (1×10^{-6} m, μm). Des ensembles discrets de longueurs d'onde continues (appelées bandes d'ondes) ont reçu des noms tels que la bande micro-ondes, la bande infrarouge et la bande visible (Tso & Mather, 2009 ; Franklin, 2001).

L'énergie électromagnétique, produite par la vibration des particules chargées, voyage sous forme d'ondes à travers l'atmosphère et le vide spatial. Ces ondes ont des longueurs d'onde différentes (la distance de la crête d'onde à la crête d'onde) et des fréquences différentes ; une longueur d'onde plus courte signifie une fréquence plus élevée. Certaines, comme la radio, les micro-ondes et les ondes infrarouges, ont une fréquence plus longue, tandis que d'autres, comme les rayons ultraviolets, les rayons X et les rayons gamma, ont une fréquence beaucoup plus courte. La lumière visible se situe au milieu de cette plage de rayonnement des ondes longues à courtes. Cette petite portion d'énergie est tout ce que l'œil humain est capable de détecter. L'instrumentation est nécessaire pour détecter toutes les autres formes d'énergie électromagnétique. Les instruments de la NASA utilisent toute la gamme du spectre pour explorer et comprendre les processus qui se produisent ici sur Terre et sur d'autres corps planétaires (figure 1 et 2) (Tso & Mather, 2009 ; Franklin, 2001).

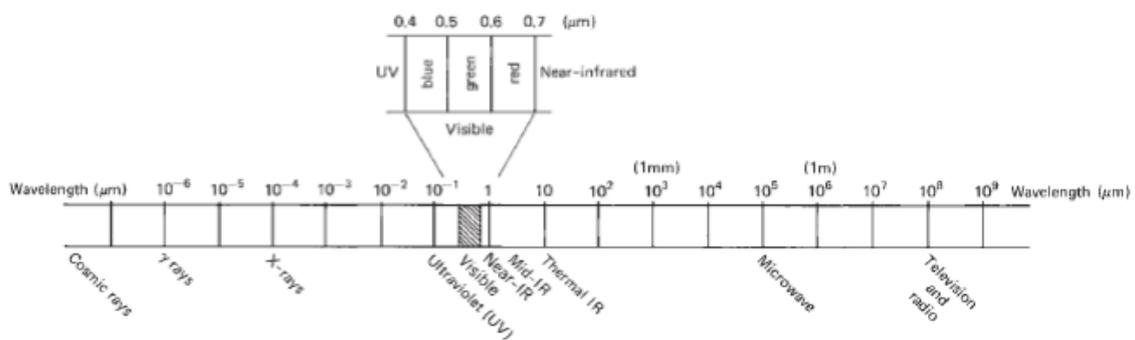


Figure 1: Diagramme du spectre électromagnétique (Lillesand *et al*, 2015)

Certaines ondes sont absorbées ou réfléchies par des éléments de l'atmosphère, comme la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, tandis que d'autres permettent un mouvement sans entrave dans l'atmosphère ; la lumière visible a des longueurs d'onde qui peuvent être transmises dans l'atmosphère. L'énergie hyperfréquence a des longueurs d'onde qui peuvent

traverser les nuages ; bon nombre de nos satellites météorologiques et de communication en profitent.

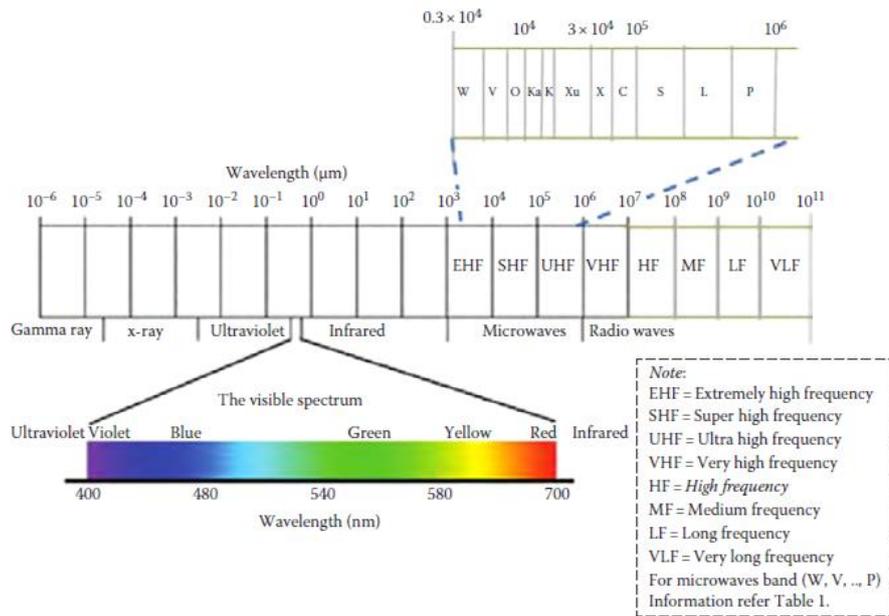


Figure 2 : une partie du spectre électromagnétique global. Il est évident que la bande d'onde visible (0,4 à 0,7 μm), qui est détectée par les yeux humains, n'occupe qu'une très petite partie du spectre électromagnétique (Thenkabail, 2016).

La figure 3 montre la collecte de données de télédétection pour une application utilisateur. Les capteurs embarqués sur les avions ou les plates-formes satellites collectent et enregistrent l'énergie réfléchiée par les entités cibles. Les données réfléchies sont collectées à travers le spectre électromagnétique et sont utilisées pour diverses études telles que l'agriculture et la foresterie.

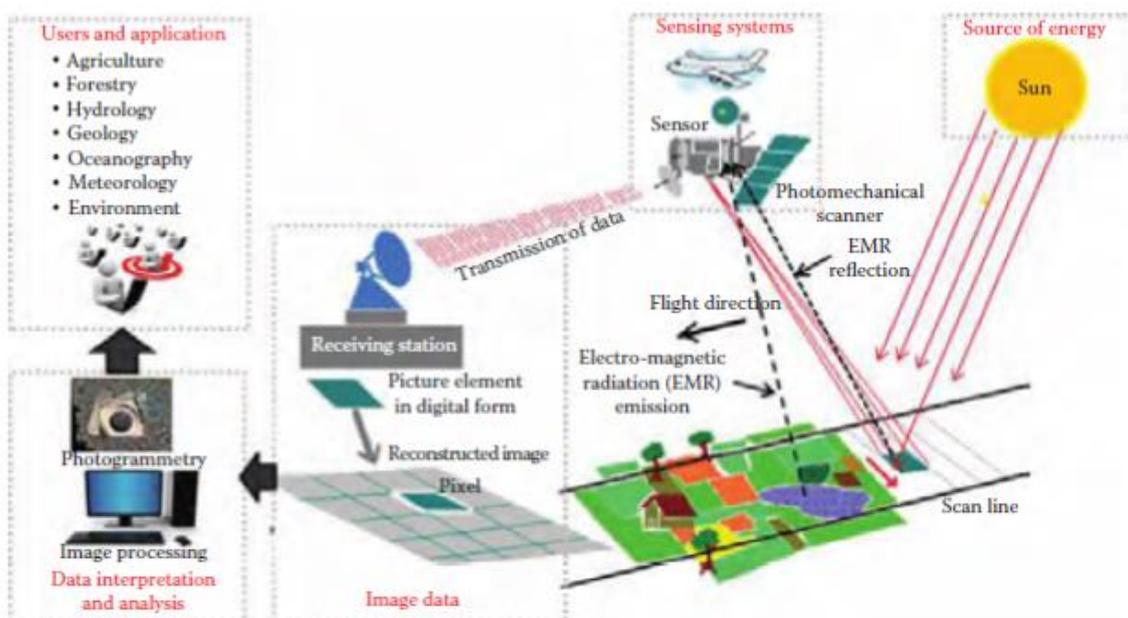


Figure 3 : principe de la télédétection (Thenkabail, 2016)

I-2- Principes du spectre électromagnétique en télédétection :

Le flux lumineux ou rayonnant sous forme d'énergie électromagnétique (EME), qui comprend la lumière visible, l'infrarouge, les ondes radio, la chaleur, les rayons ultraviolets (UV) et les rayons X, est la principale forme d'énergie utilisée en télédétection (Lillesand *et al.*, 2004). Le EMR est un vecteur de l'EME en transmettant l'oscillation du champ électromagnétique à travers l'espace ou la matière selon l'équation de Maxwell (Murai, 1993). EMR a les caractéristiques du mouvement des vagues et des particules. Les EMR suivent essentiellement la théorie des ondes de base ($c = v\lambda$), qui décrit que les EME se déplacent de façon harmonique ou sinusoïdale (Figure 4) à la vitesse de la lumière ($c = 2,998 \times 10^8 \text{ m / s}$); la distance d'un pic à l'autre est la longueur d'onde λ et le nombre de pics passant par un point fixe dans l'espace par unité de temps est la fréquence de la vague v (Lillesand *et al.*, 2004).

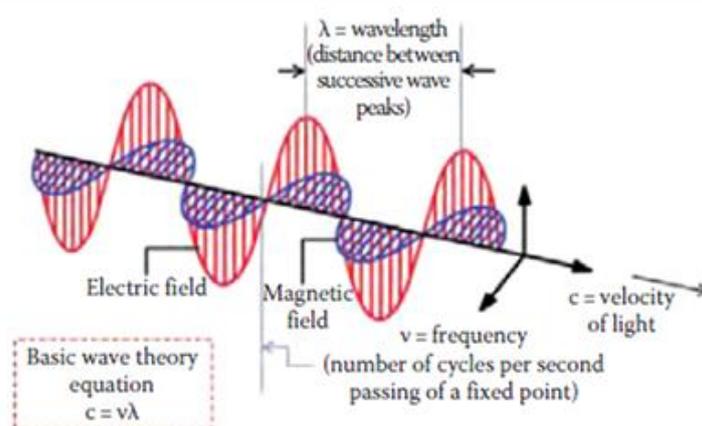


Figure 4 : Illustration d'une onde électromagnétique (Thenkabail, 2016).

I-3-La signature spectrale :

La principale source d'énergie observée par les satellites est le soleil. La quantité d'énergie solaire réfléchie dépend de la rugosité de la surface et de son albédo, c'est-à-dire de la façon dont une surface réfléchit la lumière au lieu de l'absorber. La neige, par exemple, a un albédo très élevé, reflétant jusqu'à 90% de l'énergie qu'elle reçoit du soleil, alors que l'océan n'en réfléchit que 6%, absorbant le reste. Souvent, lorsque l'énergie est absorbée, elle est réémise, généralement à de plus grandes longueurs d'onde. Par exemple, l'énergie absorbée par l'océan est réémise sous forme de rayonnement infrarouge (NASA, 2019 ; Thenkabail, 2016).

Tous les objets de la surface de la terre réfléchissent, absorbent ou transmettent de l'énergie, dont la quantité varie selon la longueur d'onde. Donc tous les objets et les surfaces sur Terre interagissent avec l'énergie électromagnétique de différentes manières, souvent distinctes, c'est ce qu'on appelle "signature" spectrale unique, qui lui est propre et qui permettra son

identification sur les images satellitaires. Une courbe de réponse spectrale spécifique, ou signature spectrale, peut être déterminée pour chaque type de matériau. De grandes classes, telles que la végétation, l'eau et le sol, d'une image peuvent souvent être distinguées en comparant leurs réponses sur des plages de longueurs d'onde distinctes et très larges. La signature spectrale, ou courbe de réponse spectrale, est liée à la résolution spectrale d'un capteur distant. Les chercheurs peuvent utiliser cette information pour identifier différentes caractéristiques de la Terre, ainsi que différents types de roches et de minéraux. Le nombre de bandes spectrales détectées par un instrument donné, sa résolution spectrale, détermine dans quelle mesure un chercheur peut différencier les matériaux (Figure 5) (Guangxing & Qihao, 2014).

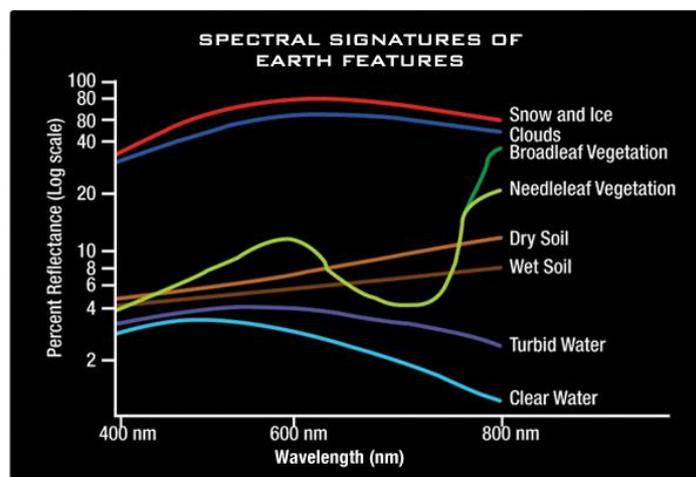


Figure 5: Signatures spectrales de différents éléments de la Terre dans le spectre de la lumière visible (<https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensing>)

I-4-Les capteurs :

La principale source d'énergie pour la télédétection provient du soleil. Des capteurs à distance enregistrent le rayonnement solaire réfléchi ou émis par la surface de la Terre. Les capteurs, ou instruments, à bord des satellites utilisent le soleil comme source d'éclairage ou fournissent leur propre source d'éclairage, mesurant l'énergie qui est réfléchi en retour. Les capteurs qui utilisent l'énergie naturelle du soleil sont appelés capteurs passifs ; ceux qui fournissent leur propre source d'énergie sont appelés capteurs actifs (NASA, 2019 ; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

Les capteurs passifs comprennent différents types de radiomètres (instruments qui mesurent quantitativement l'intensité du rayonnement électromagnétique dans certaines bandes) et de spectromètres (dispositifs conçus pour détecter, mesurer et analyser le contenu spectral du rayonnement électromagnétique réfléchi). La plupart des systèmes passifs utilisés par les applications de télédétection fonctionnent dans les parties visibles, infrarouge, infrarouge

thermique et micro-ondes du spectre électromagnétique. Ces capteurs mesurent la température à la surface de la terre et de la mer, les propriétés de la végétation, les propriétés des nuages et des aérosols et d'autres propriétés physiques (NASA, 2019 ; Baas, 2013). Les exemples de capteurs passifs incluent les appareils photographiques, les capteurs électro-optiques, les capteurs infrarouges thermiques et les capteurs d'antenne. Étant donné que les capteurs passifs utilisent une énergie naturelle, ils ne peuvent capturer des données que pendant la journée. Les capteurs thermiques infrarouges, qui peuvent détecter l'énergie émise naturellement jour et nuit, font exception, à condition que la quantité d'énergie soit suffisamment importante pour être enregistrée (Guangxing & Qihao, 2014 ; Baas, 2013)

Les capteurs actifs utilisent l'énergie provenant du capteur. Ils fournissent leur propre énergie qui est dirigée vers la cible à étudier. L'énergie renvoyée / réfléchiée par cette cible est ensuite détectée et enregistrée par les capteurs. Ils comprennent différents types de capteurs de détection et de télémétrie (radar qui transmet un signal hyperfréquence vers la cible, détecte et mesure la partie rétrodiffusée du signal), d'altimètres et de diffusiomètres. Le LiDAR est un exemple, il émet une impulsion laser et mesure précisément son temps de retour pour calculer la hauteur de chaque cible. La majorité des capteurs actifs fonctionnent dans la bande des micro-ondes du spectre électromagnétique, ce qui leur permet de pénétrer dans l'atmosphère et visualiser la surface dans la plupart des conditions et à toute heure du jour et de la nuit et en toute saison. Ces types de capteurs sont utiles pour mesurer les profils verticaux des aérosols, la structure des forêts, les précipitations et les vents, la topographie de la surface de la mer et la glace, entre autres (Figure 6). (Guangxing & Qihao, 2014 ; Baas, 2013 ; Thenkabail, 2016) .

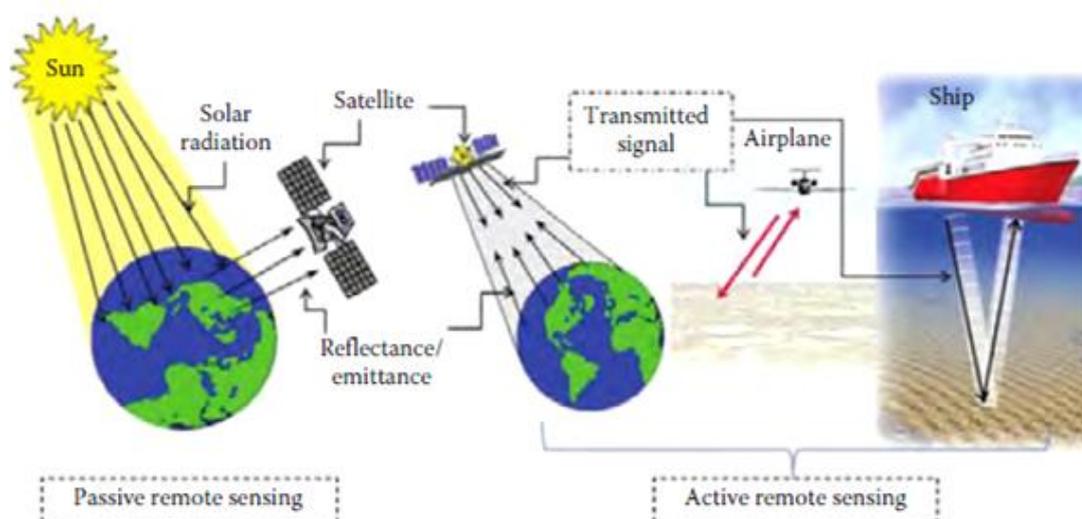


Figure 6: capteurs passif et actifs (Thenkabail, 2016)

I-4-1-Capteurs électro-optiques :

Les capteurs électro-optiques sont des détecteurs qui enregistrent le rayonnement incident au niveau du capteur sous forme de signal électronique. Le signal varie dans le temps, l'espace, la longueur d'onde et l'amplitude en fonction de la sensibilité du capteur, qui est généralement appelée résolution.

Les caractéristiques du capteur peuvent modifier considérablement le signal et, en fin de compte, déterminer le niveau de généralisation et la nature de l'information représentée dans l'image. En outre, la connaissance des caractéristiques des capteurs est nécessaire pour l'interprétation et l'analyse, étant donné l'influence des capteurs sur la variabilité spectrale (Guangxing & Qihao, 2014; Baas, 2013 ; Thenkabail, 2016).

I-4-2-Capteurs infrarouges thermiques:

Les scanners infrarouges thermiques sont un type spécial de capteur électro-optique. Les scanners thermiques détectent et mesurent la partie infrarouge thermique du rayonnement électromagnétique, au lieu des rayonnements infrarouges visibles, proches et réfléchis. Comme l'absorption atmosphérique est très forte dans certaines parties du spectre électromagnétique en raison de l'existence de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, la détection thermique IR est limitée à deux régions spécifiques de 3 à 5 μm et 8 à 14 μm , appelées fenêtres atmosphériques (Guangxing & Qihao, 2014; Baas, 2013 ; Thenkabail, 2016). La résolution spatiale des canaux IR thermiques est généralement plus grossière que celle des bandes IR visibles et réfléchies. Par exemple, le capteur Landsat TM a une résolution spatiale de 120 m dans sa bande IR thermique et de 30 m dans ses bandes visible à mi-IR. L'avantage de l'imagerie thermique est que les images peuvent être acquises de jour comme de nuit, à condition que le rayonnement thermique soit émis en continu par le terrain (Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

I-4-3-Capteurs radar passifs à micro-ondes et à imagerie :

Le rayonnement électromagnétique dans la zone de longueur d'onde hyperfréquence (1 cm à 1 m de longueur d'onde) a été largement utilisé pour la télédétection de la surface terrestre, de l'atmosphère et des océans de la Terre. En comparaison avec les spectres infrarouges visible, réfléchi et thermique, les micro-ondes ont une plus grande longueur d'onde. Cette propriété permet aux micro-ondes de pénétrer à travers la couverture nuageuse, la brume, la poussière, etc. dans l'atmosphère, sans être affectées par la diffusion atmosphérique, qui affecte les longueurs d'onde optiques plus courtes. La détection de l'énergie par micro-ondes dans presque toutes les conditions météorologiques et environnementales est particulièrement

importante pour les zones tropicales, où de larges nuages couvrent fréquemment toute l'année (Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

Les capteurs à hyperfréquences passifs fonctionnent de la même manière que ceux utilisés pour l'imagerie infrarouge thermique. Les capteurs sont généralement des radiomètres, qui nécessitent de grandes antennes collectrices, fixes ou mobiles. Les capteurs hyperfréquences passifs détectent et mesurent l'énergie hyperfréquence naturellement émise dans leur champ de vision, avec une longueur d'onde comprise entre 0,15 et 30 Cm. L'énergie émise est principalement contrôlée par les propriétés de température et d'humidité de l'objet ou de la surface émettrice (Guangxing & Qihao, 2014).

I-5-Caractéristiques des données télédétectées :

Quels que soient les systèmes de télédétection passifs ou actifs, tous les systèmes détectent et enregistrent des «signaux» d'énergie provenant des caractéristiques de la surface de la Terre et / ou de l'atmosphère. Les données collectées par ces systèmes de télédétection peuvent être soit au format analogique, par exemple, des photographies aériennes ou des données vidéo sur papier, soit au format numérique, par exemple une matrice de «valeurs de luminosité» correspondant à la radiance moyenne mesurée dans un pixel d'image. Le succès de la collecte de données à partir d'images de télédétection nécessite la compréhension de quatre caractéristiques de résolution fondamentales, à savoir la résolution spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle (Jensen 2005 ; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

I-5-1-Photographies :

Les photographies aériennes sont rendues possibles grâce au processus photographique utilisant des réactions chimiques à la surface d'un film photosensible pour détecter et enregistrer les variations d'énergie. Les photographies aériennes enregistrent normalement sur la plage de longueurs d'onde de 0,3 à 0,9 μm , c'est-à-dire du spectre UV au spectre visible et proche de l'infrarouge. La gamme de longueurs d'onde à détecter par une caméra est déterminée par les sensibilités spectrales du film. Parfois, les filtres sont utilisés dans une caméra en conjonction avec différents types de films pour limiter les longueurs d'ondes enregistrées ou pour atténuer les effets de la diffusion atmosphérique. Les caméras de cartographie utilisées pour obtenir des photographies aériennes sont généralement montées dans le nez ou le ventre d'un avion. Les photographies aériennes peuvent également être prises à partir de navettes spatiales, de véhicules d'aviation sans pilote, de ballons ou même de cerfs-volants. Une caméra de cartographie qui enregistre des données photographiques nécessite que le film soit ramené au sol pour traitement et impression (Jensen 2005 ; Guangxing W & Qihao W, 2014).

I-5-2-Les images satellites :

L'imagerie satellitaire peut être considérée comme une extension de la photographie aérienne, la télédétection par satellite reposant sur les mêmes principes physiques pour acquérir, interpréter et extraire le contenu des informations. Les images satellite sont prises à une altitude plus élevée, ce qui permet de couvrir simultanément une plus grande surface de la Terre. Plus important encore, les images satellite sont acquises par des scanners électroniques et des matrices linéaires / linéaires. Les capteurs satellites peuvent généralement détecter et enregistrer une gamme beaucoup plus large de rayonnements électromagnétiques, des rayonnements UV aux micro-ondes (Jensen 2005 ; Guangxing W & Qihao W, 2014).

L'énergie électromagnétique est enregistrée électroniquement sous la forme d'un tableau de nombres au format numérique, produisant des images numériques. Dans une image numérique, des éléments d'image individuels, appelés pixels, sont disposés dans un tableau 2D en colonnes et en lignes. Chaque pixel a une valeur d'intensité et une adresse de localisation dans la matrice 2D, représentant l'énergie électromagnétique reçue à l'emplacement particulier à la surface de la Terre. La valeur de l'intensité peut avoir différentes gammes, en fonction de la sensibilité d'un capteur aux changements de la magnitude de l'énergie électromagnétique (Jensen 2005 ; Guangxing & Qihao, 2014).

Plus souvent, les capteurs satellites sont conçus pour enregistrer l'énergie électromagnétique sur plusieurs canaux simultanément. Chaque canal enregistre une plage de longueurs d'onde étroite, parfois appelée bande. L'image numérique de chaque canal peut être affichée sous forme d'image noir et blanc dans l'ordinateur. Vous pouvez également combiner et afficher trois bandes d'une image numérique sous forme d'image couleur en utilisant les trois couleurs primaires (bleu, vert et rouge) de l'ordinateur. Dans ce cas, les données numériques de chaque bande sont représentées sous l'une des couleurs primaires en fonction de la luminosité relative de chaque pixel de ce canal. Ces trois couleurs primaires se combinent dans des proportions différentes pour produire une variété de couleurs, comme dans l'ordinateur (Jensen, 2005).

I-5-3-La résolution spatiale :

La résolution spatiale définit le niveau de détail spatial décrit dans une image. Elle est souvent définie comme la taille de la plus petite caractéristique possible pouvant être détectée à partir d'une image. Cette définition n'implique que seuls les objets plus grands que la résolution spatiale d'un capteur peut être sélectionnée à partir d'une image. Cependant, une caractéristique plus petite peut parfois être détectable si sa réflexion domine au sein d'une cellule de résolution particulière ou si sa forme est unique (des caractéristiques linéaires). Une

autre signification de la résolution spatiale est qu'une caractéristique au sol doit pouvoir être distinguée en tant qu'entité séparée dans l'image. La résolution spatiale dépend de l'altitude du capteur, de la taille du détecteur, de la taille de la focale et de la configuration du système (Jensen 2005; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

La résolution spatiale détermine le niveau de détails spatiaux pouvant être observés à la surface de la terre. Les images à résolution spatiale grossière ne peuvent détecter que les grandes entités, alors que dans le cas des images à résolution fine, les petites entités deviennent visibles. Pour un projet de télédétection, la résolution spatiale de l'image n'est toutefois pas le seul facteur à prendre en compte. La relation entre l'échelle géographique d'une zone d'étude et la résolution spatiale de l'image de télédétection doit être étudiée (Quattrochi & Goodchild, 1997).

D'une manière générale, à l'échelle locale, les images à haute résolution spatiale, telles que les données IKONOS et QuickBird, sont plus efficaces. À l'échelle régionale, les données de résolution spatiale moyenne, telles que les données Landsat TM / ETM + et Terra ASTER, sont les plus fréquemment utilisées. À l'échelle continentale ou mondiale, les données à résolution spatiale grossière, telles que les données AVHRR et MODIS, conviennent mieux. Une résolution plus élevée implique la nécessité d'un stockage de données plus important et d'un coût plus élevé, et peut créer des difficultés pour le traitement des images dans une zone d'étude étendue. Depuis la fin des années 90, l'un des objectifs des capteurs satellitaires était d'améliorer la résolution spatiale, qui est maintenant inférieure à 1 m. Les images satellitaires sous-métriques ont introduit un nouveau problème de confidentialité pour les résidents et ont donné lieu à des poursuites judiciaires (Jensen 2005; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

I-5-4-La résolution spectrale :

La résolution spectrale du capteur est également un facteur important, car les capteurs présentent des bandes spectrales qui mesurent l'énergie dans différentes régions du spectre. En théorie, différentes régions du spectre peuvent être utilisées pour obtenir des informations différentes, car les interactions matière / énergie peuvent être fondamentalement différentes. Par conséquent, il est avantageux d'échantillonner les régions visibles du spectre (0,4 à 0,7 μm), du proche infrarouge (0,7 à 1,3 μm), de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) (1,3 à 3,0 μm) et thermique (3,0 à 100 μm). La quantité totale d'énergie mesurée dans chaque bande spectrale doit être moyennée sur une largeur de bande spectrale, et chaque détecteur possède

une fonction de réponse spectrale (SRF) qui caractérise la pondération en longueur d'onde (Baas, 2013 ; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

Chaque capteur distant est unique en ce qui concerne la ou les parties du spectre électromagnétique qu'il détecte et enregistre. De plus, chaque capteur distant enregistre un nombre différent de segments du spectre électromagnétique, ou bandes, qui peuvent également avoir des largeurs de bande différentes. La résolution spectrale d'un capteur, par définition, fait référence au nombre et à la taille des bandes qu'il est capable d'enregistrer (Jensen 2005). Par exemple, AVHRR, à bord de la plate-forme de satellites environnementaux en orbite polaire de la NOAA, collecte quatre ou cinq bandes spectrales larges (selon l'instrument choisi) en visible (0,58–0,68 μm , rouge), proche IR (0,725–1,1 μm), milieu Tranches IR (3,55–3,93 μm) et infrarouges thermiques (10,3–11,3 μm et 11,5–12,5 μm) du spectre électromagnétique. AVHRR, qui permet d'acquérir des données d'image à une résolution spatiale de 1,1 km, a été largement utilisé pour les études météorologiques, et l'analyse de profils de végétation et la modélisation globale. Le capteur Landsat TM recueille sept bandes spectrales. Sa résolution spectrale est supérieure à celle des instruments anciens embarqués à bord du Landsats, tels que MSS et Return Beam Vidicon (Jensen, 2005 ; Baas, 2013 ; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

En pratique, la sélection des capteurs est un aspect important de la télédétection, car les caractéristiques de résolution déterminent l'applicabilité de la résolution de problèmes. Par exemple, certains capteurs panchromatiques peuvent avoir une résolution spatiale plus élevée, bien que les données ne soient pas utiles pour les applications biophysiques, étant donné le SRF. D'autres capteurs fournissent des informations spectrales plus détaillées avec une généralisation moins spectrale. Enfin, la spectroscopie d'imagerie dépend d'une réponse spectrale très fine, telle qu'il existe un grand nombre de bandes spectrales et des largeurs de bande spectrales étroites (Jensen, 2005 ; Baas, 2013 ; Guangxing & Qihao, 2014). Une avancée majeure de la technologie des capteurs à distance au cours des dernières années a été une amélioration significative de la résolution spectrale, passant d'une largeur de bande de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de nanomètres (1 μm = 1 000 nm) à 10 nm ou moins, en ce qui concerne le Landsat TM. Les capteurs hyperspectraux (spectromètres imageurs) sont le type d'instruments qui acquièrent des images dans de nombreuses bandes spectrales très étroites et contiguës dans les parties visible, proche IR, IR moyen et infrarouge thermique. Alors que le Landsat TM n'obtient qu'un seul point de données correspondant à la réponse intégrée sur une bande spectrale de 0,24 μm de large, un capteur hyperspectral, par exemple, est capable d'obtenir 24 points de données sur cette plage en utilisant des bandes de l'ordre de

0,01 μm de large. Le spectromètre imageur infrarouge visible / infrarouge de la NASA (AVIRIS) recueille 224 bandes contiguës avec des longueurs d'onde comprises entre 400nm et 2500 nm. Un système à large bande ne peut distinguer que les différences générales entre types de matériaux, alors qu'un capteur hyperspectral offre la possibilité d'identifier avec précision les matériaux et de mieux estimer leur abondance (Jensen, 2005 ; Baas, 2013 ; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

I-5-5-La résolution radiométrique :

La résolution radiométrique fait référence à la sensibilité d'un capteur à la radiance entrante, c'est-à-dire à l'ampleur de la modification de la radiance sur le capteur avant qu'un changement de la valeur de luminosité enregistrée ne se produise (Jensen, 2005). Par conséquent, la résolution radiométrique décrit la capacité d'un capteur à discriminer les différences subtiles dans l'énergie détectée. Une résolution radiométrique grossière permettrait d'enregistrer une scène en utilisant seulement quelques niveaux de luminosité, c'est-à-dire avec un contraste très élevé, alors qu'une résolution radiométrique fine enregistrerait la même scène en utilisant plusieurs niveaux de luminosité. La résolution radiométrique en imagerie numérique est comparable au nombre de tons en photographie aérienne (Harrison & Jupp, 2000 ; Thenkabail, 2016). Pour les deux types d'images de télédétection, la résolution radiométrique est liée au contraste dans une image.

La résolution radiométrique est souvent représentée par les niveaux de quantification utilisés pour numériser la valeur d'intensité continue de l'énergie électromagnétique enregistrée. Les nombres numériques dans une image ont une plage allant de 0 à une puissance sélectionnée de 2 moins 1. Cette plage correspond au nombre de bits (chiffres binaires) utilisés pour coder les nombres dans des ordinateurs. Par exemple, Landsat-1 MSS enregistre initialement l'énergie rayonnante sur six bits (valeurs comprises entre 0 et 63, c'est-à-dire que les niveaux de quantification = $64 = 2^6$), puis a été étendu à sept bits (valeurs comprises entre 0 et 127, égal à 2^7). En revanche, les données Landsat TM sont enregistrées sur huit bits, c'est-à-dire que leurs niveaux de luminosité varient de 0 à 255 (soit 2^8). Les yeux humains ne pouvant percevoir que 20 à 30 niveaux de gris différents, les niveaux de résolution supplémentaires fournis par les images numériques ne sont pas discernables visuellement (Harrison & Jupp, 2000 ; Thenkabail, 2016). Des techniques de traitement d'images numériques utilisant des ordinateurs sont nécessaires pour tirer le meilleur parti de la résolution radiométrique disponible.

I-5-6-La résolution temporelle :

La résolution temporelle fait référence au temps nécessaire à un capteur pour revenir à un emplacement précédemment imagé, communément appelé cycle de répétition ou intervalle de temps entre les acquisitions de deux images successives. Pour la télédétection par satellite, le temps nécessaire à un satellite pour effectuer un cycle orbital complet définit sa résolution temporelle. Selon les types de satellites, la durée de la visite peut aller de la moitié à plus de 10 jours. Pour la télédétection aérienne, la résolution temporelle est moins pertinente car les utilisateurs peuvent programmer leurs vols eux-mêmes (Jensen, 2005; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

La résolution temporelle a une implication importante dans la détection des changements et la surveillance de l'environnement. De nombreux phénomènes environnementaux changent constamment dans le temps, tels que la végétation, les conditions météorologiques, les incendies de forêt et les volcans. Ces changements se reflètent dans les caractéristiques spectrales de la surface de la Terre et sont enregistrés dans des images de télédétection. Les différences temporelles entre les images obtenues par télédétection ne sont pas seulement causées par les modifications des propriétés spectrales des caractéristiques / objets de la surface de la Terre, mais peuvent également résulter des différences atmosphériques et des modifications de la position du soleil au cours de la journée et de l'année (Jensen, 2005; Guangxing & Qihao, 2014 ; Thenkabail, 2016).

II- L'étude de la végétation par le biais de la télédétection

Les données de télédétection sont des sources primaires d'analyse des processus environnementaux à l'échelle locale ou globale. Ces données sont utilisées pour découvrir la détection de changement au cours des dernières décennies. Les données de télédétection (telles que les données Landsat, les données Sentinel, les images Spot, etc.) sont très utiles pour la visualisation, la classification et l'analyse de zones. Ces données peuvent être classées en fonction de leur résolution, du spectre électromagnétique, de la source d'énergie, du support d'imagerie et du nombre de bandes. Plus la résolution des données satellitaires est élevée, plus le degré de précision atteint lors de la classification.

II-1-Caractéristiques spectrales de la végétation :

Lors de l'étude de la végétation par le biais de la télédétection, Le spectre de réflexion résultant est très caractéristique et peut être identifié comme la signature spectrale de la végétation, les variations de réflexion mesurées par les capteurs satellites sont liées aux propriétés optiques des feuilles, ainsi que la structure des formations végétales. Lorsque la

végétation est mal recouverte, le signal spectral de la végétation est mélangé à celui du sol ou d'autres fonds. Les interactions du rayonnement entre la végétation et le sol sont si complexes qu'il est très difficile de corriger l'influence perturbatrice du sol. Le signal mesuré par le capteur intègre généralement les réflexions du sol et de la végétation (Figure 7)

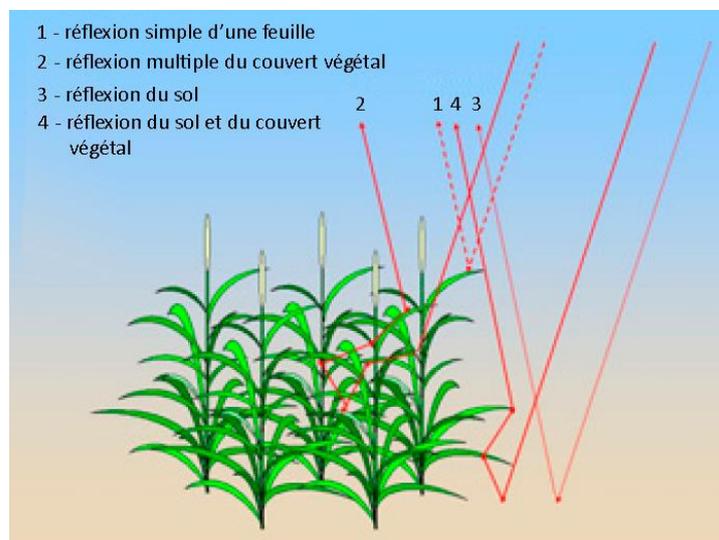


Figure 7: interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire (<https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvcd/envcal/html/vegetation/caracteristique-vegetation/structure.html>)

II-1-1-Caractéristiques de la canopée végétale :

Une canopée végétale peut absorber au maximum 90 à 94% des rayonnements photosynthétiquement actifs incidents (PAR). L'énergie absorbée est dépensée en transpiration, le reste étant assimilé à la chaleur sensible. Une petite fraction, généralement inférieure à 5%, est convertie de manière photochimique par les pigments de la feuille se transforme en énergie stockée sous forme de composés organiques par le biais du processus de photosynthèse. Il existe de nombreuses preuves expérimentales montrant que le taux de croissance de plusieurs espèces de plantes augmente de façon linéaire avec les quantités croissantes de PAR absorbé lorsque l'eau et les nutriments du sol ne sont pas limitants (Montelth, 1972). Il semble donc possible que le taux de photosynthèse d'une canopée végétale soit lié au rayonnement réfléchi (Sellers, 1985, 1987; Asrar et al, 1989a).

La répartition de l'énergie absorbée par la canopée végétale en chaleur sensible et latente est un facteur important dans toutes les études du bilan énergétique de surface et du climat (Mintz, 1984, Sellers et al, 1986). Les stomates d'une feuille sont responsables de la reprise du CO₂ pour la photosynthèse et de la perte d'eau par la transpiration. Les mécanismes régulateurs stomatiques ont peut-être évolué au fil du temps pour optimiser le gain de carbone pour une perte d'eau donnée (Cowan et Farquhar, 1977). La masse de l'air ambiant à l'intérieur d'une feuille et inversement détermine dans une large mesure les taux de

photosynthèse et de transpiration. Par conséquent, les informations sur la conductivité stomatique sont précieuses dans les modèles de biosphère et d'écosystème.

A-L'indice de surface foliaire :

L'indice de la surface foliaire (en anglais : Leaf area index LAI), défini comme la surface totale (unilatérale) de feuilles par unité de surface de sol (m^2/m^2 , c.-à-d. Sans dimension), c'est un bon indicateur de la croissance et de la biomasse végétale, ainsi que de la densité de végétation. Cet indice se varie en général de 0 pour le sol nu à 8 pour une forêt tempérée dense. Pour des forêts tropicales très fermées ou des forêts de conifères, sa valeur peut dépasser 15. Il est relié à l'indice de végétation par une fonction logarithmique et une corrélation positive. Pour des valeurs supérieures à 5, toute possibilité d'éclairement incident direct du sol sous-jacent est écarté, quelle que soit la géométrie d'éclairement (Slater, P.N. 1980).

B-L'indice de répartition angulaire des feuilles :

L'indice de répartition angulaire (en anglais : Leaf angle distribution LAD) correspond à l'inclinaison des feuilles. L'orientation des feuilles dépend la surface foliaire réceptrice et donc la quantité d'énergie directement reçue. Il peut être décrit comme la fonction de répartition des feuilles selon leur inclinaison. Il dépend bien sur du type de végétation, des contraintes du milieu (Fensholt, 2003).

II-1-2- Les propriétés optiques des feuilles :

Selon (Anselme & Gadai, 2008) les propriétés sont reliées aux caractéristiques biochimiques des feuilles. On distingue trois types d'éléments qui interviennent dans les propriétés optiques des feuilles et qui correspondent aux grands domaines spectraux du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. Ces trois éléments varient au cours du temps et entraînent par conséquent des changements dans la structure et les caractéristiques des couverts végétaux, ces éléments sont :

A- Les pigments foliaires :

Toutes les espèces végétales comprennent des pigments, on compte les pigments verts (chlorophylles) étant de loin les plus abondants, les pigments orangés (carotènes) et les pigments bleus rouges (anthocyanes). La chlorophylle possède deux bandes d'absorption dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (660 nm). La présence des pigments foliaires dans les végétaux est donc responsable de la forte absorption du rayonnement visible, avec un maximum relatif de réflexion autour du vert (550 nm) (Anselme & Gadai, 2008).

B- La structure cellulaire des feuilles :

La composition anatomique des feuilles de végétaux joue un rôle primordial dans la signature spectrale de la végétation. Si les pigments chlorophylliens absorbent la majeure partie du rayonnement visible qui leur parvient, ils sont en revanche totalement transparents au rayonnement de plus grande longueur d'onde. Le proche infrarouge traverse donc la feuille jusqu'à une couche cellulaire formée de cellules irrégulières et d'espaces intercellulaires dans lesquels sont stockés les gaz échangés entre la feuille et l'atmosphère, le parenchyme lacuneux ou mésophylle. C'est au niveau de cette couche, lieu d'échange entre l'oxygène et le dioxyde de carbone dans les processus de la photosynthèse et de la respiration, que le rayonnement proche infrarouge est fortement réfléchi. Il est d'autant mieux réfléchi que le parenchyme lacuneux est bien développé (Anselme & Gardal, 2008).

C- L'influence de la teneur en eau :

La signature spectrale de la végétation est fortement influencée par la teneur en eau, dans les longueurs d'onde de l'infrarouge moyen. Plus la teneur en eau est forte, plus la réflexion de la végétation diminue, en particulier aux longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm qui correspondent aux bandes d'absorption de l'eau. Ce domaine de longueur d'onde est très utile en télédétection des couverts végétaux, il permet notamment de détecter les plantes en état de stress hydrique (Anselme & Gadal, 2008).

II-2-Les indices de végétation :

Le concept d'indice de végétation (VI) est l'une des réussites durables de la télédétection terrestre. Les caractéristiques physiologiques et anatomiques de la végétation donnent lieu à des caractéristiques spectrales distinctives qui permettent de détecter sa présence dans tout environnement et avec les précautions appropriées, qui permettent de déduire les propriétés du couvert végétal à partir du spectre réfléchi. Une végétation saine absorbe la lumière visible (en particulier la lumière rouge) via la chlorophylle et d'autres pigments. Dans le proche infrarouge (NIR) où aucun absorbeur n'est actif, la lumière est fortement réfléchie par le feuillage car la juxtaposition de cellules, contenant essentiellement de l'eau, avec des espaces d'air entre elle, crée un milieu fortement diffusant (Gates et al. 1965; Gausman & Allen 1973). Les indices de végétation (VI) obtenus à partir de canopées basées sur la télédétection sont des algorithmes assez simples et efficaces pour les évaluations quantitatives et qualitatives du couvert végétal, de la vigueur et de la dynamique de la croissance, entre autres applications. Ces indices ont été largement utilisés dans les applications de télédétection utilisant différents plates-formes avec les dernières avancées.

Les informations de télédétection sur la croissance, la vigueur et la dynamique de la végétation terrestre peuvent fournir des informations extrêmement utiles pour des applications dans la surveillance de l'environnement, la conservation de la biodiversité, l'agriculture, la foresterie, les infrastructures vertes urbaines et d'autres domaines connexes. Plus précisément, ces types d'informations appliquées à l'agriculture fournissent non seulement une base objective (en fonction de la résolution) pour la gestion macro et microscopique de la production agricole, mais aussi, à de nombreuses reprises, les informations nécessaires pour l'estimation du rendement des cultures (Mulla, 2013). Cette information est principalement interprétée par les différences et les changements des feuilles vertes des plantes et les caractéristiques spectrales de la canopée. Le processus de validation le plus courant consiste à établir des corrélations directes ou indirectes entre les indices de végétation obtenues et les caractéristiques de la végétation d'intérêt mesurées in situ, telles que la couverture végétale, l'indice foliaire, la biomasse, la croissance et la vigueur. Des méthodes mieux établies sont utilisées pour évaluer les indices de végétation en utilisant des méthodes directes et géoréférencées en surveillant les plantes sentinelles afin de les comparer aux indices obtenues à partir des mêmes plantes à des fins d'étalonnage.

II-2-1- les indices simples :

Ces indices sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, et également les bandes du proche et du moyen infrarouge, on cite :

A-L'indice de végétation par quotient (Ratio Vegetation Index RVI)

(Jordan, 1969) a proposé l'un des premiers indices de végétation appelé l'indice de végétation par quotient (Ratio Végétation Index RVI), basé sur le principe selon lequel les feuilles absorbent relativement plus de rouge que de lumière infrarouge. Il est égal au rapport entre les bandes du PIR et du rouge RVI peut être exprimé mathématiquement par :

$$RVI = \frac{R}{NIR} \quad (1)$$

Sachant que:

-**R** est la réflexion de la bande rouge

-**NIR** est la réflexion dans la bande proche infrarouge.

Selon les caractéristiques spectrales de la végétation, les plantes touffues ont une faible réflexion sur la bande rouge et ont montré une forte corrélation avec l'indice foliaire, la matière sèche de la biomasse et le contenu en chlorophylle des feuilles. Cet indice est largement utilisé pour les estimations et le suivi de la biomasse verte, en particulier dans les

zones à forte densité de végétation, car cet indice est très sensible à la végétation et présente une bonne corrélation avec la biomasse végétale. Toutefois, lorsque la couverture végétale est rare (moins de 50%), RVI est sensible aux effets atmosphériques et leur représentation de la biomasse est faible.

B-L'indice différentiel de végétation (Difference Vegetation Index DVI) :

Parmi les indices les plus élémentaires et les plus anciens, Le DVI est très sensible aux changements de fond du sol; il peut être appliqué à la surveillance de l'environnement écologique de la végétation. Ainsi, DVI est également appelé Index de végétation environnemental (EVI). Il est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge (Richardson & Weigand, 1977), le DVI est calculé comme suite :

$$DVI = NIR - R \quad (2)$$

Sachant que:

-R est la réflexion dans la bande rouge

-NIR est la réflexion dans la bande proche infrarouge

C- L'indice de végétation par différence normalisé (Normalized Difference Vegetation Index NDVI)

L'un des indices les plus utilisés et mis en œuvre, calculé à partir d'informations multi-spectrales sous forme de rapport normalisé entre les bandes rouge et proche infrarouge, est L'indice de végétation par différence normalisé (NDVI), e NDVI sert directement à caractériser la croissance ou la vigueur du couvert; par conséquent, de nombreuses études l'ont comparé à l'indice de surface foliaire (LAI) (Sripada, 2005 ; Karnieli et al, 2010 ; Zhang, 2012). Il est calculé à partir de la lumière visible et proche infrarouge réfléchi par la végétation. La végétation saine absorbe la plus grande partie de la lumière visible qui la frappe et réfléchit une grande partie de la lumière proche infrarouge. Cependant, la végétation malsaine reflète plus de lumière visible et moins de lumière dans le proche infrarouge (Weier & Herring, 2000). Il est calculé à l'aide de cette formule :

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (3)$$

Le NDVI est très sensible aux facteurs de fond, tels que la luminosité et l'ombre des auvents de la végétation et la luminosité du fond du sol. Des recherches ont montré que lorsque la luminosité de l'arrière-plan est augmentée, le NDVI augmente également de manière systématique. Compte tenu de l'effet du fond du sol, le rayonnement augmente de manière

significative lorsque la couverture végétale est rare; inversement, le rayonnement NIR est réduit afin de rendre plus sensible la relation entre la végétation et le sol.

II-2-2-Les indices de végétation prenant en compte les effets atmosphériques:

Étant donné les limites du NDVI sous les effets atmosphériques, (Kaufman et Tanré, 1992) ont proposé l'Indice de Végétation Atmosphérique Résistant (Atmospherically Resistant Vegetation Index ARVI). Cet indice est basé sur la connaissance que l'atmosphère affecte considérablement R par rapport au NIR. Ainsi, Kaufman et Tanré ont modifié la valeur de rayonnement de R en faisant la différence entre le bleu (B) et le R . Par conséquent, l'ARVI peut effectivement réduire la dépendance de cet indice aux effets de l'atmosphère, ce qui peut être exprimé par:

$$ARVI = \frac{(NIR - RB)}{(NIR + RB)} \quad (4)$$

Sachant que: RB est la différence entre B et R , la réflectivité liée à la diffusion moléculaire et à l'absorption gazeuse pour les corrections de l'ozone, et représente les paramètres de climatisation. L'ARVI est couramment utilisé pour éliminer les effets des aérosols atmosphériques. Les aérosols et les effets de l'ozone dans l'atmosphère doivent encore être éliminés par le modèle de transport atmosphérique (Tanré *et al*, 1990).

II-2-3-Les indices de végétation prenant en compte les influences du sol:

Ces indices ont été proposés avec pour objectif de corriger ou tout au moins, réduire l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire. (Richardson et Wiegand, 1977) ont proposé à l'origine de distinguer la végétation du fond du sol en analysant la ligne de sol, ce qui peut être considéré comme une relation linéaire sur le plan 2D des valeurs de réflexion spectrale du sol entre le NIR et le R . Par conséquent, il peut être considéré comme une description complète d'un grand nombre d'informations spectrales du sol provenant de plusieurs environnements (Baret *et al*, 1993)

A-L'indice de végétation perpendiculaire (Perpendicular Vegetation Index PVI)

L'indice de végétation perpendiculaire est une simulation de l'indice de végétation verte en données 2D R , NIR. Dans le système de coordonnées NIR – R , la réponse spectrale du sol est présentée sous forme de barre oblique (ligne éclaircissant le sol). Ce dernier effet peut s'expliquer par le fait que le sol présente une réponse spectrale élevée dans les bandes NIR et R (Richardson & Weigand, 1977). La distance entre le point de réflectivité (NIR) et la ligne de sol a été définie comme étant le VI perpendiculaire, qui peut être exprimée comme suit:

$$PVI = \sqrt{(\rho_{soil} - \rho_{veg})^2_R + (\rho_{soil} - \rho_{veg})^2_{NIR}} \quad (5)$$

Sachant que:

$-\rho_{\text{soil}}$ est la réflexion du sol;

$-\rho_{\text{veg}}$ est la réflectivité de la végétation;

Le PVI caractérise la biomasse de la végétation dans l'arrière-plan du sol; plus la distance est grande, plus la biomasse est grande.

B- indice de végétation ajusté pour le sol (Soil Adjusted Vegetation Index SAVI)

Un des nombreux indices de végétation a été développé par (HUETE, 1988). Il visait à améliorer le NDVI, qui s'est révélé instable. Varier en fonction de la couleur du sol, de son humidité et de la saturation de la végétation à haute densité; HUETE a développé cet indice pour minimiser l'influence de la luminosité du sol sur les indices de végétation spectraux impliquant des longueurs d'onde rouge et proche infrarouge (NIR) en incorporant un facteur d'ajustement du sol L au dénominateur de l'équation NDVI.

$$\text{SAVI} = \frac{(\rho_{\text{Nir}} - \rho_{\text{red}})}{(\rho_{\text{Nir}} + \rho_{\text{red}} + L)} X (1 + L) \quad (6)$$

Donc ce modèle a été établi pour améliorer la sensibilité du NDVI au fond du sol, où L est l'indice de conditionnement du sol, ce qui améliore la sensibilité du NDVI au fond du sol. La plage de L va de 0 à 1. Dans les applications pratiques, les valeurs de L sont déterminées en fonction des conditions environnementales spécifiques. Lorsque le degré de couverture végétale est élevé, est proche de 1, ce qui montre que le fond du sol n'a pas d'effet sur l'extraction des informations sur la végétation. Ce type de conditions idéales est rarement trouvé dans les environnements naturels et ne peut s'appliquer que dans le cas d'une densité et d'une couverture importante (Kaufman et Tanré, 1992). La valeur de L est d'environ 0,5 dans les conditions environnementales les plus courantes. Lorsque L est proche de 0, la valeur de SAVI est égale à NDVI. Cependant, le facteur devrait varier inversement avec la quantité de végétation présente pour obtenir l'ajustement optimal à l'effet du sol.

C- L'indice modifié de végétation ajusté au sol (modified Soil Adjusted Vegetation Index MSAVI)

Ainsi, un SAVI modifié (MSAVI) remplace le facteur de l'équation SAVI par une fonction variable. De cette manière, MSAVI réduit l'influence du sol nu sur SAVI, dans ce cas le paramètre L n'est plus une constante, mais il est ajusté automatiquement aux conditions locales. L'expression de l'indice MSAVI est la même que celle de l'indice SAVI. La différence concerne le facteur L qui dépend à la fois de la droite des sols, du NDVI et de l'indice de végétation par différence pondérée (Weighted Difference Vegetation Index WDVI), cet indice peut être exprimé comme suit:

$$\text{MSAVI} = \frac{(\rho\text{Nir} - \text{pred})}{(\rho\text{Nir} + \text{pred} + L)} X (1 + L) \quad (7)$$

Avec :

$$L = 1 - 2a\text{NDVI} \times \text{WDVI} \quad (8)$$

Sachant que: **a** est la pente de la droite des sols

$$\text{WDVI} = \rho\text{Nir} - a\text{pred} \quad (9)$$

D- L'indice optimisé de végétation ajusté au sol (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index OSAVI)

(Baret et al, 1993) ont étudié la sensibilité de cinq indices de végétation (NDVI, SAVI, Indice de végétation transformée ajusté au sol TSAVI, Indice modifié de végétation ajusté au sol MSAVI et Indice de surveillance de l'environnement mondial (Global Environment Monitoring Index GEMI) au fond du sol. Ils ont simulé les performances des indices de végétation pour différentes textures de sol, niveaux d'humidité et rugosités en utilisant le modèle (Scattering from Arbitrarily Inclined Leaves SAIL). Ils ont déterminé une valeur optimale de SAIL = 0,16 afin de réduire les effets de l'arrière-plan du sol, puis ont proposé un indice de végétation optimisé ajusté au sol (OSAVI) qui peut être exprimé comme suit:

$$\text{OSAVI} = \frac{(\rho\text{Nir} - \text{pred})}{(\rho\text{Nir} + \text{pred} + X)} \quad (10)$$

Dont SAIL est égal à 0,16 et que OSAVI ne dépend pas de la ligne de sol et peut éliminer efficacement l'influence du fond du sol. Cependant, les applications de cet indice ne sont pas étendues; il est principalement utilisé pour le calcul de la biomasse aérienne, de la teneur en azote des feuilles et de la teneur en chlorophylle, entre autres (Baret et al, 1993).

II-2-4-Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère

Ce sont des indices qui corrigent les effets conjugués des sols et de l'atmosphère, ils sont le résultat de la combinant des indices précédemment présenté, notamment le SAVI et l'ARVI, parmi ces indices, on cite l'indice de végétation amélioré (Enhanced Vegetation Index EVI) qui introduit des informations spectrales supplémentaires, généralement dans le but de réduire la sensibilité atmosphérique. Il peut être exprimé comme suit (Huete et al., 1999) :

$$\text{EVI} = G \frac{(\rho\text{Nir} - \text{pred})}{(\rho\text{Nir} + C1.\text{pred} - C2.\text{bleu} + L)} \quad (11)$$

Sachant que:

- L (unité de réflexion, sans dimension) est le facteur de réglage de la luminosité de l'arrière-plan de la couverture issu de l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI) ;
- C1 (sans dimension) et C2 (sans dimension) sont les coefficients du terme de résistance aux aérosols adapté de l'Indice de végétation (Atmospherically Resistant ARVI) ;

-G (sans dimension) est le facteur de gain qui ajuste la plage dynamique de l'IVE à une valeur comparable à celle du NDVI.

II-2-5-Les indices prenant en compte la température de surface

Plusieurs études ont suggéré l'utilisation combinée de l'indice de végétation et de la température de surface des sols mesurée dans l'infrarouge thermique, pour estimer le taux d'humidité des sols, ainsi que l'état de stress hydrique des végétaux.

Parmi les techniques développées, la méthode dite 'du triangle', suppose que la température de surface des sols dépend essentiellement de la couverture végétale et de l'humidité des sols (Figure 8). Le côté du triangle correspondant au NDVI le plus faible représente la droite des sols nus, depuis les sols secs (températures les plus élevées) jusqu'aux sols saturés en eau (températures les plus basses).

Le sommet en bas à droite du triangle correspond à la densité maximum de végétation. La droite reliant les températures de surface les plus élevées (sols secs) au maximum de densité de la végétation est appelée 'limite sèche'.

Celle reliant les températures de surface les plus basses (sols humides) au maximum de densité de la végétation est appelée 'limite humide'.

Dans cette méthode, la température de surface des sols est reliée à l'indice de végétation par une relation linéaire décroissante. Plus la végétation a une densité importante, plus la température de surface est faible. La végétation régule la température de surface en absorbant l'énergie rayonnante et en la réémettant sous forme de chaleur latente via le processus d'évapotranspiration.

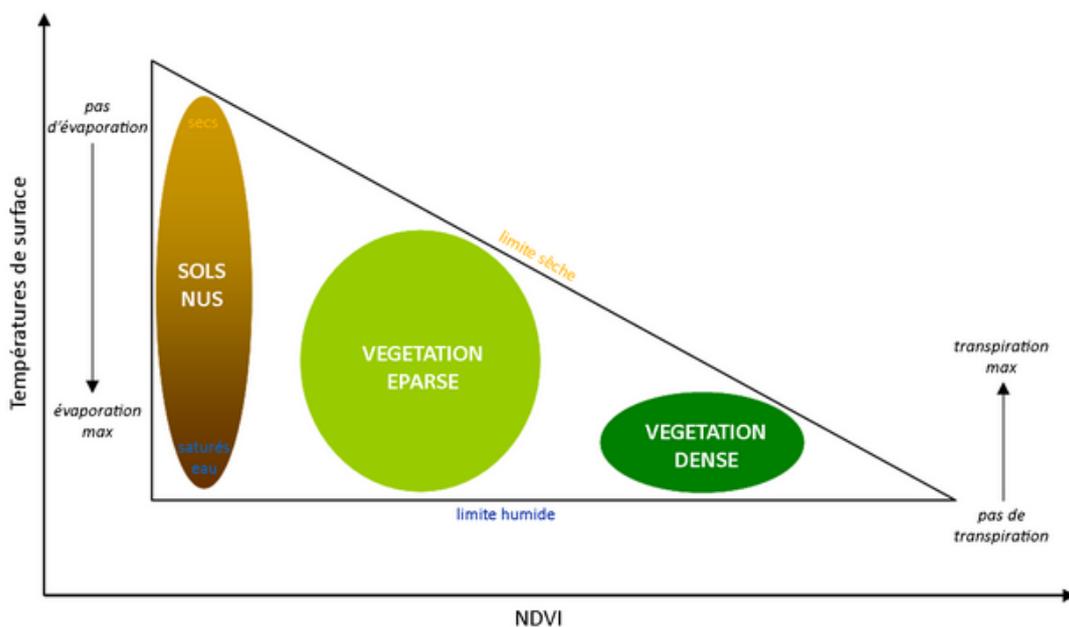


Figure 8: relation simplifiée entre la température de surface et l'indice de végétation

III- Théorie des patrons et métriques paysagères et leur utilisation pour analyser l'impact de la configuration spatiale et les changements temporels de la végétation sur le microclimat :

III-1-La notion de paysage :

Le paysage est défini comme un espace hétérogène composé d'une mosaïque d'écosystèmes en interaction qui interagissent et se répètent de façon similaire dans l'espace (Bertrand, 1975). C'est une partie de la surface terrestre qui est formée d'un complexe d'interrelations qui provient de l'interaction des roches, de l'eau, de l'air, des plantes, des animaux et des hommes et qui, dans son apparence extérieure, forme un tout perceptible.

Selon Forman & Godron (1981), le paysage est distingué par trois éléments principaux, la structure spatiale est une mosaïque représentée par le modèle appelé tache-corridor-matrice (Figure 9).

-La matrice est l'élément dominant, englobant ; en son sein, on distingue des taches (places placettes, jardins, bosquets, habitations...etc) et des corridors (éléments linéaires) ;

-La tâche (patch) est indépendante, non linéaire, de nature différente de la matrice et éventuellement liées par des corridors ;

-Les corridors sont des unités ayant une forme linéaire caractéristique et remplissant des fonctions écologiques de passage, de filtre et de barrière. Ils sont souvent présents dans un paysage en forme d'un réseau. Les corridors servent donc de liens entre les patches fragmentés (Burel & Baudry, 2003).

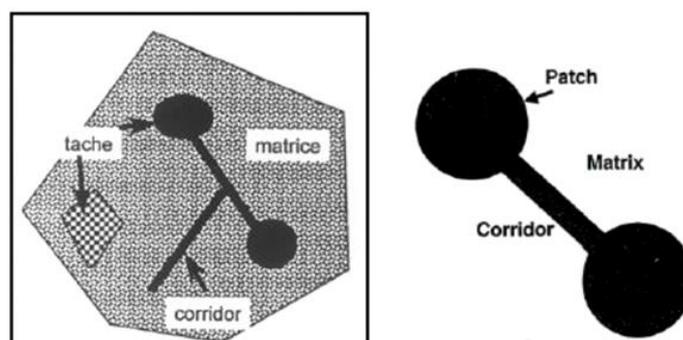


Figure 9: Classifications des composantes basiques du paysage selon le modèle taches-matrice-corridors (Burel & Baudry, 2000). Les taches et la matrice sont connectées à l'aide des corridors. La structure qui entoure ces deux catégories dans le paysage s'appelle la matrice "arrière-plan de la mosaïque paysagère" (Burel & Baudry, 2003 par Lucedito, 2019).

L'arrangement spatial de la mosaïque et des réseaux constitue le patron paysager (landscape pattern). Il servira à distinguer ou à rapprocher deux paysages, du point de vu structural. Ce model décrit le patron d'un paysage comme un assemblage de certaines utilisations

dominantes des terres caractérisées par des patches relativement homogènes, allant des écosystèmes naturels terrestres et aquatiques comme les forêts, les prairies et les lacs aux environnements dominés par l'homme, y compris les milieux agricoles et urbains. La configuration spatiale particulière des patches est cruciale pour caractériser la structure du paysage et les limites des patches représentent les discontinuités des caractéristiques environnementales pertinentes pour certaines espèces ou certains phénomènes écologiques à l'étude (Turner, 1990).

Ce modèle (matrice-patch-corrridor) sert souvent de référence pour les mesures de configuration spatiale. Chaque écosystème peut être reconnu à partir de la distribution, de la taille, de la forme, du nombre et de la configuration dans l'espace de ces trois composantes de base

III-2-L'écologie du paysage :

Selon L'IALE (association internationale d'écologie du paysage), l'écologie du paysage est l'étude de la variation spatiale dans les paysages à différentes échelles, incluant les causes biophysiques et sociales et les conséquences de l'hétérogénéité écopaysagère, ce qui en fait une branche nécessairement interdisciplinaire des sciences (McGarigal & Cushman, 2002).

Selon Turner (1989) « *Landscape ecology deals fundamentally with how, when and why patterns of environmental factors influence the distribution of organisms or the actions of ecological processes, and reciprocally, how the actions of organisms and ecological processes feedback to influence ecological patterns* » ; l'écologie du paysage traite fondamentalement de la façon dont, quand et pourquoi les modèles de facteurs environnementaux influencent la distribution des organismes ou les actions des processus écologiques, et réciproquement, comment les actions des organismes et des processus écologiques rétroagissent pour influencer les modèles écologiques.

Le terme écologie du paysage a été initialement inventé en 1939 par le bio-géographe allemand Carl Troll, visant à interpréter la relation entre la végétation et son environnement correspondant. Cette théorie a engendré une innovation significative dans la planification et la conception du paysage, le regain d'intérêt pour l'écologie du paysage est perceptible dans les récents efforts visant à intégrer une perspective paysagère dans les politiques et les lignes directrices pour la gestion des espaces publics (McGarigal & Cushman, 2002). Elle est particulièrement bien adaptée à l'étude des espaces verts urbains, car les espaces naturels artificiels et résiduels sont pris en compte, elle offre des informations sur l'optimisation de l'utilisation de l'espace vis-à-vis de la conservation et de l'amélioration de l'environnement. (McGarigal & Cushman, 2002).

L'écologie du paysage s'intéresse à la dynamique spatiotemporelle des composantes biologiques, physiques et sociales des paysages humanisés et/ou naturels, les impacts du développement humain sur le paysage. Elle associe pour cela des disciplines telles que la géomorphologie et l'étude de l'architecture du paysage, l'écologie, la géographie et les sciences sociales. Selon Troll, (1939) Elle s'intéresse par :

- ✓ La composition spatiale et la structure du paysage allant du milieu rural au milieu urbain ;
- ✓ La relation entre la structure du paysage et l'activité humaine (les processus du changement ;
- ✓ La relation entre la structure et les processus paysagers ;

III-3-la structure du paysage :

Selon Bogaert & Mahamane, (2005), chaque système écologique est caractérisé par une corrélation de trois éléments à savoir la configuration, la composition et le fonctionnement (Figure 10). Chaque élément est nécessaire mais insuffisant pour caractériser l'état du paysage (Bogaert & Mahamane, 2005 par Lucedito, 2019). Une relation triangulaire décrit la corrélation entre la configuration spatiale, les types de composition et les fonctionnements et les processus de tous systèmes écologiques en constituant la base de la recherche en écologie du paysage (Noon & Dale, 2002 par Lucedito, 2019).

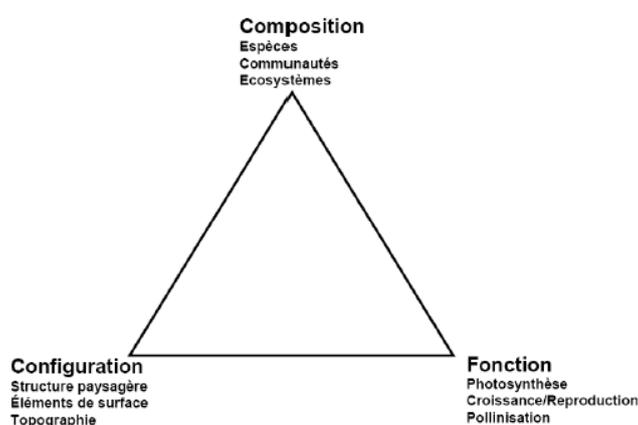


Figure 10: Les éléments composant de la structure de chaque système écologique, applicable à chaque échelle spatio-temporelle. Les éléments sont connectés par un triangle équilatéral pour illustrer leur interdépendance (Noon & Dale, 2002)

Il existe une relation directe entre la structure spatiale et le fonctionnement, connu sous le terme de « *pattern/process paradigm* », constitue l'hypothèse fondamentale de l'écologie du paysage (Bogaert & Mahamane, 2005). Lorsque la composition et/ou la configuration changent, le fonctionnement écologique du paysage en est modifié également (Figure 11). Le

fonctionnement peut être quantifié par la biodiversité, la production de biomasse, la taille de la population,... (Koffi, 2008 par Lucedito, 2019)

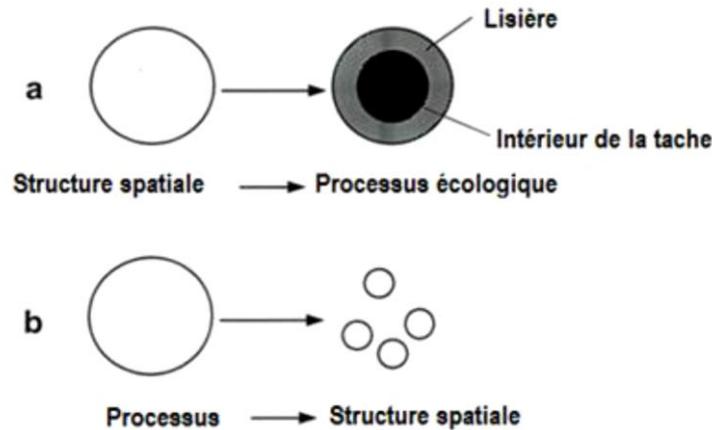


Figure 11: Illustration du pattern/process paradigm : a) processus (écologique) du paysage altéré par la structure spatiale. Ex présence d'habitat de lisière et de l'intérieur dû à l'effet de lisière, sont observés pour des taches individuelles résultant de la fragmentation du paysage ;b) la structure du paysage est supposée résulter des processus (écologiques). Ex la fragmentation transforme l'habitat continu en taches d'habitats isolés (Koffi, 2008 par Lucedito, 2019).

III-4-Les patrons du paysage (landscape patterns) :

III-4-1-Définition :

Les patrons du paysage (landscape patterns) sont généralement définis comme la composition et la configuration spatiale des phénomènes dans l'espace (Csillag & Kabos, 2002). La composition fait référence aux mesures non spatiales d'éléments du paysage en indiquant le nombre et l'occurrence de différentes catégories. Alors que la configuration spatiale présente la distribution physique ou les dispositions structurelles à certaines échelles. La quantification des patrons du paysage est considérée comme une condition préalable à l'étude de la structure, de la fonction et des interactions réciproques entre le patr spatial et les processus écologiques, qui sont des activités fondamentales de l'écologie du paysage (Helfenstein et al., 2014).

III-4-2-Les classes des patrons du paysage (classes of landscape patterns) :

Les paysages réels contiennent des schémas spatiaux complexes dans la distribution des ressources qui varient dans le temps; quantifier ces modèles et leur dynamique relève de l'analyse des modèles de paysage. D'une manière générale, l'analyse du modèle de paysage implique quatre types de données spatiales de base :

- **Les patrons de points spatiaux** : ils représentent des collections d'entités où les emplacements géographiques des entités sont d'un intérêt primordial, plutôt que tout attribut quantitatif ou qualitatif de l'entité elle-même. Un exemple familier est une carte de tous les arbres d'un peuplement forestier, dans laquelle les données consistent en une

liste d'arbres référencés par leur emplacement géographique. Le but est de déterminer si les points sont plus ou moins regroupés que prévu par hasard et / ou de trouver la ou les échelles spatiales auxquelles les points ont tendance à être distribués de façon non aléatoire (Dale, 1990) ;

- **Les patrons de réseau linéaire** : ils représentent des collections d'éléments de paysage linéaires qui se croisent pour former un réseau. Un exemple familier est une carte des cours d'eau ou des zones riveraines d'un bassin versant, dans laquelle les données se composent de nœuds et de liens entre les nœuds; la zone intermédiaire est considérée comme la matrice et est généralement ignorée (c'est-à-dire traitée comme neutre sur le plan écologique). L'objectif est de caractériser la structure physique (par exemple, la densité du couloir, la taille du maillage, la connectivité du réseau, les circuits) du réseau (Forman, 1995) ;
- **Les patrons de surface** : ils représentent des mesures quantitatives qui varient continuellement à travers le paysage; il n'y a pas de limites explicites (c'est-à-dire que les correctifs ne sont pas délimités). Les données peuvent être conceptualisées comme une surface tridimensionnelle, où la valeur mesurée à chaque emplacement géographique est représentée par la hauteur de la surface (Legendre & Fortin, 1989 ; Legendre & Legendre, 1999) ;
- **Les patrons de carte catégoriques (ou thématiques)** : ils représentent des données dans lesquelles la propriété système d'intérêt est représentée comme une mosaïque de correctifs discrets. D'un point de vue écologique, les parcelles représentent des zones discrètes de conditions environnementales relativement homogènes à une échelle particulière. Les limites des patches se distinguent par des discontinuités (limites) brusques dans les états de caractère environnemental de leur environnement de magnitudes pertinentes pour le phénomène écologique considéré. Un exemple familier est une carte des types de l'usage du sol, dans laquelle les données se composent de polygones (format vectoriel) ou de cellules de grille (format raster) classées en classes d'usage du sol distinctes. L'objectif est de caractériser la composition et la configuration spatiale de la mosaïque de patch (Li & Reynolds, 1993 ; McGarigal & Marks, 1995).

III-5-Les métriques paysagère (landscape metrics) :

III-5-1-Définition :

L'utilisation courante du terme « étriques paysagères » se rapporte exclusivement aux indices élaborés pour les cartes catégoriques. Les métriques paysagères sont axées sur la

caractérisation des propriétés géométriques et spatiales des patrons de carte catégoriques représentés à une échelle unique (grain et étendue).

Elles ont été appliquées efficacement dans différents domaines de recherche environnementale, notamment la gestion et l'évaluation des ressources en eau, la délimitation des aires protégées (Mcgarigal et al. 2005), l'évaluation de l'impact environnemental du mécanisme de croissance urbaine (Mitsova et al. 2009; Tang et al. 2008) et plans de réhabilitation du paysage (Herzog et al. 2001).

L'analyse des patrons du paysage à l'aide des métriques a attiré de plus en plus d'attention dans les milieux de la recherche écologique et de la gestion (Fu et Chen, 2000). Beaucoup d'efforts ont été déployés pour élaborer des mesures des patrons du paysage, et littéralement des centaines d'indices ont été développés au cours des dernières décennies (Llauss et Nogué 2012). Ces métriques proviennent de diverses perspectives et disciplines, comme les mesures statistiques de la dispersion, la théorie de l'information, la géométrie fractale et la théorie de la percolation (Li et Archer, 1997). De plus, de nouvelles métriques sont encore en cours de conception (Li et coll., 2005), comme l'indice d'agrégation (He et coll., 2000), l'indice de cohésion (Opdam et coll., 2003), l'indice d'expansion du paysage (Liu et coll., 2010). La plupart de ces métriques ont été incorporés dans plusieurs logiciels, tel que Fragstats, Patch Analyst, R etc... (Baker & Cai, 1992; Mcgarigal & Marks, 1995)

Les indices de configuration du paysage peuvent décrire la composition et les caractéristiques spatiales du paysage en se fondant quantitativement sur des cartes vectorielles SIG, des photographies aériennes et des images télédétectées.

Idéalement, l'objectif des analyses de paysage devrait alors être de pouvoir lier les métriques de la structure du paysage à des effets spécifiques sur les processus écologiques, plutôt que de traiter la description quantitative du patron spatial comme une fin elle-même.

III-5-2-Les niveaux de métriques paysagères :

En général, trois niveaux ont été caractérisés pour un paysage donné à l'aide d'indices de configuration de paysage, à savoir les patches du paysage (patches), les classes des patches (Class metrics) et les mosaïques de paysage entières (Landscape metrics) (Uuemaa et al., 2009). Au niveau de la classe et du paysage, certaines mesures quantifient la composition du paysage, tandis que d'autres quantifient la configuration du paysage (Figure 12). La composition et la configuration du paysage peuvent affecter les processus écologiques de manière indépendante et interactive. Ainsi, il est particulièrement important de comprendre pour chaque métrique quel aspect du modèle de paysage est quantifié. De plus, de nombreuses

mesures sont partiellement ou complètement redondantes; c'est-à-dire qu'ils quantifient un aspect similaire ou identique de pattern du paysage.

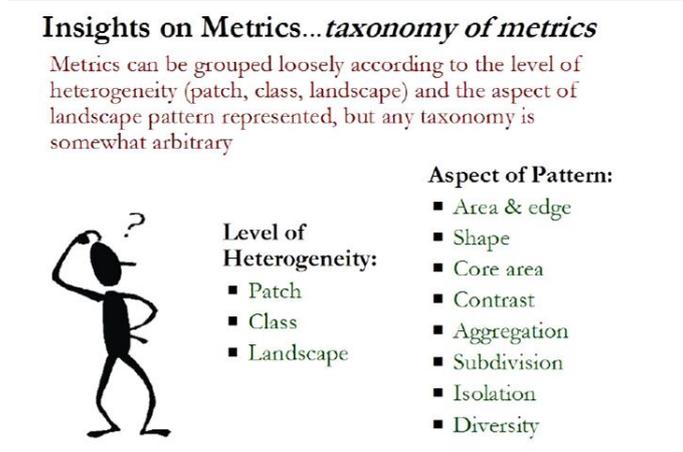


Figure 12: les niveaux et les aspects de métriques paysagères (Mcgarial et al, 2005)

- **Les métriques du patch :** sont définies pour les patches individuels et caractérisent le caractère spatial et le contexte des patches;
- **Les métriques de classe** sont intégrées sur tous les patches d'un type donné. Ceux-ci peuvent être intégrés par simple calcul de la moyenne, ou par une sorte de système de calcul de la moyenne pondérée qui biaise l'estimation pour refléter la plus grande contribution des grands patches à l'indice global. Il existe des propriétés d'agrégation supplémentaires au niveau de la classe qui résultent de la configuration unique des patches à travers le paysage;
- **Les métriques au niveau du paysage :** sont intégrées à tous les types de patches ou classes sur l'ensemble du paysage). À l'instar des mesures de classe, celles-ci peuvent être intégrées par une moyenne simple ou pondérée, ou peuvent refléter les propriétés agrégées de la mosaïque de patches (Mcgarial et al, 2002).

III-5-3-Les aspects de métriques paysagères :

A- Les métriques de la composition :

La composition est facilement quantifiée et fait référence aux caractéristiques associées à la variété et à l'abondance des types de patches dans le paysage, mais sans tenir compte du caractère spatial, de l'emplacement ou de l'emplacement des patches dans la mosaïque. Parce que la composition nécessite l'intégration de tous les types de patches, les mesures de composition ne sont applicables qu'au niveau du paysage. Les principaux indices sont les suivantes (Mcgarial et al, 2002):

- **Abondance proportionnelle de chaque classe** : l'une des informations les plus simples et peut-être les plus utiles qui peuvent être dérivées est la proportion de chaque classe par rapport à l'ensemble de la carte ;
- **Richesse** : la richesse est simplement le nombre de différents types de patch ;
- **Régularité** : la régularité fait référence à l'abondance relative de différents types de patches, mettant généralement l'accent sur la dominance relative ou son complément, l'équitabilité. Il existe de nombreuses mesures possibles de régularité (ou de dominance) correspondant aux nombreuses indices de diversité ;
- **Diversité** : la diversité est une mesure composite de la richesse et de la régularité et peut être calculée sous diverses formes (ex., Shannon, Simpson), selon l'importance relative accordée à ces deux composantes.

B- Les métriques de la configuration :

La configuration spatiale est beaucoup plus difficile à quantifier et fait référence au caractère et à l'aménagement spatial, à la position ou à l'orientation des patches dans la classe ou le paysage. Certains aspects de la configuration sont des mesures du caractère spatial des patches eux-mêmes, même si l'agrégation peut être à travers des patches au niveau de la classe ou du paysage (Mcgarial et al, 2002).

Il y a de nombreux aspects de la configuration et la littérature regorge de méthodes et d'indices développés pour les représenter. Les principaux aspects de la configuration sont les suivants (Mcgarial et al, 2002):

- **Distribution et densité de la taille des patches** : c'est la mesure de configuration la plus simple est la taille du patch, qui représente un attribut fondamental du caractère spatial d'un patch (Figure 13). La distribution de la taille des patches peut être résumée aux niveaux de classe et de paysage de diverses façons (ex, moyenne, médiane, maximum, variance) ou, alternativement, formulée sous forme de densité de parcelles.

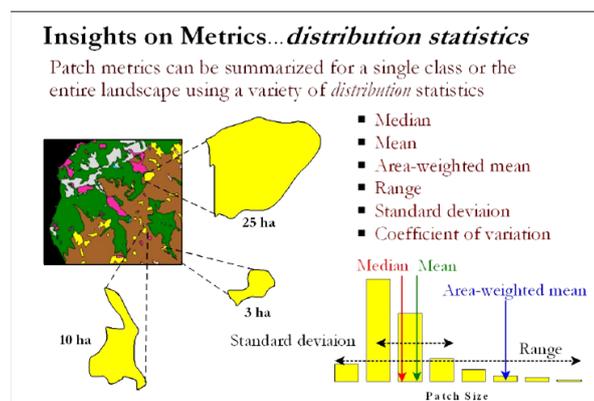


Figure 13: La distribution de la taille des patches (Mcgarial et al, 2005)

- **Complexité de la forme des patches :** la complexité de la forme est liée à la géométrie des patches, qu'ils soient simples et compacts, irréguliers et alambiqués. En raison de la difficulté d'indexation de la forme en soi, les mesures de forme indexent généralement la complexité globale de la forme plutôt que de tenter d'attribuer une valeur à chaque forme unique. Les mesures les plus courantes de la complexité de la forme sont basées sur la quantité relative de périmètre par unité de surface, habituellement indexée en fonction d'un rapport périmètre-surface, ou sous forme de dimension fractale, et souvent normalisée à une forme euclidienne simple (cercle ou carré); plusieurs autres méthodes ont également été proposées (Mcgarial et al, 2002);
- **Zone centrale :** La zone centrale représente la zone intérieure des patches après l'élimination d'un tampon de bord spécifié par l'utilisateur. Le tampon de bord représente la distance à laquelle le « noyau » ou l'intérieur d'une pièce n'est pas affecté par le bord de la pièce. Cette distance « d'effet de bord » est définie par l'utilisateur comme étant pertinente au phénomène considéré et peut être traitée comme fixe ou ajustée pour chaque type de bord unique. La zone centrale intègre la taille du patch, la forme et la distance de l'effet de bord en une seule mesure. Toutes choses étant égales par ailleurs, les petits patches ayant une plus grande complexité de forme ont moins de surface centrale (Mcgarial et al, 2002) ;
- **Isolement/proximité :** il fait référence à la tendance des patches à être relativement isolées dans l'espace (c.-à-d. éloignées) par rapport à d'autres patches de la même classe écologique ou de classe écologique similaire. Comme la notion d'« isolement » est vague, il existe de nombreuses mesures possibles selon la façon dont la distance est définie et la façon dont les correctifs de la même classe et ceux des autres classes sont traités. Certaines mesures sont basées sur la distance entre les patches voisins du même type, tandis que d'autres sont données en termes de taille et de proximité des patches voisins dans le voisinage local autour de chaque patch, avec une taille de quartier spécifiée par l'utilisateur et adaptée à l'organisme ou au procédé considéré (Mcgarial et al, 2002).
- **Contraste :** le contraste fait référence à la différence relative entre les types de patches. Par exemple, une forêt mature à côté d'une forêt plus jeune peut avoir un bord de contraste plus faible que la forêt mature adjacente à un champ ouvert, selon la façon dont la notion de contraste est définie. Cela peut être calculé comme une densité de bord pondérée en fonction du contraste, où chaque type de bord se voit attribuer un poids de contraste, ou comme un indice de contraste de voisinage, où le contraste moyen entre le

patch focal et tous les patches dans un quartier spécifié par l'utilisateur est calculé (Mcgarial et al, 2002) ;

- **Dispersion.** La dispersion fait référence à la tendance des patches à être régulièrement distribuées ou regroupées les unes par rapport aux autres. De nombreux indices de dispersion ont été développés pour l'évaluation des patrons de points spatiaux, dont certains ont été appliqués à des cartes catégoriques. Une approche commune est basée sur les distances de voisinage les plus proches entre les patches du même type. Souvent, cela est calculé en fonction de la variabilité relative des distances de voisinage les plus proches entre les patches. Ici, si la variance est supérieure à la moyenne, alors les patches sont plus groupés dans la distribution qu'aléatoire, et si la variance est inférieure à la moyenne, alors les patches sont répartis plus uniformément. Il est possible de calculer d'autres indices de dispersion fondés sur les distances entre voisins les plus proches (Mcgarial et al, 2002);
- **Contagion et Interspersion :** la contagion fait référence à la tendance des types de patches à être agrégés spatialement, c'est-à-dire à se produire dans de grandes distributions agrégées. La contagion ignore les patches en soi et mesure la mesure dans laquelle les cellules (dans une grille tramée) de classe similaire sont agrégées. Interspersion, d'autre part, se réfère au mélange de patches de différents types et est basé uniquement sur les patches adjacents (par opposition à cellule) (Mcgarial et al, 2002).
- **Subdivision :** La subdivision fait référence au degré auquel un type de patch est divisé (c.-à-d. subdivisé) en patches distinctes (c.-à-d. fragments), et non à la taille (en soi), à la forme, à l'emplacement relatif ou à l'aménagement spatial de ces patches. Comme ces derniers attributs sont habituellement affectés par la subdivision, il est difficile d'isoler la subdivision en tant que composante indépendante. La subdivision peut être évaluée à l'aide d'une variété de mesures déjà discutées; par exemple, le nombre, la densité et la taille moyenne des patches et le degré de contagion tous mesurent indirectement la subdivision. Cependant, de nombreuses mesures dérivées de la distribution cumulative des tailles de patches fournissent des mesures de subdivision différentes et plus explicites (Mcgarial et al, 2002).
- **Connectivité :** la connectivité désigne généralement les connexions fonctionnelles entre les patches. Ce qui constitue une « connexion fonctionnelle » entre les patches dépend clairement de l'application ou du processus d'intérêt. Les connexions peuvent être basées sur la contiguïté stricte, une certaine distance de seuil, une certaine fonction décroissante

de distance qui reflète la probabilité de connexion à une distance donnée, ou une fonction de distance pondérée en fonction de la résistance. Ensuite, divers indices de connectivité globale peuvent être dérivés à partir des connexions par paires entre les patches (Mcgarial et al, 2002).

Conclusion :

La télédétection se révèle être un outil tout à fait approprié pour étudier le fonctionnement et suivre l'évolution de la végétation. Grâce aux satellites il est possible en effet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variées. Ils permettent en outre d'estimer le rayonnement solaire global, ainsi que certains paramètres caractéristiques des couverts végétaux, comme la quantité de biomasse, ou la fraction du rayonnement photosynthétique actif. Outils d'une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques qui gouvernent la dynamique des écosystèmes végétaux, les données de télédétection peuvent aussi être utilisées pour informer les politiques sur les conséquences d'éventuels changements de la répartition mondiale des couverts végétaux, de façon à mettre en place des solutions de gestion plus durables.

Les indices de végétation ont été utilisés dans des applications très nombreuses et variées depuis l'apparition de la télédétection spatiale, dans ce chapitre nous avons présenté les indices les plus couramment utilisés. Ce qu'on peut dire que chaque indice a ses avantages et beaucoup ont des avantages particuliers, mais ils se caractérisent par le fait qu'ils sont intrinsèquement dépourvus de dimension et qu'ils ont tous en fin de compte la caractéristique d'utiliser le contraste entre la réflexion NIR et rouge comme mesure principale de la végétation.

A l'instar de la télédétection, la théorie de patrons du paysage et indices du paysage sert aussi à évaluer l'impact de la composition et la configuration spatiale de la couverture végétale sur la température de surface du sol LST et le microclimat. Une méthode pertinente, permet de quantifier l'effet des patches vert sur LST à travers l'usage de plusieurs métriques par le biais de la télédétection en utilisant des cartes de l'usage du sol en format Raster ou ASCII et les analyser dans le logiciel FRAGSTAT. Les indices choisis dans notre étude sont présentés dans la partie analytique, le chapitre 3.

Chapitre n°4 :

**Approches et méthodes utilisées pour
évaluer l'impact de l'espace vert sur le
microclimat et le confort thermique
extérieur**

-Introduction :

Le chapitre présent met l'accent sur les études effectuées par plusieurs chercheurs dans multiples domaines (urbanistes, Architectes, géographes, météorologues, écologistes....etc.) concernant les effets de l'espace vert sur le climat urbain et le microclimat, chacun et sa méthodologie. L'ensemble de ces études prouve que l'espace vert est un bon régulateur du climat en atténuant l'îlot de chaleur urbain, réduit la température de l'air, génère de l'oxygène et absorbe le dioxyde de carbone, offre de l'ombre et réduit la pollution et offre un certain confort psychique.

Les méthodologies suivies par les chercheurs sont différentes selon les méthodes de collection des données, les périodes d'acquisition, les conditions climatiques de la zone d'étude, les logiciels de traitement, et les objectifs visés de l'étude. Dans ce chapitre on va essayer de présenter plusieurs études ont été faites sur ce sujet (impact de l'espace vert sur le microclimat) et les classer selon la méthodologie de travail suivies afin de construire notre méthodologie, et pour atteindre notre objectif d'étude.

I-Recherches menées sur l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur :

L'état du confort humain dans les espaces extérieurs est vital à prendre en compte lors de la conception des espaces extérieurs, car, il est affecté par un large éventail de paramètres. Par conséquent, la création d'environnements thermiquement confortables en fonction des conditions climatiques est considérée comme l'un des critères importants lors de la conception des espaces extérieurs. L'évaluation du confort thermique humain est en cours de développement depuis le 20^{ème} siècle, lorsque les premiers modèles simplifiés, basés sur l'interaction de deux variables météorologiques simples, ont été développés. Dans les années 1930, avec le «modèle à deux nœuds» développé par Gagge (1936), pour la première fois les principes de la thermodynamique sont appliqués aux échanges d'énergie entre le corps humain et son environnement thermique. Ces axes de recherche ont été développés par Givoni (1963), qui a développé l'indice de stress thermique (SR), et Fanger (1970) qui, au cours des années soixante-dix, a développé l'indice de vote moyen prévisible (PMV), qui est en fait une norme bien reconnue (ISO, 2005) pour quantifier le confort humain intérieur. Enfin, au cours des années 1980, le développement de connaissances suffisantes sur la physique des échanges thermiques et l'utilisation des ordinateurs personnels a permis une amélioration de la

recherche sur l'environnement thermique humain, et la formulation d'indices basés sur les échanges thermiques corporels (Fabbri, 2015) .

I-1-Approche par simulation :

Plusieurs logiciels de simulation, capables de quantifier le confort humain extérieur, ont été utilisés dans les recherches scientifiques comme suit (Coccolo et al, 2016):

- ENVI-met est un outil logiciel microclimatique basé sur l'interrelation entre quatre systèmes: le sol, la végétation, l'atmosphère et les bâtiments. Ce logiciel évalue le microclimat extérieur, en utilisant la température de l'air, la température moyenne radiante, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement à ondes courtes et longues d'un bâtiment unique à une ville entière ;
- L'outil de post-traitement appelé Bio-Met interagit directement avec ENVI-met et détermine le confort thermique, selon PMV, PET, UTCI et TMR ;
- Le modèle RayMan calcule les flux de rayonnement et les indices thermo-physiologiques, comme PMV, PET, SET*, UTCI, PT et la température moyenne radiante ;
- Le modèle OTC analyse l'indice universel de climat thermique (UTCI), la température physiologique équivalente température équivalente physiologique (PET) et la Température effective universelle (ETU) ;
- SOLWEIG (Solar et LongWave Environmental Irradiance Geometry) est développé au sein du Goteborg Urban Climate Group, et il simule les flux 3D de rayonnement solaire et IR à partir d'une description de la ville par coordonnées (x, y) et hauteur associée. Par le biais du calcul de la température moyenne radiante, la principale application du modèle est de produire des cartes de confort thermique en quantifiant le PET, l'UTCI et le TMR pour les environnements urbains complexes.
- Le modèle Solène-microclimat permet d'étudier l'impact des aménagements urbains à l'échelle du quartier sur le confort extérieur, sur la température de surface et sur la consommation énergétique. En plus du bilan radiatif, des échanges convectifs thermiques et aérauliques ;
- Le modèle TEB-SURFEX permet d'étudier les échanges d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et les villes, l'îlot de chaleur urbain dans une ville, les consommations énergétiques pour la climatisation et le chauffage du bâtiment ainsi que les indices du confort humain ;

- Enfin, le calculateur UTCI détermine le confort thermique du piéton, selon l'indice universel de climat thermique (UTCI).

Le tableau 1 les présente en fonction du modèle qui peut être analysé (Coccolo et al, 2016). Certains de ces logiciels calculent la température moyenne de rayonnement, qui n'est pas considéré comme un modèle pour quantifier le confort humain extérieur, mais donne un aperçu de la perception thermique du piéton.

Tableau 1: logiciels de simulation utilisés pour calculer les indices du confort thermique extérieur en fonction de modèle calculés (PMV, PET, UTCI, SET *, ETU et PT) et TMR. (Coccolo et al, 2016).

Logiciel	PMV	PET	UTCI	SET*	ETU	PT	TMR
ENVI-met et BioMet	√	√	√				√
RayMan	√	√	√	√		√	√
OTC model		√	√		√		
SOLWEIG		√	√				√
UTCI calculateur			√				

I-1-1-Le modèle ENVI-met:

Le modèle a été décrit par Bruse et Fler (1998), c'est un logiciel de simulation en trois dimensions, capable de reproduire le comportement microclimatique et physique des espaces urbains et ruraux (Bruse & Fler, 1998). Grâce à ce logiciel, une analyse globale a été réalisée et a permis de déterminer les valeurs de la température de l'air, de la température moyenne radiante, de l'humidité relative, du rayonnement global et des PMV et leur comparaison avec des valeurs mesurées expérimentalement sur le terrain (Figure 1).



Figure 1: model 3D d'un cas d'étude sur ENVI-met (<https://www.envi-met.com>)

Ce logiciel a été utilisé dans de nombreuses études pour évaluer, en termes de conditions biométéorologiques, l'aménagement urbain. Certains paramètres examinés sont la transpiration, l'évaporation et le flux de chaleur sensible circulant de la végétation vers l'air tout en effectuant une simulation complète de chaque paramètre physique de la plante

(comme le taux de photosynthèse). Il est capable d'examiner même les échanges de chaleur et de masse liés aux surfaces: par exemple, un paramètre qui est pris en considération est la quantité d'eau absorbée par la plante dans l'équilibre du sol (Figure 2).

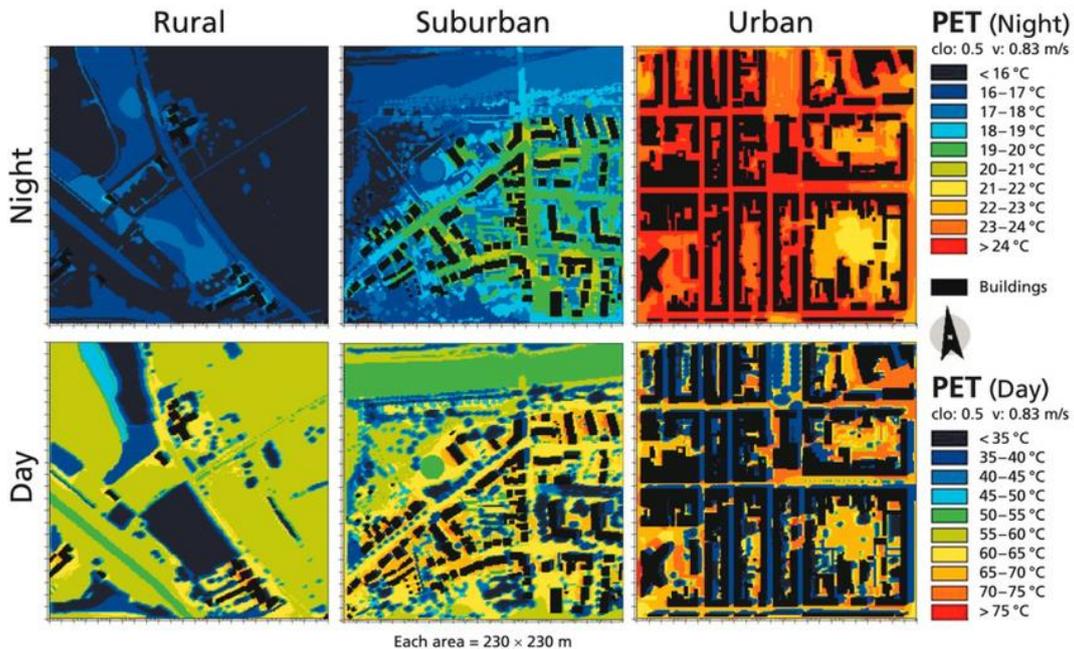


Figure 2: résultat de simulation de l'indice PET par ENVI-met (Kuttler, 2012)

C'est pourquoi, dans de nombreuses recherches, il a été utilisé pour examiner l'influence de l'espace vert urbain sur les variables micro-météorologiques et le confort thermique extérieur. Lee et al. (2016) ont estimé comment les arbres et les prairies affectent le microclimat d'une zone résidentielle typique à **Fribourg** (Allemagne) tandis que Martins et al. (2016) ont souligné l'influence majeure de la végétation sur l'atténuation des îlots de chaleur urbains à Toulouse (France). Duarte et al, (2015) a simulé, en référence à São Paulo (Brésil), un parc situé au milieu du site, petits parcs qui caractérisent la texture urbaine et les arbres sur le bord de la rue. Même Tsilini et al. (2014) ont pris en considération plusieurs scénarios. Ils ont examiné la ville de Chania (Grèce) réalisant : une configuration sans végétation, une représentative de la configuration actuelle, une configuration avec des plantes liées à l'horticulture et une avec des espèces aromatiques et médicinales. Les deux dernières configurations ont signalé une baisse de la température de surface de 10 °C. La même variable a été examinée par Skelhorn et al. (2014) : ils ont découvert comment une augmentation de 5% des arbres à feuilles caduques matures à Manchester (Royaume-Uni) peut déterminer une baisse de la température moyenne à la surface d'environ 1°C en été. Müller et al. (2014) ont déclaré, grâce à une recherche effectuée à Oberhausen (Allemagne), que la stratégie d'atténuation la plus efficace est celle des parcs caractérisés par des arbres élevés avec une couche de couronne distincte et capables d'ombrager sans gêner le vent.

Ensuite, Morakinyo & Lam, (2016) ont examiné, à Hong Kong, les effets déterminés par différentes valeurs de la couverture verte, de la densité foliaire (LAD) et de l'indice foliaire (LAI). Une étude similaire a été réalisée à Phoenix (États-Unis) par Middel et al (2015) : différents scénarios avec des couvertures différentes (de 0 % à 30 %) ont été mis en œuvre, pour chaque augmentation de pourcentage, une baisse de la température de l'air de 2 m de 0,14 °C a été signalée. Ketterer et Matzarakis (2015), dans une étude réalisée à Stuttgart (Allemagne), ont examiné la température équivalente physiologique (PET) et estimé, en raison d'une augmentation du nombre d'arbres, une diminution de la valeur PET de 0,5 °C à 22 h et une diminution maximale de 27 °C à 02 h.

D'autres études ont examiné les effets des toits végétaux. Même dans ce cas, des zones aux climats différents ont été couvertes : Razzaghmanesh et al., (2016) à Adélaïde (Australie), Lobaccaro et Acero (2015) à Bilbao (Espagne), Sodoudi et al., (2014) à Téhéran (Iran). Cette dernière a mis en œuvre un scénario hybride combinant végétation, toits verts et matériaux à fort albédo quantifiant un effet de refroidissement nocturne moyen de 1,1 °C. Peron et al., (2015) ont utilisé une approche similaire à Venise (Italie) Dans ce cas, l'effort simultané de matériaux frais et de végétation a entraîné une baisse de 4 °C.

D'autre part, l'objectif principal de Jänicke et al (2015), tout en étudiant le campus de l'Institut de Technologie de Berlin (Allemagne) et son comportement par rapport à une façade verte, était de construire une façade à moitié verte tandis que l'autre partie était nue. Il en a résulté une diminution moyenne de la température moyenne radiante juste devant la façade verte d'environ 2°C.

-Jeff (2018) a étudié le potentiel de rafraîchissement de différentes techniques de réduction de l'îlot de chaleur urbain dans le contexte d'un climat méditerranéen. L'étude s'est concentrée sur un quartier dense de Beyrouth, la capitale du Liban en évaluant l'impact du microclimat urbain sur les charges de climatisation du bâti en période estivale. Ce travail a aussi permis d'évaluer l'impact des techniques de réduction de l'îlot de chaleur urbain sur le confort du piéton. Les résultats extraits ont montré que le facteur de vue de ciel SVF affecte la température moyenne radiante plus que la température ambiante. Une valeur élevée de ce facteur conduit à une élévation de la température radiante surtout durant les heures ensoleillées. L'étude statistique effectuée a aussi montré que la relation entre SVF et la température moyenne radiante est plutôt de type parabolique.

I-1-2-Le modèle RayMan et Sky Helios:

Le modèle Rayman est conçu pour calculer les flux radiatifs qui affectent le corps humain. Le modèle prend en compte des structures de construction complexes et convient à l'analyse de l'effet de divers scénarios de planification à différentes échelles micro et régionales. Le modèle calcule la température moyenne radiante requise pour le modèle du bilan énergétique humain et, par conséquent, pour l'évaluation du bioclimat thermique humain (Matzarakis & coll., 2007, 2010). Les indices thermiques PMV, SET*, PET, UTCI et PT peuvent être calculés. (Matzarakis & Ludwigs, 2014)

Rayman offre la possibilité d'importer des ensembles de données à long terme de paramètres météorologiques et de calculer des indices thermiques avec ou sans tenir compte de la morphologie urbaine (Figure 3). De plus, si des données sur le rayonnement sont disponibles à partir d'une station à proximité ou si des mesures ne sont pas influencées par l'environnement (facteur de vue très élevée du ciel), Rayman offre la possibilité de transférer ces données dans des environnements complexes. Rayman offre la possibilité d'importer des ensembles de données à long terme de paramètres météorologiques et de calculer des indices thermiques avec ou sans tenir compte de la morphologie urbaine. Une fenêtre de saisie spécifique permet de sélectionner les paramètres requis et demandés pour le calcul. De plus, si des données sur le rayonnement sont disponibles à partir d'une station à proximité ou si des mesures ne sont pas influencées par l'environnement (facteur de vue du ciel très élevée), Rayman offre la possibilité de transférer ces données dans des environnements complexes (Matzarakis & Ludwigs, 2014).

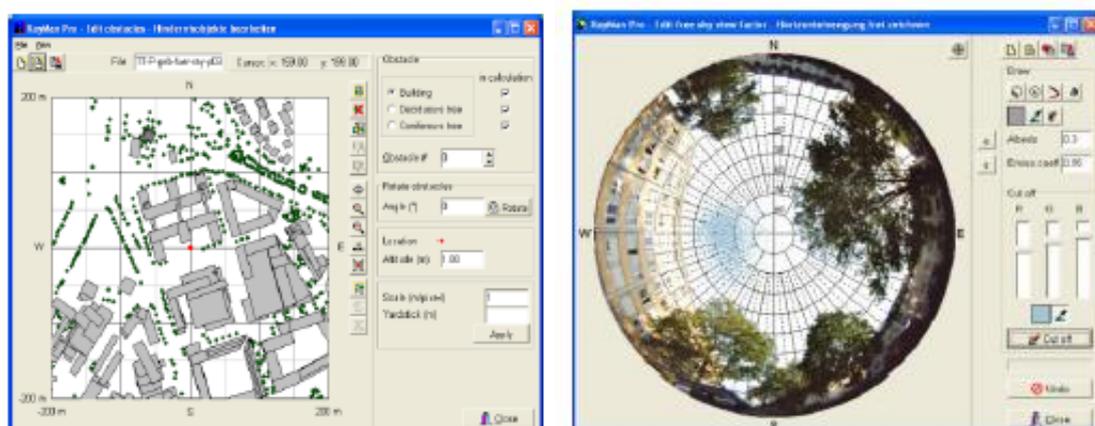


Figure 3: Interface du logiciel RayMan (Matzarakis et al, 2015)

Pour la dimension spatiale du micro climat, le modèle Skyhelios a été développé. Skyhelios peut être considéré comme le développement ultérieur de Rayman axé sur la dimension spatiale (Figure 4). Skyhelios utilise des processeurs graphiques qui peuvent être intégrés dans

des modèles de simulation de calcul par ex. facteur de vue du ciel ou flux de rayonnement (Figure). Il peut être utilisé pour modéliser les conditions climatiques ou les paramètres climatiques pertinents à l'échelle micro en ce qui concerne les morphologies complexes (Matzarakis & Ludwigs, 2014).

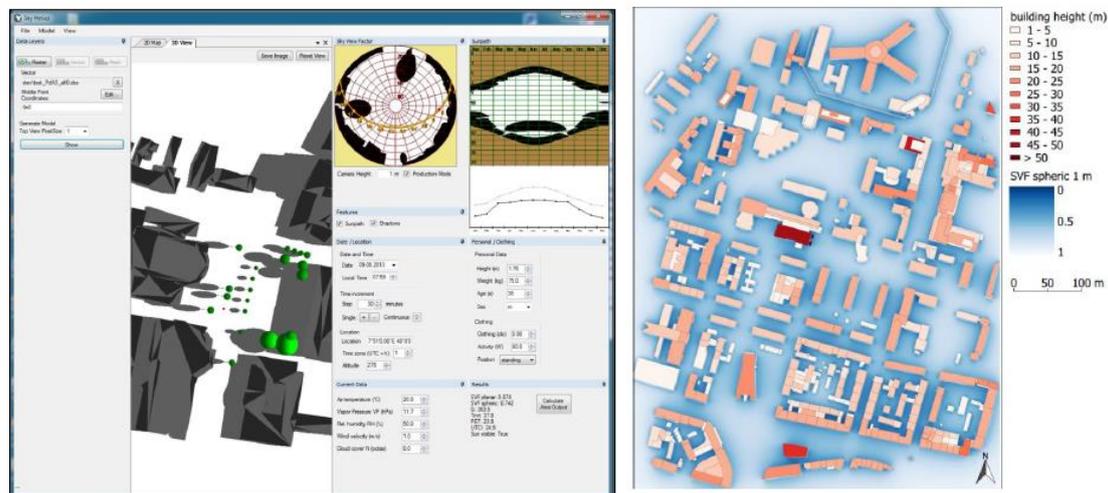


Figure 4: Interface de Sky Helios (Matzarakis et al, 2015)

Nazarian et al., (2017) ont effectué une étude sur l'évaluation de confort thermique extérieur en combinant des simulations CFD détaillées de l'écoulement urbain avec un modèle plus précis pour la température moyenne radiante T_{mr} . L'indice de confort thermique SET est calculé par le modèle RayMan dans une configuration urbaine idéalisée à l'aide d'un modèle spatial complet de la température radiante moyenne incorporé avec un flux de vent détaillé et des simulations de champ thermique.

Ketter & Matzarakis (2014), ont étudié comment le stress thermique pendant l'été peut être minimisé et d'optimiser le confort thermique et l'accès solaire pour les villes de moyenne latitude pendant toute l'année dans un quartier urbain de Stuttgart, en Allemagne. La température équivalente physiologiquement (PET) a été simulée par Rayman et ENVI-met 3.5 pour évaluer les conditions thermiques biométéorologiques humaine de l'environnement urbain. Ils ont constaté que le PET était d'environ 10 °C plus bas sous les arbres que dans les zones vertes (38°C) et d'au moins (25°C) plus bas que dans les zones plus scellées (48°C). Ce résultat correspond à une augmentation du stress thermique de trois classes d'évaluation thermo-physiologique pour la PET. Pour Xue & Xiao (2016), à l'aide du modèle RayMan, ont calculé PET pour évaluer synthétiquement l'état de l'environnement thermique des espaces de jardin qui sont composés de différents éléments du paysage.

Lai et al (2014) ont effectué une étude sur le confort thermique extérieur à Tianjin, dans le nord de la Chine. L'enquête a mené des études sur le terrain dans un parc public de mars 2012

à janvier 2013. Les données ont été recueillies 11 fois au cours de la période dans différentes conditions climatiques et par une surveillance microclimatique et des enquêtes par questionnaire. Les données ont également été utilisées pour évaluer trois indices (UTCI, PMV et PET) à l'aide de modèle RayMan. Les résultats indiquent que le PMV a surestimé la sensation thermique extérieure d'un facteur 1,3. L'UTCI a fourni une prédiction satisfaisante du confort thermique extérieur dans le cadre de notre étude. La plage de sensation thermique du PET pour le nord de la Chine était différente de celle de l'Europe et de Taïwan. Les résultats ont montré que les habitants de Tianjin étaient plus adaptés à leur environnement froid. Cependant Kariminia et al (2013) ont fait une étude basée sur le travail sur le terrain de mesures simultanées et d'enquête par questionnaire sur une place publique à Ispahan. Le PET a été sélectionné comme indice de confort thermique principal tandis que le modèle RayMan a été appliqué pour estimer les valeurs du PET. Les résultats indiquent que la plage thermique acceptable est dérivée entre 12,3 ° C et 30,9 ° C PET. Cette gamme est beaucoup plus large que celles déterminées par d'autres études pour le climat subtropical et froid.

De leur part, Lin et al (2010) ont mené 12 expériences sur le terrain pour analyser les conditions thermiques extérieures sur un campus universitaire du centre de Taïwan, et ont utilisé le modèle Rayman pour prédire le confort thermique à long terme en appliquant les données météorologiques pendant une période de 10 ans. La température physiologiquement équivalente (PET) est utilisée comme indice thermique. La plage de confort thermique des résidents taïwanais obtenue dans une enquête précédente a été appliquée comme critère pour déterminer si un environnement thermique est confortable ou inconfortable.

I-1-3-Solène-microclimat:

C'est un logiciel de simulation du microclimat urbain développé depuis les années 1990 par des chercheurs et des ingénieurs du laboratoire CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture) de Nantes. Un des points forts de ce logiciel est qu'il permet de traiter des géométries urbaines réelles et pas uniquement des formes prises dans une grille. Ce logiciel permet d'étudier l'impact des aménagements urbains à l'échelle du quartier sur le confort extérieur, sur la température de surface et sur la consommation énergétique. En plus du bilan radiatif, des échanges convectifs thermiques et aérauliques, Solène-microclimat considère aussi l'inertie thermique des parois dans la simulation (Jeff, 2018 ; Redon , 2017)

Le flux solaire total capté par chaque facette du modèle urbain est déterminé par calcul. Ce flux étant la somme du flux incident direct et du flux diffus qui est calculé à partir d'un facteur de vue de ciel. Pour le bilan des inter-réflexions, Solène utilise la méthode de radiosit

restreinte aux réflexions diffuses et isotropes. Pour des modèles complexes, Solène est couplé à un modèle CFD pour la simulation des écoulements de l'air (Figure 5).

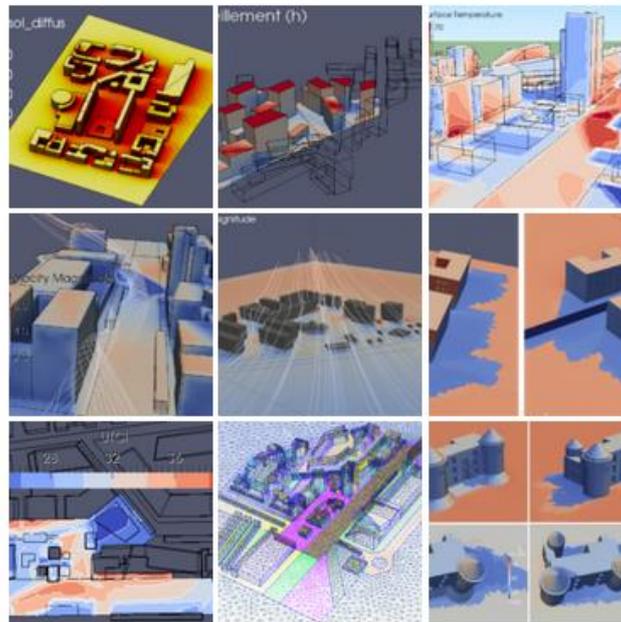


Figure 5: Résultats de simulation de microclimat urbain avec Solène (<https://solenemc.hypotheses.org>)

Ce logiciel a été utilisé dans plusieurs thèses de doctorat afin de simuler le microclimat urbain. A titre d'exemple :

-L'étude de Bozonnet (2005), qui consiste à définir par des simulations thermo-aérauliques l'interaction du microclimat urbain avec le bâti et sa demande énergétique de climatisation dans le cas d'une rue canyon. Le modèle choisi, de type zonal, nous permet de décrire les paramètres de température et de vitesse d'air dans la rue, avec un degré de précision intermédiaire entre la modélisation CFD fine et les approches nodales simplifiées. L'ensoleillement et les inter-réflexions dans la rue sont ensuite modélisés par une méthode simplifiée, développée et appliquée à l'étude de la convection naturelle dans une rue. Les écoulements dominants dus au vent sont par ailleurs étudiés à partir de données expérimentales, sur la base desquelles un modèle simplifié est proposé, en conditions isothermes. Le couplage des effets du vent et de la convection naturelle a été étudié dans le cas d'une rue canyon sur 28 jours. Nous concluons sur l'importance de la modélisation thermo-aéraulique pour la détermination de l'effet d'îlot de chaleur urbain, ainsi que la demande énergétique des bâtiments.

-De son part, Athamena (2012) a effectué une étude sur l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs, cas des éco-quartiers. Pour caractériser cet impact, il a développé une approche numérique basée sur un couplage entre un modèle CFD et un modèle thermo-radiatif. Les paramètres physiques simulés (température de surface,

température de l'air, vitesse du vent et énergie cinétique turbulente) permettant d'évaluer les indices de confort du milieu extérieur ont été comparés avec les données de mesure obtenues durant la campagne expérimentale EM2PAU (Nantes, 2010-2011) afin de valider la pertinence et la robustesse du modèle numérique développé. Il a par la suite appliqué le modèle numérique développé à trois configurations d'éco-quartiers représentatives d'une forme urbaine particulière afin d'analyser leurs impacts sur le confort extérieurs. Les résultats de cette étude ont été croisés avec ceux de l'étude des indicateurs physico-morphologiques menée en parallèle pour évaluer les effets de la géométrie urbaine sur les ambiances dans les espaces extérieurs.

Le nouveau Solène-microclimat offre des possibilités pour étudier l'impact de l'espace vert sur le microclimat, un nouveau modèle développé ces dernières années est en cour d'utilisation par plusieurs chercheurs.

I-1-4-Modèle TEB-SURFEX :

Selon le Centre National de Recherches Météorologiques en France (Le modèle TEB (Town Energy Balance) développé par (Masson, 2000), en se basant sur les équations physiques de conservation d'énergie et de matière (eau) il permet d'étudier les échanges d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et les villes, ainsi que la simulation de l'îlot de chaleur urbain dans une ville. Il permet aussi de simuler les consommations énergétiques pour la climatisation et le chauffage du bâtiment ainsi que les indices du confort humain (Figure). Ce modèle est inclus dans le système de modélisation SURFEX¹ (surface externalisée) et prend en compte dans sa modélisation plusieurs processus (à l'échelle des quartiers et à l'échelle des bâtiments). Parmi ces processus (Jeff, 2018 ; Redon , 2017) :

- ✓ Géométrie 3D de la ville ;
- ✓ Les flux radiatifs et le piégeage radiatif ;
- ✓ Conduction de chaleur à travers les toits, routes et murs ;
- ✓ Interception de l'eau de pluie, évaporation et ruissellement.
- ✓ Échanges turbulents et microclimat dans la rue ;
- ✓ Ombres sur et de la végétation et influence des jardins sur les formes urbaines
- ✓ Bilan d'énergie à l'intérieur des bâtiments et ajout des fenêtres

¹ **SURFEX** (Surface Externalisée) est la plateforme de modélisation de surface développée par Météo-France, résultat de l'externalisation des paramétrisations physiques de surface, de la préparation des paramètres spécifiques de surface requis par ces schémas physiques ainsi que l'initialisation de leurs variables d'état. **SURFEX**, qui rassemble l'ensemble des développements et améliorations apportés aux schémas de surface afin de les rendre disponibles au plus grand nombre, est conçu pour être couplé à des modèles atmosphériques et hydrologiques. Il inclut des modèles indépendants comme le modèle de surfaces continentales **ISBA** et son option carbone, **TEB** pour les zones urbanisées et **FLake** pour les lacs.

- ✓ Paramétrisation du chauffage et de la climatisation
- ✓ Indice de confort humain (à l'extérieur ou à l'intérieur)

Les bâtiments dans TEB ne sont pas reproduits avec leur géométrie exacte ; il suffit d'indiquer la largeur et la hauteur des bâtiments, ainsi que la largeur des rues de la ville étudiée (Figure 6). L'un des avantages de TEB est qu'il permet de réaliser des simulations numériques rapides sur des zones urbaines étendues. Un autre avantage est que ce modèle a été validé sur des différents sites du monde comme Marseille, Mexico, Montréal, Toulouse (Jeff, 2018 ; Redon , 2017).

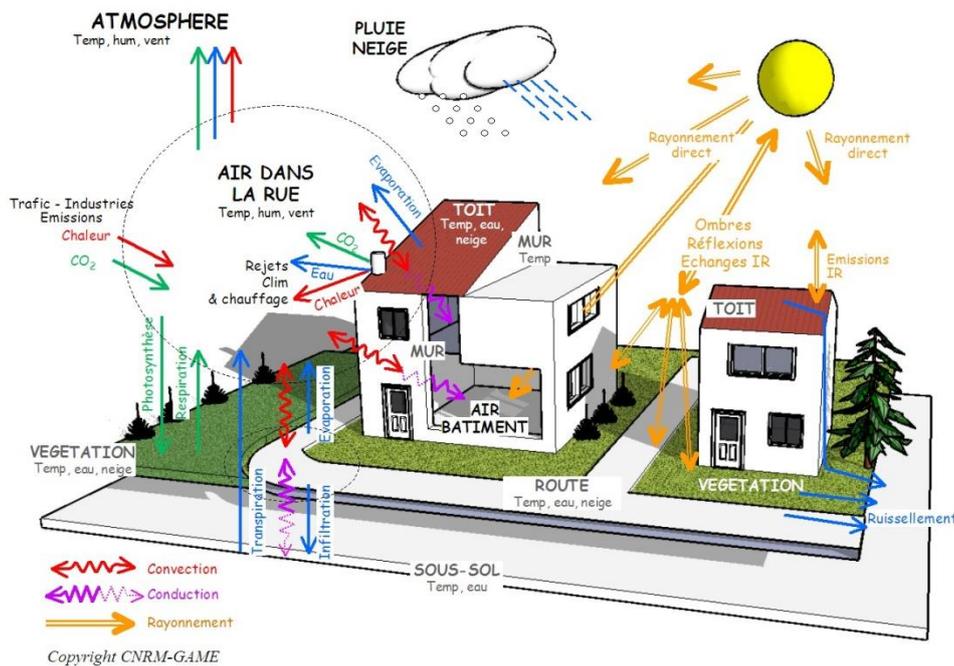


Figure 6: Echange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère dans TEB (www.cnrm.fr)

Dans l'étude de Lemonsu et al. (2012), la configuration initiale sans couplage TEB-ISBA et la nouvelle version TEB-Veg ont été confrontées à des données expérimentales issues d'une campagne de terrain. Des mesures in situ de paramètres microclimatiques et d'évapotranspiration ont été réalisées dans une cour bordée de bâtiments, très proche du concept de «canyon» appliqué dans TEB. La surface au sol est composée pour 80 % de gazon et 20 % de surface artificielle. L'étude montre de meilleurs résultats pour la simulation des températures radiatives des murs et des surfaces au sol, surtout la nuit quand les effets de piégeage radiatif sont dominants, dans le cas de l'agencement combinant pavement et pelouse. Le vent simulé en journée par TEB-Veg est aussi plus faible que si les jardins avaient été traités comme un espace ouvert (TEB-ISBA), ce qui représente bien l'effet du bâti sur la végétation. Cela contribue à diminuer le flux de chaleur sensible au profit du latent.

Finalement, TEB-Veg réussit à simuler des températures dans le canyon plus chaudes qu'au-dessus de la canopée urbaine, ce que ne permet pas TEB-ISBA.

Dans l'étude de (Redon, 2017), une paramétrisation spécifique a été mise au point pour modéliser les aspects radiatifs, thermiques, énergétiques et aérauliques liés à la présence d'arbres de rue en interaction avec l'espace urbain et les bâtiments. Une canopée arborée explicite a été intégrée au-dessus de la chaussée et des jardins dans l'approche «canyon urbain» appliquée dans TEB pour modéliser l'environnement urbain et l'ensemble des processus physiques associés. Le modèle d'Interaction Sol–Biosphère–Atmosphère a été utilisé pour représenter toutes les couvertures végétales et modéliser les processus physiologiques et énergétiques au sein de modèle TEB en interaction avec les surfaces bâties environnantes. Ils ont estimé en effectuant un exercice comparatif entre TEB et un modèle solaire et d'éclairage à haute résolution spatiale (SOLENE). Sur la base d'une géométrie idéalisée d'un canyon urbain avec différentes configurations de végétation (Redon, 2017).

I-2- l'approche paramétrique :

La conception à haute performance devient de plus en plus souhaitable dans le domaine de l'architecture, dans la pratique contemporaine, le développement rapide d'outils informatiques permet une interaction entre l'infographie 3D, les programmes de conception assistée par ordinateur et les outils logiciels adaptés à l'analyse de confort thermique.

Plus récemment, les outils de modélisation paramétrique ont introduit une nouvelle approche de la modélisation et de la conception auprès de la communauté architecturale. La modélisation paramétrique, par nature, est basée sur des données; les connexions et les changements entre les différents niveaux de données sont instantanés. Ce système offre de multiples avantages pour l'intégration de la conception et de l'analyse. La possibilité de visualiser les données d'analyse environnementale au sein de la plateforme de conception permet aux concepteurs d'établir un lien clair entre l'analyse des données et la conception.

Quelques programmes de modélisation visent à rapprocher le volume conceptuel et l'analyse environnementale au sein d'une même plateforme. Vasari intègre le volume conceptuel et l'analyse environnementale. Cependant, en tant qu'application basée sur la plate-forme Revit, la génération d'une géométrie complexe est limitée et la représentation des données est prescrite aux paramètres de l'application. Revit a également pris des mesures pour intégrer des composants de volume conceptuel dans la plate-forme existante. Récemment, il y a eu des développements pour inclure la simulation énergétique en tant que composant intégré de Revit 2014 (Kennedy et Kfoury, 2013). Cependant, tout comme Vasari, la modélisation de la

géométrie complexe présente des limites et l'application n'est généralement pas utilisée pour les études de forme avancées.

Pour l'analyse solaire et les simulations d'ombrage de surface et la quantité d'énergie de rayonnement solaire reçue sur une surface donnée, Rhino / Grasshopper est l'une des plateformes les plus utilisées actuellement par les concepteurs, le logiciel le plus intensivement et largement utilisé.

Il existe déjà un certain nombre de plugins environnementaux développés pour Rhino / Grasshopper. Cependant, Ladybug, honeybee et butterfly offrent plusieurs avantages qui ne sont actuellement pas offerts par les plugins de conception environnementale liés à Rhino / Grasshopper (Roudsari et al, 2013).

Ladybug importe des fichiers météo EnergyPlus standard (.EPW) dans Grasshopper et fournit une variété de graphiques interactifs 2D et 3D conviviaux pour soutenir le processus de prise de décision pendant les étapes initiales de la conception (Roudsari et al, 2013). Il simplifie également le processus d'analyse, automatise et accélère les calculs et fournit des visualisations graphiques faciles à comprendre dans l'interface de modélisation 3D de Rhino / Grasshopper (Figure 7).

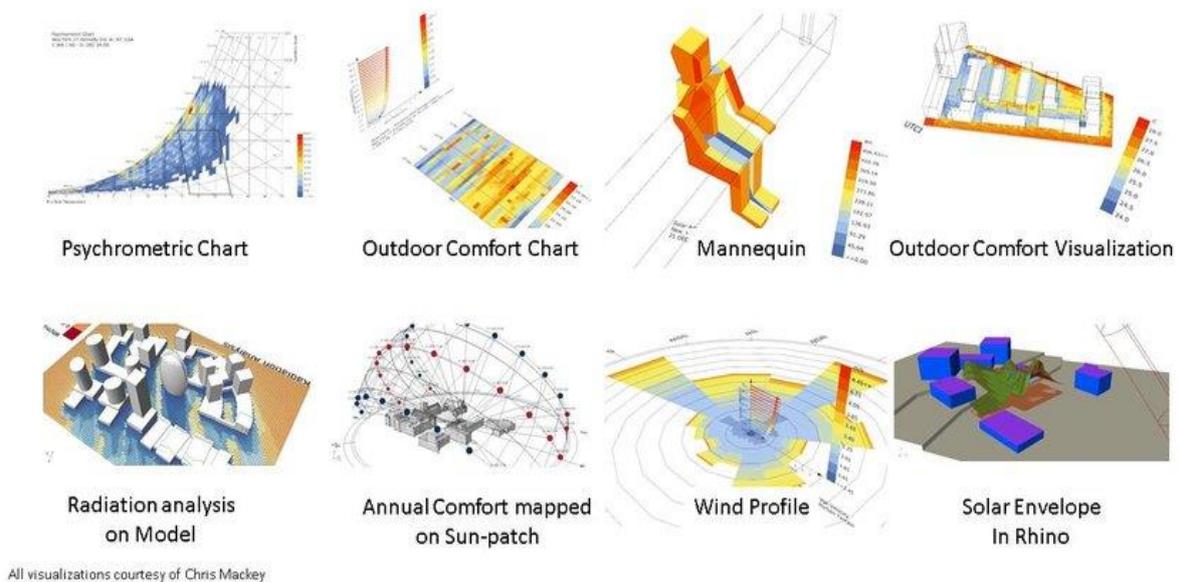


Figure 7: Exemple des outputs de Ladybug plug-in for Rhino (www.food4rhino.com)

Il permet également aux utilisateurs de travailler avec des moteurs d'énergie et d'éclairage naturel validés tels que EnergyPlus, Radiance et Daysim. L'intégration avec les outils paramétriques de Grasshopper permet une rétroaction presque instantanée sur les modifications de conception, et comme elle s'exécute dans l'environnement de conception, les informations et l'analyse sont interactives. Le développement est une source libre et ouverte;

les utilisateurs peuvent personnaliser l'outil en fonction de leurs besoins et contribuer au code source (Roudsari et al, 2013).

L'approche paramétrique offre un moyen susceptible pour analyser le confort thermique extérieur. L'utilisation d'algorithmes automatiques dans des logiciels appropriés s'est révélée être une contribution précieuse aux stratégies d'urbanisme visant à contrer les effets néfastes du climat urbain et des changements climatiques attendus (c'est-à-dire l'augmentation de la température) dans les villes.

Perini et al (2017) ont affecté une étude vise à identifier une méthode pour une estimation précise du confort thermique extérieur et de la température moyenne radiante TMR, à modéliser et à simuler les effets de la forme urbaine et de la végétation sur le microclimat des villes. Afin d'atteindre cet objectif principal, cette recherche intègre l'outil de simulation basé sur CFD ; ENVI-met et TRNSYS (Simulation de systèmes transitoires) au moyen de Grasshopper. Les résultats de l'étude démontrent la fiabilité de la méthode proposée, c'est-à-dire qu'une combinaison d'ENVI-met et de TRNSYS augmente la précision de simulation en termes de confort thermique extérieur, en particulier pendant la nuit. Cette méthode permet d'exploiter les potentialités d'ENVI-met et de TRNSYS pour le calcul des caractéristiques urbaines (forme urbaine, végétation, proportion de canyon, etc.) affectant le microclimat urbain (Perini et al, 2017).

Bajsanski et al (2016), ont étudié Effet de l'emplacement des arbres sur l'atténuation de l'ensoleillement dans un parking en utilisant Rhinoceros, Grasshopper, GHPython et Ecotect. Ils ont proposé un algorithme dont les entrées sont constituées de paramètres prédéterminés de la géométrie d'un parking, des arbres et des bâtiments environnants, où les ombres contribuent à atténuer la chaleur. L'algorithme optimise l'emplacement des arbres, visant à fournir un ombrage maximal des parkings, tout en laissant la zone de parking utilisable et la forme du parking intactes. L'article se concentre sur le paramétrage des éléments qui sont importants pour ce processus d'analyse ainsi que sur les calculs combinatoires. Ces calculs combinatoires sont basés sur des simulations solaires, qui sont effectuées, et prennent en compte les données climatiques et géographiques. L'algorithme est appliqué à plusieurs cas, illustrant des exemples du monde réel, ainsi que ceux basés sur des manuels d'instructions de conception et d'écologisation. Les résultats indiquent que l'emplacement des arbres estimé par l'algorithme augmente l'ombrage du parking, ce qui indique que l'algorithme diminue efficacement l'influence négative de la surchauffe urbaine (Bajsanski et al, 2016),.

Tandis que l'étude de Bajanski et al, (2015) vise à appliquer des algorithmes automatiques pour évaluer et améliorer le confort thermique extérieur non stationnaire dans les zones urbaines. Les effets de l'urbanisme sur les sensations thermiques sont analysés dans trois plans de rues urbaines linéaires et dans la disposition non linéaire des rues sans végétation à Novi Sad, en Serbie. Une analyse temporelle est effectuée pour les journées extrêmement chaudes et froides à l'aide de simulations de l'indice climatique universel (UTCI) dans le cadre du programme Grasshopper. Dans la future conception linéaire des rues, les fréquences des plus grandes situations de stress thermique diminuent considérablement les jours chauds d'été et augmentent légèrement les jours froids d'hiver. Les conceptions urbaines passées, présentes et futures de la rue linéaire sont comparées, et les plus fortes diminutions d'UTCI sont notées à 10h, 17h et 18h les jours chauds d'été à 11h les jours froids d'hiver. La future conception urbaine planifiée et proposée des rues linéaires et non linéaires est comparée, et les plus grandes diminutions d'UTCI sont notées à 10h le jour d'été et augmentent à 11h le jour d'hiver. L'augmentation de la hauteur et de la densité du bâtiment dans la future conception des rues modifiera l'environnement thermique. Les algorithmes automatiques proposés sont applicables à l'analyse du confort thermique humain dans divers modèles urbains et climats (Bajanski et al, 2015).

Milosevic et al (2017) ont présenté des possibilités pour l'amélioration du confort thermique extérieur dans les environnements urbains construits en utilisant les calculs de l'indice thermique universel du climat (UTCI). À cette fin, des algorithmes automatiques pour changer l'emplacement des corps, la hauteur des bâtiments et l'emplacement des arbres dans les aires de stationnement de la rue ont été développés et appliqués dans le logiciel Grasshopper (Ladybug plug-in). L'applicabilité des algorithmes a été testée dans un parking de rue réel dans une ville d'Europe centrale à titre d'exemple. Des analyses temporelles ont été effectuées pendant la période de canicule en 2015. Le confort thermique extérieur a été amélioré dans environ 66% des emplacements du corps pendant la période de canicule.

I-3- Approche par enquête :

Ce sont des études faites sur l'évaluation de confort thermique extérieur des usagers en se basant sur le questionnaire comme outils de collecte de données (la sensation des usagers dans un espace ouvert dans certaines conditions climatiques), l'analyse des données de questionnaire aide à situer l'état de confort ou de l'inconfort.

Ces études sont caractérisées par une approche transversale: cela signifie que chaque personne n'a participé à l'enquête qu'une seule fois. Le reste des études présente une approche

longitudinale selon laquelle un nombre limité de personnes ont été exposées à des conditions microclimatiques à différents moments au cours de l'étude sur le terrain. Ce type de recherche implique une gamme de personnes interrogées entre 8 et 36 personnes, tandis que les études transversales présentent une gamme plus large, entre 8 et 2700. Les lieux des entretiens étaient des espaces publics extérieurs, comme les parcs, les places et les zones piétonnes; quelques études seulement incluaient les zones suburbaines et les campus universitaires (Salata et al, 2016).

Une variation plus importante peut être observée dans la durée des enquêtes sur le terrain : entre un jour et une année entière. De nombreuses études ont porté sur plus d'une saison, généralement l'été et l'hiver, tandis que d'autres cas couvraient des périodes plus longues (soit une année entière). De ce point de vue, il est important de mettre l'accent sur le fait qu'environ la moitié des études ont constaté une différence saisonnière dans les plages de confort thermique et/ou de températures neutres (Salata et al, 2016).

-Une autre différence a été la structure du questionnaire : la majorité des études, posaient des questions sur la perception thermique (Comment vous sentez-vous maintenant?), différentes échelles de jugement subjectif ont été utilisées. L'échelle la plus courante est l'échelle ASHRAE à 7 points « très froid (-3), froid (-2), légèrement froid (-1), neutre (0), légèrement chaud (+1), chaud (+2), très chaud (+3) ». D'autres études utilisaient une échelle de cinq points et autres une échelle de neuf points. Une approche différente a ensuite été adoptée par Stathopoulos et al. (2004), qui ont demandé à donner une opinion sur certaines déclarations (« la température de l'air est élevée », « l'air est humide », « la force du vent est forte », « le rayonnement solaire est chaud ») à travers une échelle de 5 points allant d'un désaccord (-2) à un accord (+2) avec la possibilité de choisir une condition d'incertitude (0). La situation est différente pour ce qui concerne les enquêtes de Xi et al. (2012) et de Kantor et al. (2012): ils ont utilisé des échelles différentielles (continues) qui ont permis aux personnes interrogées de choisir entre des valeurs fixes, c'est-à-dire -1,5 (entre cool et légèrement cool).

Enfin, un choix différent, en ce qui concerne la perception thermique, a été fait par Sangkertadi (2012) et par ceux qui ont participé au projet REPUBLIC-MED (2012). La première utilisait une échelle de 7 points avec des valeurs allant de -2 (froid) à +4 (très chaud et très douloureux) où 0 correspondait à une neutralité thermique alors que dans le second cas, les sensations thermiques étaient notées sur une échelle de 7 points allant de +1 (trop froid) à +7 (trop chaud).

D'autre part, plusieurs études ont évalué au moins un indice pour l'examen du confort thermique, de la neutralité et de la préférence. De ce point de vue, l'indice le plus courant était le PET, SET* et PMV. L'utilisation des deux premiers indices a augmenté au cours des dernières années, tandis qu'une diminution des études qui ont adopté le PMV a été observée. La cause pourrait être que plusieurs études ont découvert une mauvaise corrélation entre le PMV et la perception thermique subjective [42-45]. Alors qu'un nombre limité des études qui ont calculé l'indice UTCI, mais il est probable que son utilisation augmentera progressivement parce qu'il s'agit d'un indice relativement nouveau (Salata et al, 2016).

II-Recherches menées sur l'impact de l'espace vert sur le climat urbain et la température de surface du sol à travers la télédétection :

La télédétection a offert aux chercheurs un moyen récent pertinent pour évaluer les différents phénomènes naturels tels que les problèmes hydrologiques, la pollution, les changements climatiques, les inondations, la couverture végétale...etc. C'est un bon moyen de gestion et de planification, permet aux décideurs de prévenir et planifier.

Cette technique a été fortement utilisée dans l'étude de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et sa mitigation par l'espace vert, surtout avec les informations offertes par les images satellitaires. Les images Landsat sont largement utilisées pour étudier la croissance de l'îlot de chaleur urbaine de surface et pour évaluer la relation entre le LST et l'usage du sol (land use/ land cover LU/LC). De plus, les données MODIS ont été utilisées pour analyser les différences quotidiennes de LST et ICU à Abu Dhabi. Des ICU nocturnes standard ont été trouvés dans la ville, tandis que pendant la journée, le centre-ville était plus frais que ses environs.

II-1-Recherches portées sur l'impact de l'espace vert sur la température de surface du sol (LST) et la mitigation de l'îlot de chaleur urbain via la télédétection :

L'étude de l'impact de l'espace vert sur le microclimat et la mitigation de l'îlot de chaleur urbain à travers la télédétection a fait l'objet de plusieurs études. Récemment, la technologie de télédétection à haute résolution est largement utilisée dans l'étude de l'îlot de chaleur urbain (ICU), Elle fournit des informations spatiales détaillées concernant les données de température du sol et de la végétation. Précisément, les données obtenues à partir de simples stations de mesure (Boudjellal & Bourbia, 2017; Zhang & coll., 2017). Le principe est de récupérer la température de surface du sol (LST) à partir de bandes thermiques de l'image satellitaire. Des études antérieures ont confirmé que les grandes zones urbaines sont plus chaudes que la périphérie (Kong et al., 2014). Ils confirment que les espaces verts urbains

peuvent former un effet d'îlot de refroidissement urbain (Urban Cool Island UCI) créé par les effets d'ombrage des arbres ou de transpiration qui sont affectés par les espaces verts et les surfaces d'eau. Cet effet peut être évalué en fonction de la différence entre la température des espaces verts et les alentours (Hongyu et coll., 2017). Récemment, ces études ont porté sur le rôle de la végétation urbaine dans l'atténuation de la température de surface, Ils prouvent que la LST peut être réduite en augmentant la surface des espaces verts et vice versa (Chen & Wong, 2006; Hamada & Ohta, 2010).

II-1-1-L'étude de (Weng et al, 2004)

Cette étude consiste à estimer la relation entre la température de la surface du sol et l'abondance de la végétation pour les études d'îlots de chaleur urbains de la ville d'Indianapolis aux états unis. (Weng et al, 2004) ont utilisé des images de Landsat 7 ETM+ datées de 22 juin 2002 pour extraire les carte de l'usage du sol en se basant sur la méthode de classification de vraisemblance maximum (maximum likelihood classification). La température de surface du sol et l'indice différentiel normalisé de la végétation sont aussi calculés à partir de ces images pour être corrélés afin d'avoir la relation entre les deux indices et évaluer l'impact de la végétation sur la température de surface.

-Les résultats montrent que le LST possédait une corrélation négative légèrement forte avec la fraction de végétation pour tous les types de couverture du sol à travers la résolution spatiale (30 à 960 m).

-Les corrélations ont atteint leur niveau le plus élevé à la résolution de 120 m, qui serait l'échelle opérationnelle des images LST, NDVI et de la fraction de végétation.

-L'analyse fractale de la texture de l'image montre que la complexité de ces images augmentait initialement avec l'agrégation de pixels et atteignait un pic d'environ 120 m, mais diminuait avec une agrégation supplémentaire.

La variabilité spatiale de la texture dans le LST était positivement corrélée avec celles du NDVI et de la fraction végétale. L'interaction entre la dynamique thermique et la dynamique de la végétation dans le contexte de différents types de couverture terrestre entraîne des variations de rayonnement spectral et de texture dans le LST. (Weng et al, 2004)

II-1-2-L'étude de (Cao et al, 2010) :

Cette étude a pour objectif l'identification de rôle des paramètres du parc (la taille du parc, les types d'usage des sols et la forme) dans le phénomène de l'îlot de refroidissement du parc (PCI), puis de développer un modèle d'estimation de cet îlot (PCI) pour aider les urbanistes à concevoir des parcs plus frais. Cao et al (2010) ont utilisé des données ASTER LST

télé-déectées (résolution spatiale de 90 m) pour représenter l'intensité de l'îlot de refroidissement (PCI) des parcs de Nagoya, au Japon, au printemps, en été et en automne. Données IKONOS (résolution spatiale de 4 m) pour analyser la relation entre l'intensité PCI et l'utilisation des terres.

Nagoya est la quatrième plus grande ville du Japon et est densément peuplée, avec une superficie de 326,45 km² et une population de 2,24 millions d'habitants. Le climat de Nagoya est maritime tempéré avec une humidité élevée et des changements saisonniers marqués. La température moyenne annuelle est de 15,4 °C avec un été chaud (25,2 °C), un printemps tempéré (13,6 °C) et un automne (17,6 °C) et un hiver relativement froid (5,2 °C).

La méthodologie consiste à utiliser les données Raster pour extraire la LST de 92 Parcs dans la zone d'étude, et calculer le PCI comme la différence entre LST moyen d'une zone urbaine dans la zone tampon de 500 m à l'extérieur d'un parc et LST moyen à l'intérieur du parc. Les chercheurs ont pris en considération l'impact de la forme du parc sur LST en calculant l'indice de forme du parc, et comparé la forme avec LST.

Les résultats de cette étude suggèrent que l'effet de refroidissement des parcs dépend des caractéristiques du parc (zones d'arbres et d'arbustes, forme) et des conditions de rayonnement saisonnier (voir figure). L'intensité de PCI à Nagoya est principalement déterminée par les zones d'arbres et d'arbustes du parc ainsi que par la compacité du parc (Figure 8). Les caractéristiques du parc jouent différents rôles au printemps, en été et en automne. Les arbres, les arbustes et la compacité du parc profitent au développement du PCI au printemps et en été, tandis que l'herbe et le sol peuvent diminuer le PCI au printemps. Aucun facteur significatif n'a été trouvé pour expliquer l'ICP en automne (Cao et al, 2010).

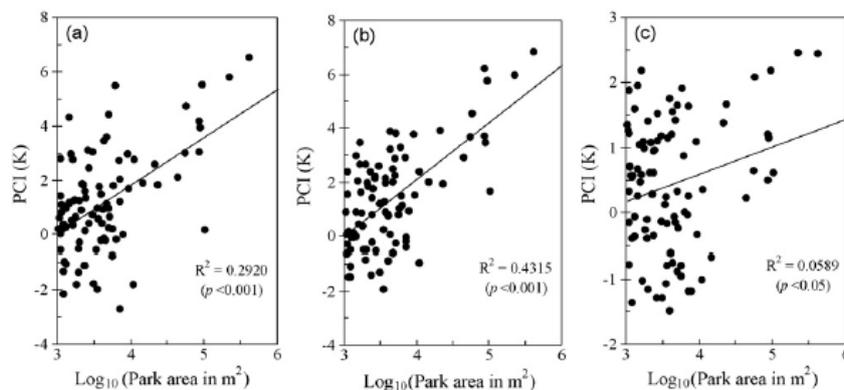


Figure 8: Relation entre l'intensité de PCI et la taille du parc, (a) printemps, (b) été, (c) automne (Cao et al, 2010).

II-1-3- l'étude de (Kong et al, 2014)

Selon Kong et al (2014), les espaces verts urbains peuvent réduire la température de l'air et de la surface, ils peuvent également générer un effet de refroidissement urbain (UCI), qui est un moyen efficace d'atténuer l'effet de l'îlot de chaleur urbain et de fournir un environnement extérieur confortable. Cet effet peut être déterminé par la moyenne de nombreux facteurs importants tels que le type, la densité, la taille et la forme des espaces verts et la zone d'ombre. Par exemple, les arbres sont plus efficaces que les arbustes qui, à leur tour, sont plus efficaces que l'herbe. Kong (2014) a prouvé qu'il existe un seuil de surface d'espace vert, si elle dépasse ce seuil, l'effet de refroidissement va se diminuer fortement.

II-1-4-l'étude de (Rasul et al, 2015)

Cette étude est portée sur la ville d'Erbil, la capitale de la région de Kurdistan en Iraq, une ville qui compte 1820000 h en 2010, et qui se caractérise par un climat tropicale/subtropicale semi-aride. Rasul a étudié la formation de l'îlot de refroidissement urbain de surface et la distribution spatiale de la température de surface dans la ville d'Erbil durant la période de 1^{er} juillet au 19 septembre 2013 en utilisant des images de LandSat 8 OLI/TIRS. Rasul et al (2015) a montré qu'il existe une relation inverse entre la densité du bâtiment et la température de surface. À l'intérieur du centre-ville et des quartiers à forte densité, la température de surface est réduite par rapport aux environs de la ville. Cependant, à la périphérie de la ville, dans les quartiers à faible densité de construction de logements, la température de surface est augmentée (voir ifigure). Il a montré aussi qu'une relation inverse très forte est évidente entre la température de surface et l'indice d'humidité ($r = 0,9$; $p < 0,01$). Une forte corrélation positive ($r = 0,75$; $p < 0,00001$) est évidente avec l'indice de luminosité. En revanche, entre la température de surface et l'indice de végétation, une corrélation négative modérée a été trouvée ($r = 0,39$; $p < 0,01$) pour une journée typique de saison sèche. Les résultats montrent que pendant la journée, les zones résidentielles du centre ville ont enregistré une LST de $46,2 \pm 1,74$ C (Figure 9). L'intensité de l'îlot de refroidissement urbain (UCI) de la ville a varié de $3,5$ °C à $4,6$ °C par rapport à une zone tampon de 10 km autour de la ville. Cette étude montre que pendant la saison sèche dans certaines villes, comme Erbil, l'humidité est le principal déterminant de l'effet de l'îlot de refroidissement urbain UCI, et non le couvert végétal (Rasul et al, 2015).

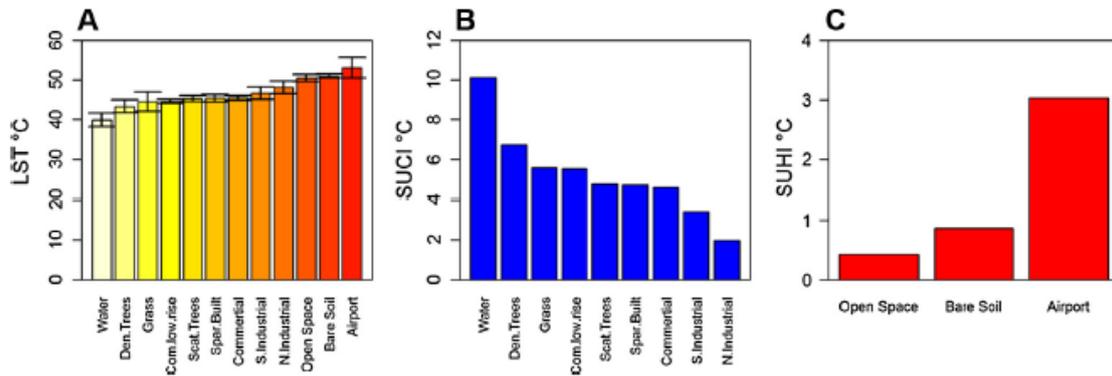


Figure 9: LST moyenne, îlot de refroidissement urbain et îlot de chaleur urbain dans les différents usages du sol (Rasul et al, 2015).

II-1-5-l'étude de (Boudjellal & Bourbia, 2017)

Cette recherche a pour objectif l'étude de l'effet de la végétation dans la formation d'un îlot de refroidissement d'Oasis (OCI) dans un climat sec, et vise à quantifier l'efficacité de la structure de l'oasis sur l'effet de refroidissement par une analyse comparative de deux modèles d'oasis: l'oasis traditionnelle (oasis de N'Goussa) et oasis moderne (Hassi Ben Abdellah). L'étude a été réalisée dans l'oasis de la ville de Ouargla qui est l'une des oasis sahariennes algériennes situées au sud-est du pays, à une altitude de 157 m. Le climat est extrêmement chaud en été, et il y a de courts hivers chauds; la température de l'air la plus élevée enregistrée dans la ville est de 53,5 ° C.

-Les données Landsat8 de la journée d'été la plus chaude ont été requises, traitées et analysées. De plus, toutes les palmeraies ont été classées et cartographiées à l'aide de la plateforme ArcGIS 10.2. Les résultats montrent que l'oasis traditionnelle a les valeurs les plus basses de température de surface du sol (LST), ce qui génère une forte intensité de refroidissement (OCI = -7,95 ° C) (voir figure). Dans l'oasis traditionnelle, la plantation d'une densité élevée (PD = 400p / ha) sur une petite parcelle (75,80 ha) prend une faible valeur de LST = 38,47 ° C; par conséquent, génère un fort OCI = -7,53 ° C. L'oasis moderne, où les palmeraies sont plantées avec une faible densité (PD = 100p / ha) sur une grande parcelle (468,24 ha), prend une valeur élevée de LST = 45,15 ° C et génère un faible OCI = -0,85 ° C. Cette découverte confirme que la densité de plantation est le principal facteur de couverture végétale. Cela réduit les valeurs LST plutôt que le paramètre de taille; en ce sens que le faible degré d'ouverture de la canopée (SVF = 0,25) fournit de l'ombre, ce qui est un processus important pour refroidir l'environnement et cela empêche l'évaporation directe de l'eau (Figure 10). De plus, l'intensité moyenne de l'effet de refroidissement (OCI = -2,73 ° C) est prononcée dans la classe des prairies, qui est totalement exposée au rayonnement solaire (SVF

= 1). Cela indique que la végétation dans l'oasis moderne refroidit l'environnement par le processus d'évaporation (Boudjellal & Bourbia, 2017).

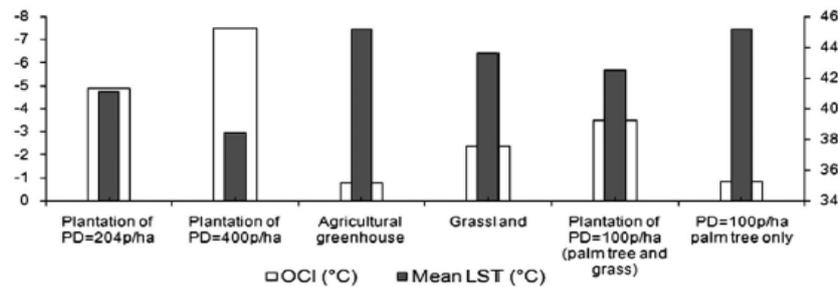


Figure 10: Relation entre LST moyenne et îlot de refroidissement d'Oasis en relation avec l'usage du sol (Boudjellal & Bourbia, 2017)

II-1-6-l'étude de (Chun & Guldmann, 2018)

Les chercheurs ont mis l'accent sur les changements saisonniers des impacts du toit et des façades des bâtiments, des canyons urbains, des plans d'eau, de la végétation et du rayonnement solaire sur l'intensité de l'ICU. Dans une étude de cas de la zone centrale de Columbus, en Ohio aux États-Unis. Les diverses entrées 2D et 3D, ainsi que les températures de la surface du sol estimées à l'aide d'images télédéteectées, sont capturées dans une grille spatiale et utilisées dans des analyses de régression spatiale. Les températures de surface du sol (LST) sont estimées à l'aide des données de télédétection de Landsat Thematic Mapper (TM), avec une résolution spatiale de 30 m. Les données satellitaires sont également utilisées pour calculer l'indice de végétation différentielle normalisé (NDVI), un indicateur largement accepté de la densité et de l'état de la végétation. Une autre variable 2D importante est la superficie des plans d'eau (WAT), qui devraient avoir des effets de refroidissement. Ces zones sont calculées pour chaque cellule de 30 m, sur la base d'une couverture d'utilisation du sol SIG. Les plans d'eau couvrent 3,24% de la zone d'étude. Les données LiDAR et les empreintes SIG des bâtiments sont utilisées pour développer un modèle de ville 3D, afin de dériver des facteurs de topologie et de géométrie pour l'environnement bâti. Les données LiDAR, recueillies au cours de la période 2006-2008, aident à calculer la hauteur de chaque bâtiment, et les empreintes SIG des bâtiments, distribuées par le comté de Franklin en 2008, aident à délimiter chaque limite de bâtiment.

Les résultats des estimations confirment les effets opposés de la verdure, mesurée par NDVI, sur les températures estivales et hivernales. Les modèles estimés sont ensuite utilisés pour simuler les changements saisonniers des températures résultant d'une stratégie d'écologisation urbaine potentielle impliquant les toits verts, l'écologisation des parcs de stationnement et

autres espaces vacants, et la densification de la végétation. Le facteur de vue du ciel (SVF), un proxy pour les effets de canyon urbain, a également des effets négatifs plus forts pendant les mois les plus chauds (sauf en août). L'effet de refroidissement des zones d'eau (EAU) est plus faible d'octobre à février (Figure 11).

Les résultats montrent aussi que l'augmentation de la verdure réduit les températures en été et les augmente en hiver (voir figure), démontrant ainsi que les politiques de verdissement et d'utilisation des terres conçues pour atténuer l'ICU doivent tenir compte des effets saisonniers pour atteindre l'efficacité à long terme (Chun & Guldmann, 2018)

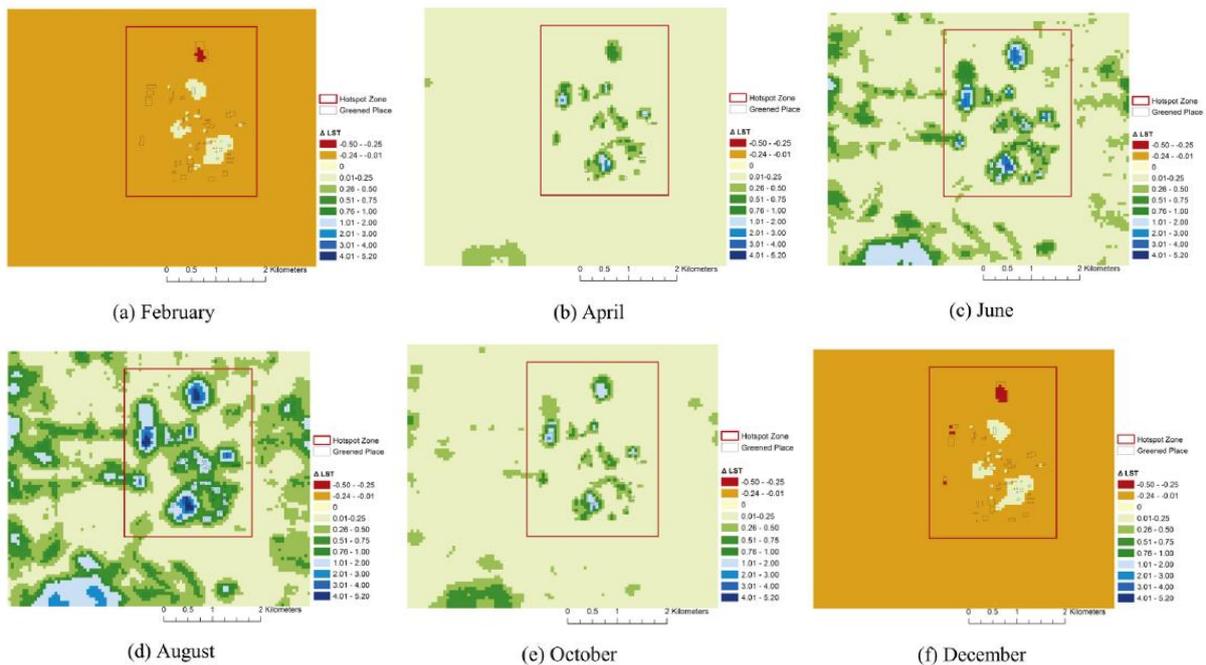


Figure 11: Impacts spatiaux de l'espace vert sur les changements de température (Chun & Guldmann, 2018).

II-2-recherche sur l'impact de la configuration spatiale et les changements spatio-temporels de l'espace vert sur le microclimat à travers les métriques paysagères:

Les récents développements en écologie du paysage ont permis de caractériser la composition et l'agencement spatial et de relier quantitativement l'hétérogénéité spatiale des espaces verts à ses effets de refroidissement.

Les patterns² du paysage sont définis comme la composition et l'arrangement spatial de divers éléments du paysage de différentes tailles et formes, qui influencent fortement les processus et

² Selon le dictionnaire Larousse, le Pattern est un modèle spécifique représentant d'une façon schématique la structure d'un comportement individuel ou collectif. Le mot anglais « pattern » est souvent utilisé pour désigner un modèle, une structure, un motif, un type, etc. Il s'agit souvent d'un phénomène ou d'une organisation que l'on peut observer de façon répétée lors de l'étude de certains sujets, auquel il peut conférer des propriétés caractéristiques.

les caractéristiques écologiques. Quatre éléments de base sont utilisés pour définir les patterns du paysage: nombre, taille, forme et juxtaposition des patches; les patterns spatiaux sont quantifiés à l'aide de mesures du paysage. Ce sont des contributeurs importants à l'interprétation des patterns spatiaux et des processus écologiques. Les métriques du paysage sont des approches quantitatives couramment utilisées dans l'analyse des patterns. La plupart de ces métriques sont développés au niveau du patch paysager, en utilisant une relation périmètre-zone.

Plusieurs études ont été menées par plusieurs chercheurs dans les zones climatiques différentes avec des méthodologies différentes pour étudier l'impact des patterns spatiaux de l'espace vert sur son effet de refroidissement, parmi ces études on cite :

II-2-1-L'étude Chen et al (2014) :

-Objectif de l'étude : étudier les effets saisonniers et les effets des patterns spatiaux verts urbains sur l'îlot de refroidissement urbain en utilisant la télédétection en Chine.

-Contexte d'étude : Pékin est situé dans le nord de la Chine à 39,9°N, 116. 3°E, elle a un climat continental humide influencé par les moussons, caractérisé par des étés chauds et des hivers froids, venteux et secs. La température moyenne de jour en janvier (généralement le mois le plus frais) est d'environ 1 ° C, tandis qu'en juillet (généralement le mois le plus chaud) est supérieure à 30 ° C.

-Méthodologie de travail : Les espaces verts urbains ont été extraits d'une image de Quickbird (Une image Quickbird (QB) prise le 5 juillet 2002, avec 4 canaux multispectraux (résolution, 2,52 par 2,53 m) et 1 canal panchromatique (résolution, 0,63 m) ont été utilisés pour la cartographie des espaces verts urbains), et ont été classés comme Arbres, Arbustes, Herbe, Cultures, Rivière et Lake. Les températures du sol (LST) ont été dérivées de quatre images de Landsat 7ETM+, les dates d'acquisition des images étaient le 22 mai, le 9 juillet, le 13 octobre et le 14 novembre. Le 22 mai représentait le printemps, la saison sèche et chaude. Le 13 octobre et le 14 novembre représentaient respectivement l'automne et l'hiver, les saisons plus fraîches. Le 9 juillet représentait l'été, la saison chaude et humide. Il n'y avait pas de pluie ni de vent fort pour au moins 4 jours avant la date d'acquisition du LST. La vitesse moyenne du vent est inférieure à 2 m.s pour la date de récupération, sans précipitations .Ces dates ne sont pas plus de 4 mois à compter de la date d'acquisition de l'image QB qui a été utilisée pour la cartographie de l'espace vert urbain. Les îlots de refroidissement urbain étaient ont été représenté par le LST minimum de chaque patch vert urbain.

-Les indices utilisés sont comme suite : La superficie des parcelles (PA) est une mesure de la composition, qui montre la taille de chaque patch vert urbain, et est également une quantité prescriptive utilisée par les décideurs. L'indice de forme (SI), la dimension fractale (FD) et le rapport périmètre-surface (PAR) sont des mesures de forme, dont les performances ont été comparées. SI fait référence à la forme d'un cercle. SI approche de 1 pour un patch avec simple forme de cercle. SI Supérieur à 1 indique que la complexité du patch est élevée. De même, FD décrit la fractalité ou la complexité d'un patch faisant référence à un carré, et il « approche de 1 pour les formes avec des périmètres très simples comme les carrés, et approche de 2 pour les formes avec un remplissage de plan très compliqué. Le PAR est simplement le rapport entre le périmètre et la superficie. Le TE est une mesure de bord qui équivaut au périmètre d'un patch au niveau du patch. Ces mesures de forme et de bord représentent toutes des configurations de l'espace vert urbain.

Les résultats de l'étude : ils montrent que non seulement la taille des patches mais aussi leur forme, leur bordure ou leur connectivité ont des effets sur les ilots de refroidissement urbain. Les effets varient considérablement selon les saisons et les types de l'espace vert. Autrement dit, la répartition spatiale des patches verts urbains avait des effets significatifs sur leurs ilots de refroidissement urbain en quatre saisons. En détail, la taille, la bordure et la connectivité des espaces verts urbains ont tous eu un effet négatif sur les ilots de refroidissement urbain, et l'influence était plus forte pendant les saisons chaudes. La forme des espaces verts urbains a également eu des effets sur les ilots de refroidissement urbain, mais les effets étaient plus forts pendant les saisons froides. De grandes différences ont été constatées entre les valeurs prédictives des mesures pour les différents types d'espaces verts. Les mesures de la forme étaient plus importantes pour indiquer les ilots de refroidissement urbain des rivières, des arbres et des cultures que la taille des patches et la connectivité. Toutefois, les mesures de la taille des patches et de la connectivité sont plus efficaces pour déterminer les indices de conservation des arbustes, de l'herbe et des lacs que les mesures de la forme. De plus, parmi les mesures de forme, seul l'indice de forme était un bon indicateur des ilots de refroidissement urbain. Les résultats de cette étude suggèrent qu'une combinaison de types de l'espace vert urbain spécifique et de mesures de forme est une condition préalable à l'analyse de l'influence des patterns des espaces verts urbains sur les ilots de refroidissement urbain et à la conception de l'espace vert (voir tableau)

II-2-2-L'étude de Asgarian et al (2014) :

-Objectif de l'étude : Ils ont étudié comment et dans quelle mesure la température de la surface de sol (LST) est affectée par le pattern spatial de la couverture végétale dans un environnement urbain à Isfahan, en Iran

-Contexte d'étude : une cité qui se situe dans une zone désertique à été chaud et sec. La température moyenne annuelle et les précipitations de la zone d'étude en l'an 2000 sont de 16,5 °C et de 125 mm, respectivement.

-Méthodologie de travail : Pour matérialiser les effets du pattern spatial de la couverture végétale sur LST, les données d'images Landsat 7 ETM⁺ du 5 mai 2002 ont été acquises pour être traitées pour l'estimation de LST et pour générer des cartes de l'usage du sol (land use/land cover LU/LC). Compte tenu de cinq pour cent du nombre total de cellules disponibles avec une distribution aléatoire dans les zones bâties, le lien entre LST et la composition, la configuration et la structure de la classe de couverture végétale a été quantifié

-Les indices utilisés sont comme suite : Cinq mesures de paysage au niveau du patch, y compris la distance la plus proche (nearest distance ND), la zone du patch (patch area AREA), le périmètre à la zone (perimeter to area PARA), l'indice de forme (shape index SHAPE) et l'indice de la zone centrale (core area index CAI) ont été choisies et appliquées comme expliquant les variables dans les analyses statistiques en raison de leur effets potentiels sur LST.

-Les résultats de l'étude : les résultats de cette étude ont révélé que toutes les valeurs métriques du paysage de la classe de couverture végétale étaient significativement corrélées à leurs points d'échantillonnage LST les plus proches, parmi lesquels un lien plus fort a été observé entre ND ($r = 0,611$, $p < 0,05$) et LST par rapport à autres. Un modèle de régression linéaire multiple basé sur une méthode de modélisation additive généralisée par étapes a ensuite été ajusté à l'ensemble de données et a abouti à l'élaboration du modèle ($r^2 = 0,41$, $p < 0,05$), expliquant la relation entre le modèle spatial de la couverture végétale et LST.

Donc cinq mesures du paysage (ND, SHAPE, AREA, PARA et CAI) ont été utilisées pour quantifier les effets des zones de la couverture végétale sur leur LST la plus proche. Les résultats indiquent que si la valeur métrique de la ND diminue, la LST diminuera. À proprement parler, un pattern dispersé plus homogène de taches de couverture végétale autour des zones bâties, une fonction d'atténuation plus forte de LST. Il en résultera donc une diminution des effets négatifs de l'îlot de chaleur urbain. Contrairement à la métrique ND, l'AREA a été négativement corrélée à LST. Par conséquent, l'augmentation de la superficie

des zones d'espace vert dans la zone bâtie entraînera une diminution de LST. Plus précisément, il convient de noter que la zone, en raison de la composition des zones d'espaces verts, est un autre facteur qui contribue à la LST (Figure 12).

Selon Asgarian et al (2014), cette étude pourrait fournir un niveau de connaissances supplémentaire grâce auquel les urbanistes peuvent optimiser la composition, la configuration et la structure des plaques de couverture verte pour atténuer les effets néfastes du phénomène LST, en particulier lorsque l'urbanisation est toujours en cours.

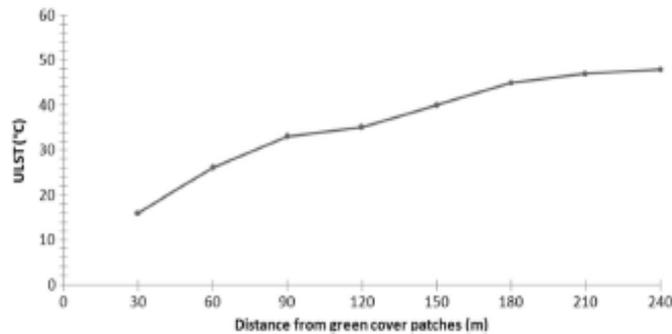


Figure 12: Mesure de LST le long du gradient urbain (Asgarian et al, 2014)

II-2-3-L'étude de Kong F et al, (2014)

-Objectif de l'étude : (1) étudier la sensibilité de l'effet de refroidissement associé à l'espace vert aux changements d'échelle; (2) identifier les îlots de refroidissement urbain (UCI) associées aux espaces verts – îlots de refroidissement des espaces verts (GCI) - et identifier toute relation entre les GCI et les patterns spatiaux des espaces verts; et (3) caractériser l'intensité des effets des îlots de refroidissement des espaces verts (GCI).

-Contexte d'étude : la ville de Nanjing, la capitale de la province du Jiangsu, en Chine, est située sur le bord ouest du fleuve Yangtze, la ville a un climat de mousson subtropical avec quatre saisons et une température annuelle moyenne de 15 °C

-Méthodologie de travail : Pour atteindre l'objectif visé, Kong et al, (2014) a utilisées des images IKONOS (18 juin 2009, quatre bandes, résolution spatiale de 3,2 m), des images Landsat TM 5 (13 juin 2009) et des données météorologiques. Les images IKONOS sont utilisé pour extraire la carte de l'usage du sol, cette carte a été classée en six types: surface imperméable, végétation forestière (arbres avec arbuste et herbe), autre végétation (arbuste et herbe), eau, terres agricoles et terre de Barren, pour effectuer une analyse de fenêtre mobile, les données vectorielles d'utilisation du sol ont été converties en un format de grille avec une taille de cellule de 5 m × 5 m. Les images de Landsat 5TM sont utilisées pour extraire la température de surface du sol (LST).

-Les indices utilisés sont comme suite : Onze mesures spatiales du paysage ont été choisies pour quantifier le pattern spatial de l'espace vert et pour analyser la relation entre ces patterns et l'îlot de refroidissement de l'espace vert GCI à savoir : la zone de classe (CA), Pourcentage de paysage (PLAND), densité des patches (PD), nombre des patches (NP), Taille moyenne des patchs (MPS), l'indice d'agrégation (AI), indice de plus grand patch (LPI), indice de forme de patch moyen (SHAPE_MN), rapport de zone de périmètre moyen pondéré par zone (PARA_AM), indice de diversité de Shannon (SHDI) et rayon de giration moyen pondéré par zone (GYRATE-AM).

-Les résultats de l'étude : les résultats de cette étude montrent que :

- (1) Les zones avec un pourcentage plus élevé de végétation forestière subissent un effet de refroidissement plus important et une augmentation de 10% de la superficie de végétation forestière a entraîné une diminution d'environ 0,83 °C de la température de surface;
- (2) Une analyse de corrélation entre la taille moyenne des patches, la densité des patches et un indice d'agrégation de la végétation forestière avec réduction de la température a montré que pour une quantité fixe de végétation forestière, les espaces verts fragmentés fournissent également un refroidissement efficace;
- (3) Le pattern spatial des îlots de refroidissement urbain était fortement corrélé avec les patterns d'espaces verts; une configuration spatiale des espaces verts de l'île continentale a fourni un moyen efficace d'améliorer les effets de refroidissement;
- (4) l'intensité de l'effet de refroidissement se reflétait dans les caractéristiques des îlots de refroidissement. Ces résultats soutiendront une meilleure prédiction des effets de quantités spécifiques et des arrangements spatiaux des espaces verts, aidant les gestionnaires et les planificateurs de la ville à atténuer l'augmentation des températures associées au changement climatique.

II-2-4-l'étude d'Estoque et al (2016) :

-Objectif de l'étude : L'étude visait à examiner la relation entre la température à la surface du sol (LST) et l'abondance et la configuration spatiale des surfaces imperméables et des espaces verts dans les régions métropolitaines de Bangkok (Thaïlande), de Jakarta (Indonésie) et de Manille (Philippines).

-Contexte d'étude : Les zones d'étude comprennent les noyaux des villes de Bangkok, Jakarta et Manille. Chaque zone d'étude couvre un paysage de 50 km × 50 km, avec un rayon de 25 km du centre-ville, pointu au centre du quartier central des affaires de chaque ville. Ces trois régions métropolitaines sont toutes situées dans les zones côtières de l'Asie du Sud-Est. Le

climat dans ces villes est caractérisé par deux saisons prononcées: humide et sèche. Les paysages de ces trois villes sont une mosaïque de terres bâties (surfaces imperméables), de terres cultivées, de pelouse, de forêts et de plans d'eau, qui comprennent des parties de la mer, des lacs, des rivières et des étangs.

-Méthodologie de travail : ils ont utilisé des images (Landsat-8 OLI / TIRS), toutes acquises en 2014 pendant la saison sèche pour calculer la température de surface du sol. Les cartes de l'usage du sol sont classées en quatre catégories : les surfaces imperméables, les espaces verts, l'eau et autres. Par la suite, d'Estoque et al (2016) ont extrait les masses d'eau des images en utilisant l'indice de différence d'eau normalisé modifié (MNDWI), puis ils ont appliqué la méthode de seuillage optimale d'Otsu (Otsu, 1979) pour séparer l'eau des zones non aquatiques. La méthode d'Otsu a également été appliquée avec succès dans d'autres études.

Cette analyse examine l'influence des surfaces imperméables et espaces verts sur LST à Bangkok, Jakarta et Manille basés sur des grilles polygonales. Différentes tailles de grilles polygonales ont été utilisées, c'est-à-dire en pixels: 3×3 ; 4×4 ; 5×5 ... 13×13 . Une fois que ces ensembles de grilles ont tous été préparés, le LST moyen et la densité de la surface imperméable et des espaces verts dans chaque grille ont été calculés. Les grilles qui ne contenaient que de l'eau et / ou des «autres» n'ont pas été incluses dans l'analyse.

-Les indices utilisés: Cette analyse se concentre sur la compréhension de quelles caractéristiques spatiales des patches des surfaces imperméables et des espaces verts sont susceptibles d'avoir influencé la variabilité spatiale du LST à Bangkok, Jakarta et Manille. À cette fin, ils ont divisé chaque zone d'étude en grilles polygonales de 3 km. Un total de 60 grilles polygonales sélectionnées au hasard pour chaque zone d'étude ont été utilisées pour découper la carte de l'usage du sol de chaque zone d'étude. Les chercheurs ont sélectionné trois métriques spatiales au niveau de la classe, une pour la taille (Taille moyenne des patches AREA_MN), la complexité de la forme (Indice de forme moyen SHAPE_MN) et l'agrégation ou la compacité (indice d'agrégation AI). Ces mesures ont été calculées à l'aide du logiciel Fragstats v4.2.1, en utilisant la règle de voisinage à 8 cellules

-Les résultats de l'étude : les résultats de l'étude montrent :

1) une forte corrélation significative entre le LST moyen et la densité des surfaces imperméables (positives) et des espaces verts (négatifs) le long des gradients urbain-rural des trois villes. La corrélation de la densité de surface imperméable avec le LST moyen tend à augmenter dans les grilles plus grandes, tandis que la corrélation de la densité de l'espace vert avec le LST moyen tend à augmenter dans les grilles plus petites, indiquant une influence plus

forte de la surface imperméable et des espaces verts sur la variabilité du LST dans les zones plus petites, respectivement.

2) La taille, la complexité de la forme et l'agrégation des patches de surface imperméable et d'espace vert avaient également des relations significatives avec le LST moyen, bien que l'agrégation ait la corrélation forte la plus constante. En moyenne, le LST moyen de la surface imperméable est supérieur d'environ 3 ° C à celui des espaces verts, ce qui met en évidence le rôle important des espaces verts dans l'atténuation des effets de l'îlot de chaleur urbain, un important service écosystémique urbain.

3) Les résultats suggèrent également une superficie caractéristique optimale ou une empreinte climatique terrestre (210 m × 210 m) qui peut être utilisée pour examiner tout problème météorologique, climatique ou environnemental dans les zones urbaines ou pour le paysage et l'urbanisme (Figure 13).

4) Dans l'ensemble, cette étude fournit des preuves des effets de la composition et du modèle du paysage sur la variabilité du LST dans les mégapoles de l'Asie du Sud-Est.

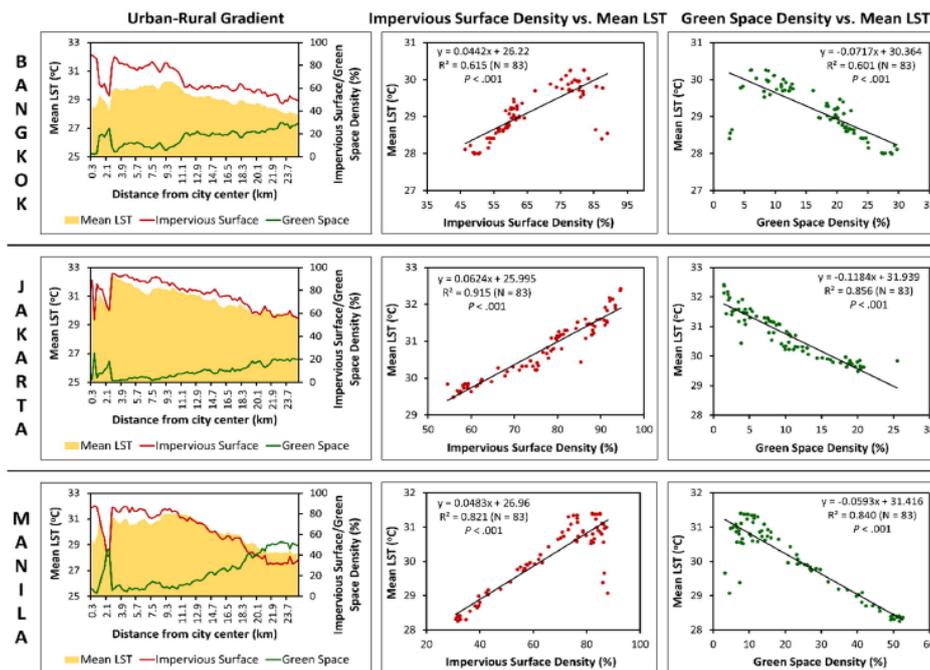


Figure 13: Relation entre la densité des surfaces imperméables et espaces verts et LST moyenne de 3 villes, (Estoque et al, 2016).

II-2-5-l'étude de Masoudi et al (2019) :

-Objectif de l'étude : examiner les relations entre les patterns spatiaux et l'effet de refroidissement de l'espace vert urbain à Singapour (Malaisie) de 1973 à 2015 en utilisant une gamme de méthodes statistiques et spatiales.

-Contexte d'étude : Singapour (Malaisie), La ville a un climat tropical avec une température uniforme tout au long de l'année allant de 26,4 à 28,3 °C (moyenne mensuelle), des précipitations annuelles moyennes de 2166 mm et une humidité relative moyenne de 83,5%.

-Méthodologie de travail : Cinq images satellitaires utilisées dans cette étude ont été acquises le 17 octobre 1973 (Landsat MSS), le 11 mars 1991 (Landsat TM), le 3 septembre 1997 (Landsat TM), le 28 janvier 2005 (Landsat TM) et le 25 février 2015 (Landsat OLI/TIRS). Les images ont été sélectionnées pour être aussi exemptes de nuages que possible. Idéalement, les images devraient également être utilisées à partir de la même période de l'année. Cinq images satellitaires utilisées dans cette étude ont été acquises le 17 octobre 1973 (Landsat MSS), le 11 mars 1991 (Landsat TM), le 3 septembre 1997 (Landsat TM), le 28 janvier 2005 (Landsat TM) et le 25 février 2015 (Landsat OLI). Les images ont été sélectionnées pour être aussi exemptes de nuages que possible. Idéalement, les images devraient également être utilisées à partir de la même période de l'année, les images Landsat ont été utilisées pour dériver des cartes de l'usage du sol et de température de surface des terres (LST).

-Les indices utilisés sont comme suite : l'indice d'agrégation (**agregation index AI** est le nombre de contiguités similaires impliquant la classe correspondante, divisé par le nombre maximal possible de contiguités similaires impliquant la classe correspondante, qui est atteint lorsque la classe est agrégée au maximum en un seul patch compact; multiplié par 100 pour convertir en pourcentage), Distance euclidienne du plus proche voisin pondérée en fonction de la surface (Area-weighted Euclidean nearest neighbour distance ENN_AM), Indice de dimension fractale pondéré par zone (Area-weighted fractal dimension index FRAC_AM est La dimension fractale du patch pondérée par la zone relative du patch, une mesure de la complexité de la forme des patches individuels), Taille moyenne des patches pondérée par zone (Area-weighted mean patch size AREA_AM), Indice de forme moyen pondéré par zone (Area-weighted mean shape index SHAPE_AM), Zone de classe (Class area CA est Superficie totale de tous les patches du même type), Densité des bords (Edge density ED est La longueur totale des bords d'un type de patch donné par unité de surface (hectare), une mesure de la complexité globale de la forme), indice de forme du paysage (Landscape shape index LSI est Un rapport périmètre-surface modifié, une mesure de la complexité globale de la forme des patches d'un type donné), indice de plus grand patch (Largest patch index LPI est la superficie du plus grand patch d'un type de patch donné divisée par la superficie totale du paysage, une mesure de dominance), Distance euclidienne moyenne du plus proche voisin (Mean Euclidean nearest neighbour distance ENN_MN est la distance en ligne droite la plus

courte entre le patch focal et ses voisins, une mesure d'isolement / connectivité), Taille moyenne des patches (Mean patch size MPS est la surface moyenne de tous les patches d'un type donné), nombre des patches (Number of patches NP est Le nombre de patches d'un type de patch donné, une mesure de la fragmentation), densité des patches (Patch density PD est le nombre de patches d'un type donné par unité de surface, une mesure de la fragmentation), Pourcentage de paysage (Percentage of landscape PLAND est la proportion d'un paysage occupé par des patches d'un type donné, une mesure de dominance).

-Les résultats de l'étude : les résultats ont montré que (voir figure)

- (1) quatre mesures de PLAND, SHAPE_AM, PD et ENN_AM pourraient quantifier efficacement le pattern de l'espace vert urbain et ses relations avec LST au fil des ans;
- (2) en plus de la quantité de l'espace vert urbain (composition), quatre aspects de la configuration de l'espace vert urbain ont considérablement influencé le LST au fil des ans, à savoir la taille du patch, la complexité de la forme, l'agrégation, la fragmentation et la connectivité;
- (3) l'importance relative de la composition par rapport à la configuration peut dépendre du pattern de l'espace vert urbain existant;
- (4) des correctifs relativement plus grands, de forme plus simple, plus connectés et moins fragmentés étaient associés à un LST plus faible (Figure 14).

De ce fait Masoudi et al (2019) ont confirmé l'importance des résultats et des informations qu'ils fournissent sur l'optimisation du pattern de l'espace vert urbain pour des effets de refroidissement plus élevés.

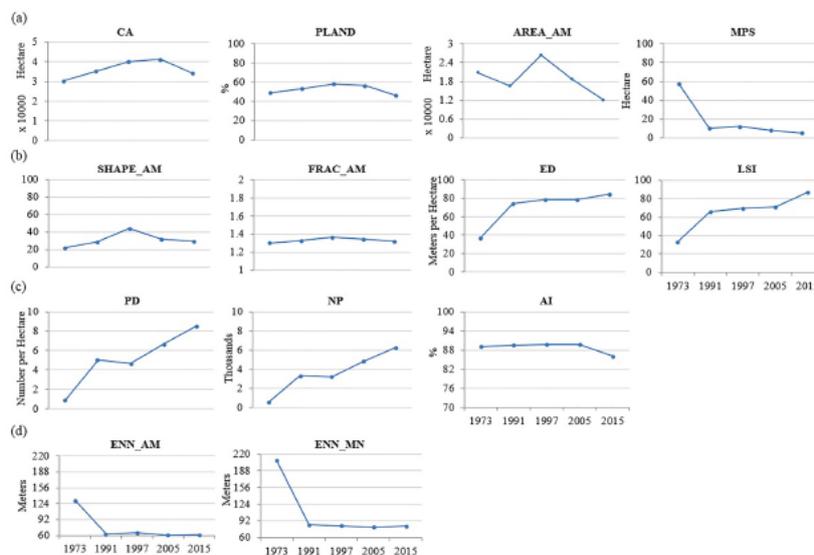


Figure 14: Changements dans la composition et la configuration de l'espace vert urbain à Singapour de 1973 à 2015 (Masoudi et al, 2019)

II-2-6-l'étude d'Amani-Beni et al (2019) :

-Objectif de l'étude : étudier l'extension de l'effet de refroidissement du parc dans la zone environnante. Ils ont examiné les modèles spatiotemporels de la composition des espaces verts urbains et dans les environs du Parc, en relation avec les changements de température à la surface des villes entre 2000 et 2015.

-Contexte d'étude : le Parc forestier olympique à Pékin la capitale de la Chine et la troisième ville la plus peuplée du monde. La ville a un climat continental humide influencé par la mousson. Le parc forestier olympique, d'une superficie de 1000 hectares, a été construit pour les Jeux olympiques mondiaux de 2008 dans le nord de la zone urbaine de Pékin et est devenu un haut lieu des loisirs et du tourisme. Il est couvert d'arbres à feuilles caduques et persistantes, d'herbes, d'arbustes et d'un lac artificiel en forme de dragon. La zone tampon du parc comprend principalement des espaces verts, des bâtiments, des routes, etc.

-Méthodologie de travail : Amani-Beni et al (2019) ont choisi une zone tampon de 5km tout autour de ce parc, le diamètre de la zone tampon a été déterminé comme étant légèrement plus grand que le plus grand diamètre du parc, car l'objectifs était d'étudier l'extension de l'effet de refroidissement du parc dans la zone environnante.

Les données de température de surface terrestre de la zone d'étude de 2000 à 2014 ont été dérivées des bandes infrarouges thermiques (TIR) de Landsat 7 ETM⁺ et Landsat 8 OLI/TIRS avec une résolution spatiale de 30 m. Les images Landsat 7 ETM⁺ ont été acquises le 20 août 2000 et le 18 août 2005. Les images Landsat 8 OLI/TIRS ont été acquises le 16 août 2010 et le 19 août 2014 (row32 / path123)

-Les indices utilisés sont comme suite : Nombre de taches vertes (number of green patches NP), Le plus grand indice de tache (Largest patch index LPI), Densité des patches (Patch density PD), Indice de forme du paysage (Landscape shape index LSI), Indice d'agrégation (Aggregation index AI) et Connectivité (Connectivity CONNECT).

-Les résultats de l'étude (voir figure):

Les chercheurs ont constaté que l'espace vert urbain de la zone d'étude a rétréci et s'est fragmentée au cours de cette période en réponse à l'urbanisation rapide. En général, les arbres et les plans d'eau sont plus efficaces que l'herbe pour assurer l'effet de refroidissement ; en revanche, les bâtiments et les routes contribuent à l'augmentation des taux d'assurance-chômage. La température de la surface terrestre en les zones environnantes d'un parc urbain peuvent être affectées non seulement par le ratio de couverture verte et les mais aussi par la distance du parc. Par conséquent, les impacts négatifs de l'urbanisation sur les îlots de chaleur

peuvent être atténués non seulement en équilibrant la composition du paysage, mais aussi en améliorant sa configuration spatiale. Les résultats montrent que les forêts et les masses d'eau pouvaient refroidir 6,51% et 12,82% des températures de surface imperméables, respectivement. Pour chaque augmentation de 10% de l'espace vert, la température de la surface terrestre diminue de 0,4 C, et par kilomètre d'augmentation de la distance du parc forestier, la température de la surface terrestre augmente de 0,15 C. L'indice d'agrégation (AI) et Le plus grand indice de répartition (LPI) d'espaces verts présentent une forte corrélation négative avec la température de surface. Cette étude confirme les effets de refroidissement dans la zone adjacente du parc urbain. Par conséquent, nous devrions non seulement développer plus d'espaces verts, mais aussi de planifier scientifiquement leur configuration spatiale dans le territoire urbain limité pour l'amélioration de l'effet de refroidissement.

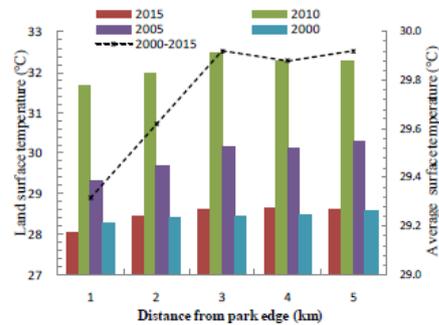
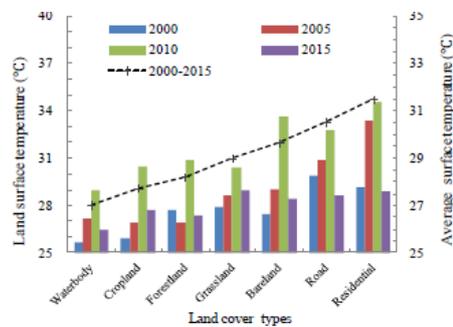


Figure 15: relation usage du sol/LST Figure 16: Relation distance à partir de parc/ LST
(Amani-Beni et al, 2019)

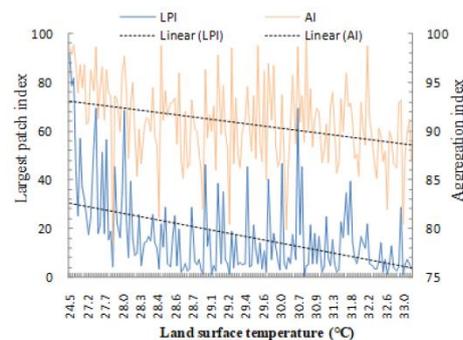
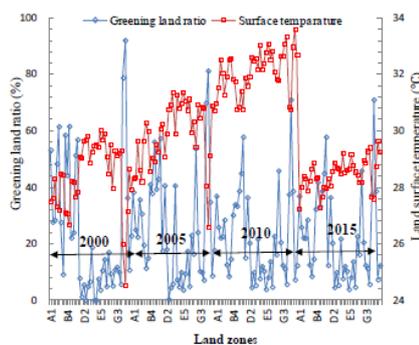


Figure 17: Les relations LST/ ratio d'espaces verts Figure 18: relation plus grand indice de patch/LST
(Amani-Beni et al, 2019)

-Conclusion

L'étude de l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur a fait l'objet de centaines d'études à travers le monde. Nous avons essayé dans le chapitre présent de résumer les différentes méthodes et approches utilisées pour évaluer cet impact. De ce fait, nous avons étudié les approches utilisé pour évaluer le confort thermique extérieur à travers la

simulation, plusieurs logiciels ont été développés pour estimer les différents indices de confort thermique, parmi ces logiciels on a cité : ENVI-met, l'outil de post-traitement Bio-Met interagit directement avec ENVI-met qui détermine le confort thermique, selon PMV, PET, UTCI et TMR, le modèle RayMan qui calcule les flux de rayonnement et les indices physiologiques, comme PMV, PET, SET*, UTCI, PT et la température moyenne radiante, le modèle OTC qui analyse l'indice universel de climat thermique (UTCI), la température physiologique équivalente température équivalente physiologique (PET) et la Température effective universelle (ETU), un autre modèle SOLWEIG qui simule les flux 3D de rayonnement solaire et IR à partir d'une description de la ville par coordonnées (x,y) et hauteur associée, en outre le modèle Solène-microclimat qui permet d'étudier l'impact des aménagements urbains à l'échelle du quartier sur le confort extérieur, sur la température de surface et sur la consommation énergétique. Le modèle TEB-SURFEX permet d'étudier les échanges d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et les villes, l'îlot de chaleur urbain dans une ville, les consommations énergétiques pour la climatisation et le chauffage du bâtiment ainsi que les indices du confort humain et enfin, le calculateur UTCI détermine le confort thermique du piéton, selon l'indice universel de climat thermique (UTCI).

Nous avons étudié aussi l'approche paramétrique effectuée généralement par le biais de logiciels Rhinocéros en utilisant le Grasshopper et les différents plugins comme ladybug, Honeybee et Butterfly.

Et comme la télédétection fait aujourd'hui une révolution dans les différents domaines de la recherche scientifique notamment l'étude de la végétation et l'estimation de l'impact de l'espace vert sur le microclimat, nous avons exposé un nombre important des études précédentes pour s'inspirer de la méthodologie y utilisée.

Deuxième partie

**Diagnostique et
Analyse**

Chapitre n°1 :

Présentation de cas

d'étude

« Et voici Constantine, la cité phénomène, Constantine l'étrange, gardée, comme par un serpent qui se roulerait à ses pieds, par le Roumel, le fantastique Roumel, fleuve de poème qu'on croirait rêver par Dante, fleuve d'enfer coulant au fond d'un abîme rouge comme si les flammes éternelles l'avaient brûlé. Il fait une île de sa ville, ce fleuve jaloux et surprenant ; il l'entoure d'un gouffre terrible et tortueux, aux rocs éclatants et bizarres, aux murailles droites et dentelées. »

(DE MAUPASSANT, 1890)

-Introduction :

Les quatre chapitres précédents ont constitué une base théorique pour entamer le travail pratique, qui consiste à analyser l'impact de la couverture végétale de la ville de Constantine sur son microclimat. Ce chapitre est consacré pour étudier la ville de Constantine, en commençant par la situation géographique, administrative et démographique, puis vu que la ville de Constantine est caractérisée par une topographie très variée qui engendre un climat varié, il est nécessaire de faire une étude bioclimatique de cette ville pour bien comprendre les facteurs qui influencent la production de la couverture végétale. Cette étude se compose premièrement d'une analyse de différentes données climatiques récoltées par la station météorologique d'Ain El Bay. Deuxièmement, nous avons besoin de faire une correction des températures et des précipitations de deux stations (Chettaba et Djbel El Ouahch) les plus élevées et la création de gradient thermique des températures pour pouvoir ressortir la température de n'importe quelle altitude. Une autre étape d'analyse, est celle de définition des étages bioclimatiques et l'établissement des graphes ombrothermique pour bien cerner la période humide et sèche durant toute l'année. A la fin du chapitre nous représentons le potentiel forestier de la ville.

I-présentation de la ville de Constantine :

I-1-Situation géographique de la ville de Constantine :

Constantine capitale de l'Est Algérien, se situe à environ 431 km de la capitale Alger et à 245 km des frontières Algéro-tunisiennes, à 89 km de Skikda vers le Nord et à 235 km de Biskra vers le Sud. Sa position lui procure situation stratégique en situant à équidistance du littoral au Nord et le massif des Aurès au sud, et constituant un relais entre les villes du sud et les villes côtières.

Elle est entourés par Skikda au Nord, Mila à l'Ouest, Guelma à l'Est et Oum El Bouaghi au Sud, elle est considérée parmi les wilayas les plus importantes du pays, elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 2297,20 Km². Elle est située entre 350m et 1100m d'altitude, entre latitude 36° 17' et la longitude 6° 37' (Figure 1 et 2).

La ville se situe au cœur d'un pincement entre les montagnes (djebel Ouahch et Djebel Chettaba) sur un majestueux rocher localisé sur les deux cotés de OUED RHUMEL, le site est marqué par la juxtaposition de deux plateaux (El Mansourah et Ain El Bey).

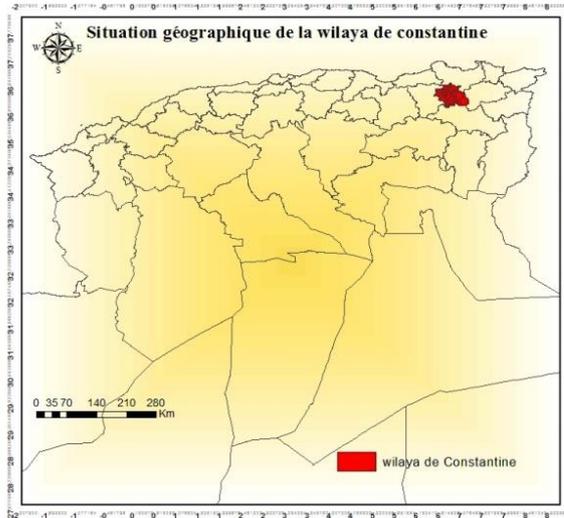


Figure 1 : situation géographique de la wilaya de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).

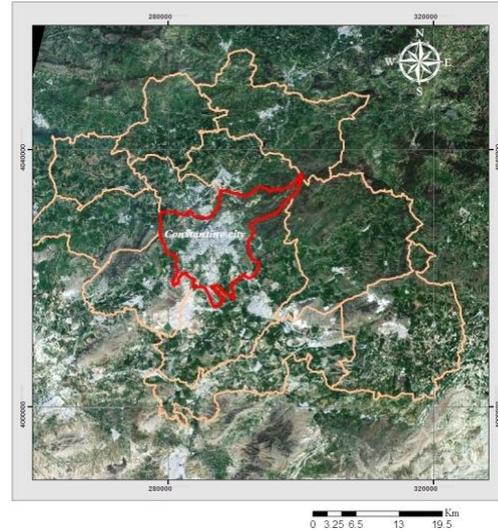


Figure 2 : situation géographique de la ville de Constantine via ArcGis bande (4,3,2) (Auteur, 2019).

Administrativement la wilaya de Constantine est divisée en 12 communes regroupées en 6 Daira (Figure 3)



Figure 3 : division administrative de la wilaya de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur 2019).

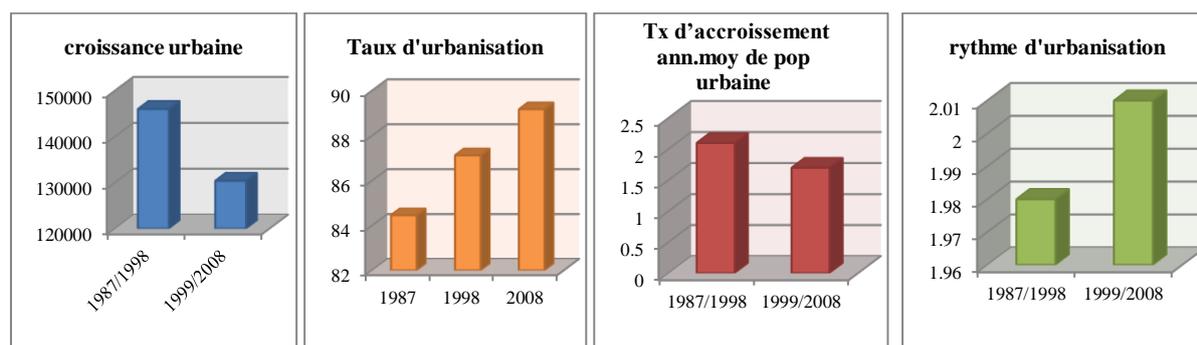
I-2-Situation Démographique :

De par ses potentialités économiques et sociales, Constantine prend place dans le rang des wilayas les plus importantes du pays, elle s'étend sur une superficie de 2297,20 Km² pour une population totale de la wilaya est estimée à 836977 habitants (Selon le RGPH 2008), soit une densité de 400 habitants par Km², Avec un taux d'accroissement annuel moyen -0.68. La population ayant un âge inférieur à 15 ans représentant 29% du total de la population. les

Tableau 1 et les Graphes 1,2,3 et 4 montrent l'évolution des indices de l'urbain entre 1987 et 2008 de la wilaya de Constantine (RGPH 2008).

Tableau 1 : l'évolution des indices de l'urbain entre 1987 et 2008 de la wilaya de Constantine (RGPH, 2008).

	croissance urbaine		taux d'urbanisation			Tx accr.ann.moy.de pop urbaine		rythme d'urbanisation	
	1987 /1998	1998/2008	1987	1998	2008	1987 /1998	1998/2008	1987 /1998	1998/2008
Constantine	146051	130407	87,46	87,13	89,18	2,1	1,7	1,98	2,01

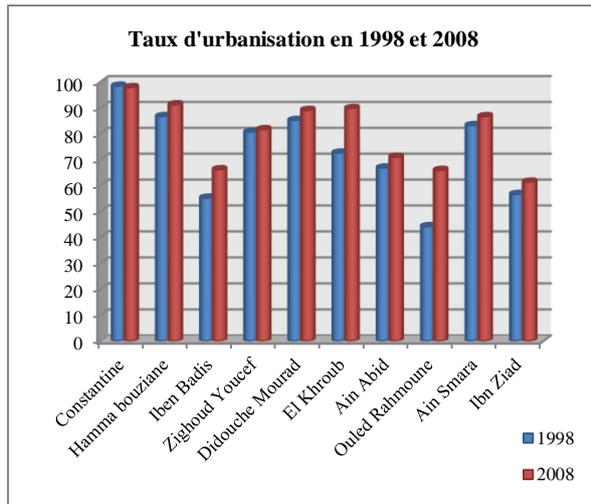


Graphes 1, 2, 3 et 4 : Evolution des indices de l'urbain entre 1987 et 2008 de la wilaya de Constantine (Auteur, 2019).

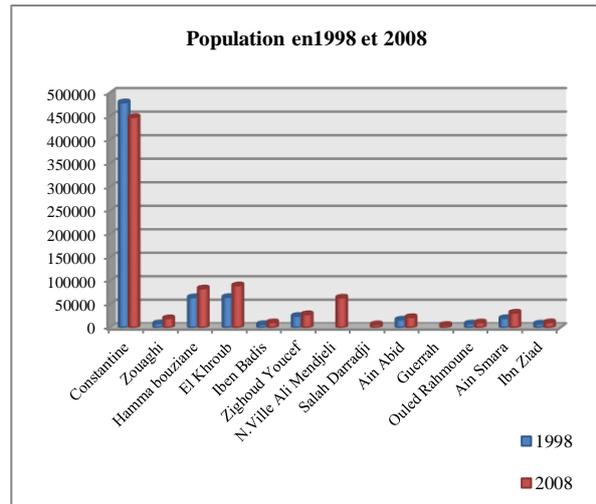
Le Tableau 2 présente une évaluation de taux d'urbanisation et la population des agglomérations de la wilaya de Constantine en 1998 et 2008 (Selon le RGPH 2008) un taux très élevé au chef lieu de la wilaya en diminuant entre les deux années. La majorité de population se concentre aussi au chef lieu (l'agglomération de Constantine) par 53,52% en 2008 (Graphes 5 et 6)

Tableau 2 : évaluation de taux d'urbanisation et de population des agglomérations de Constantine en 1998 et 2008 (RGPH, 2008)

Agglomération	Taux d'urbanisation		Agglomération	population	
	1998	2008		1998	2008
Constantine	98,42	97,86	Constantine	479122	448028
Hamma bouziane	86,65	91,22	Zouaghi	9299	20110
Iben Badis	55,14	66,13	Hamma bouziane	64749	83603
Zighoud Youcef	80,60	81,60	El Khroub	65239	90122
Didouche Mourad	85,15	89,04	Iben Badis	7647	11518
El Khroub	72,55	89,77	Zighoud Youcef	25067	28764
Ain Abid	66,77	70,97	N.Ville Ali Mendjeli		64120
Beni Hamidane	0	0	Salah Darradji		7349
Ouled Rahmoune	44,15	65,86	Ain Abid	17333	22529
Ain Smara	83,18	86,64	Guerrah		5947
Mesoud Boudjeriou	0	0	Ouled Rahmoune	9022	11263
Ibn Ziad	56,56	61,33	Ain Smara	20318	32057
			Ibn Ziad	8774	11567



Graphe 5 : Taux d'urbanisation des agglomérations de Constantine en 1998 et 2008 (Auteur, 2019)



Graphe 6 : population des agglomérations de Constantine en 1998 et 2008 (Auteur, 2019)

I-3-Historique de la ville de Constantine :

-Le premier noyau de la ville est installé dans une boucle d'Oued Rhummel, protégée par des gorges profondes qui constituent des murailles naturelles, la ville restera sur son site (sur le rocher) pendant 2000ans (Figure 4 et 5).

« Le site originel de la ville de Constantine est un « nid d'aigle » perché sur le sommet d'un rocher isolé de toute part. Entouré de Sud, de l'Est et du Nord par des escarpements rocheux et un ravin où coule le Rhummel, le côté Ouest n'est devenue facilement accessible qu'après les travaux d'aménagement effectués sur la Brèche, pour relier la médina au Coudiat Aty. » (BOUCHAREB, 2006).

-Après la prise de la ville par les français, la ville coloniale prend à se développer sur les faubourgs de Bellevue, La Koudia, et franchit le Rhummel pour s'installer aussi à Sidi Mebrouk. La brèche constitue le lien entre la Medina et la ville coloniale (Figure 6).

-La médina avait constitué avant la colonisation de la ville en 1837 un casse-tête déroutant aux colonisateurs. En effet, très vite, les percements ont été adoptés au tissu de ce noyau traditionnel pour s'assurer des repères et s'introduire par la mise en place d'un tracé de voies régulier en Résultant des esplanades et des boulevards relèguent les rues et les ruelles sinueuse (création d'une voie de largeur de 10m qui relie l'actuelle place 1^{er} Novembre et la gare en traversant la Medina lors de la visite de Napoleon III en 1865)

-La ville coloniale prend à se développer par le reboisement de Djebel El Ouahch et d'El Meridj, qui a offert des lieux des promenades des dimanches. Ainsi que l'inauguration de quelques équipements tels que Le théâtre, miniature de l'Opéra (inauguré le 6 Octobre 1883),

l'Hôtel des Postes (inauguré le 7 mars 1907) et l'Hôtel de Ville (1896), Début des travaux du boulevard de l'Abîme et Inauguration des ponts de Sidi Rached et Sidi M'Cid en 1912, Construction du pont des chutes en 1925 (BOUCHAREB, 2006) (Figure 7)

Après l'indépendance la ville a connu un phénomène d'exode rural qui entraînait un développement urbain fort, résultant de nouveaux quartiers apparaissent sous forme de ZHUN, de lotissement et d'habitats précaires, alors la production architecturale depuis l'indépendance revient plus aux options politiques qu'à une recherche d'une « identité » nationale. Cette période a été marquée par la Naissance du projet de construction d'une grande mosquée (future Université et Mosquée Emir Abdelkader) en 1968 et la Pose de la première pierre pour la construction de l'université de Constantine en Mars 1968 (Figure 8). La ville a sensiblement rempli son site, et a dû sauter son écran en reportant au-delà sa nouvelle croissance : sous forme de 3 villes satellites, dotées à la fois de ZHUN et de zones industrielles à savoir El Khroub, Didouche Mourad et Ain Smara. Mais cette urbanisation de fond de la vallée posant plus de problèmes qu'elle n'en résout (l'agglomération qui compte aujourd'hui environ 1 million d'habitants) réalise depuis 1993 une ville nouvelle sur le plateau d'Ain El Bey, à 18Km de la ville de Constantine à savoir la nouvelle ville Ali Mendjeli (Figure 9).

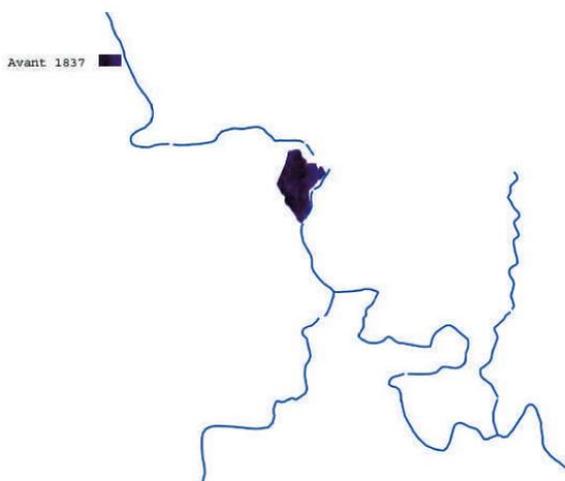


Figure 4: structure urbaine de la ville avant 1837

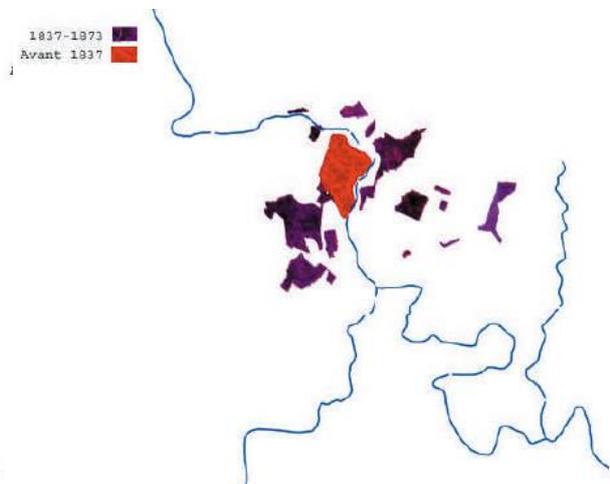


Figure 5: structure urbaine de la ville avant 1873

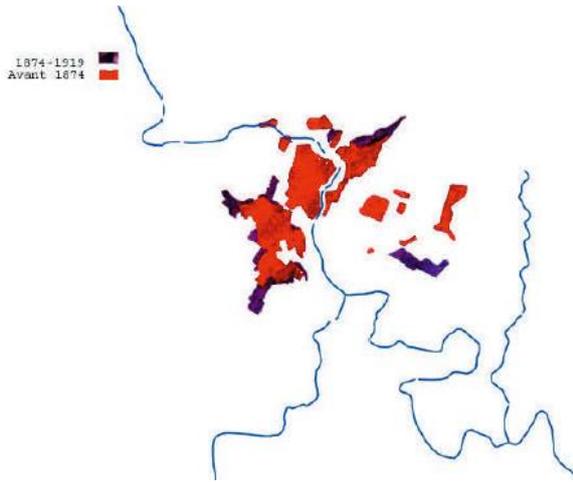


Figure 6: structure urbaine de la ville avant 1919

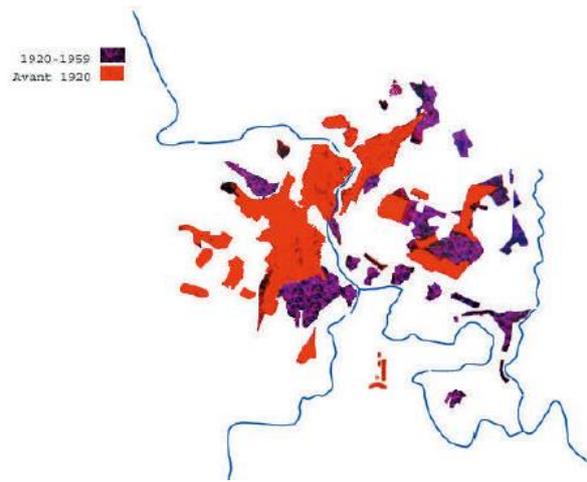


Figure 7: structure urbaine de la ville avant 1959

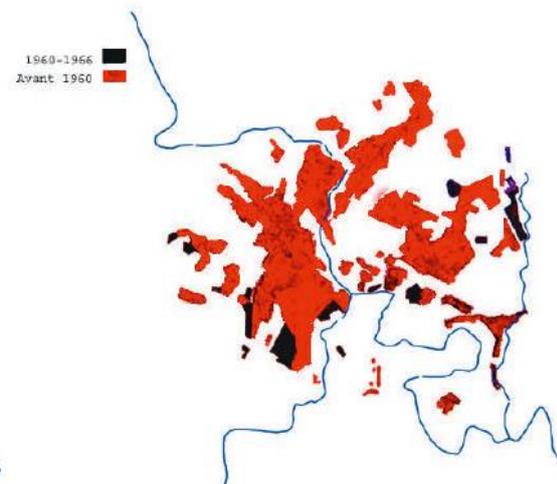


Figure 8: structure urbaine de la ville avant 1966

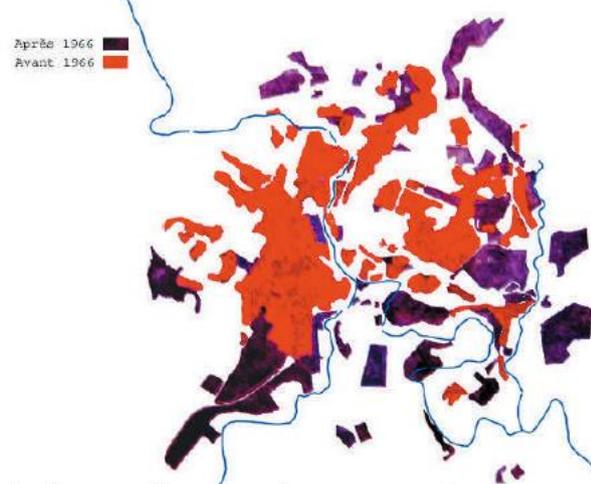


Figure 9: structure urbaine de la ville après 1966

II-Analyse Climatique de la ville de Constantine :

II-1-Analyse des données climatiques :

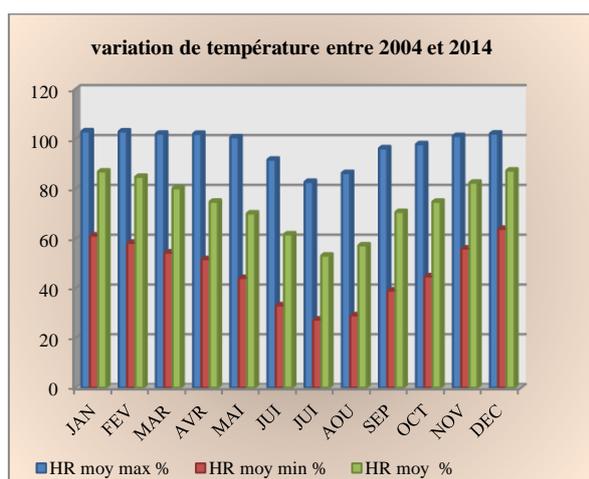
La ville de Constantine est située dans une région comprise entre le Sahara au sud avec un climat continental et l'influence du climat méditerranéen au nord caractérisé par des précipitations irrégulières, et une longue période de sécheresse estivale. Donc le climat de la ville est de type semi-aride frais, caractérisé par deux périodes distinctes (Tableau 3 et Graphes 7, 8, 9, 10, 11 et 12):

- Une période humide et froide en hiver de 197 jours.
- Une période sèche et chaude en été de 133 jours.

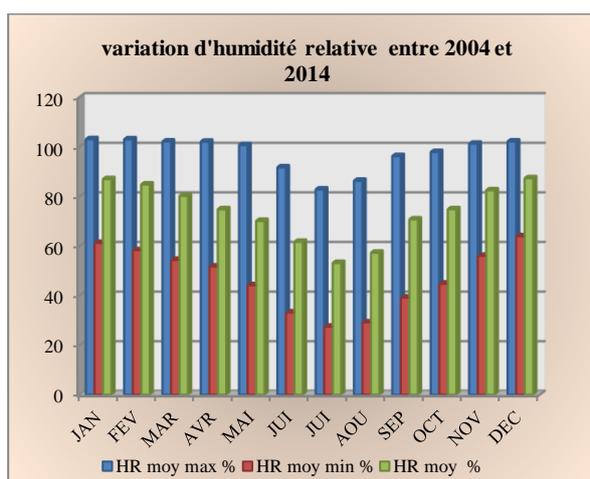
Tableau 3 : Données climatiques de Constantine, période (2004-2014) (O.N.M, 2015)

		JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
°C	T moy max	13,9	14,2	18,1	22,1	27,4	34,0	38,6	38,1	32,2	27,6	19,4	14,4
	T moymin	2,4	2,5	5,0	7,8	11,1	15,8	19,9	19,7	16,6	12,8	7,0	3,6
	T moy	7,6	7,8	11,0	14,6	19,0	24,9	29,2	28,4	23,5	19,4	12,6	8,4
%	HR moy max	103,02	102,98	102,09	102,02	100,65	91,66	82,75	86,28	96,21	97,84	101,17	102,1
	HR moy min	61,21	58,28	54,38	51,72	44,16	33,15	27,42	29,15	39,14	44,81	56	63,92
	HR moy	86,9	84,75	80,13	74,76	70,07	61,66	53,13	57,25	70,66	74,77	82,42	87,27
V	Vents (m/s)	2,87	3,27	2,96	2,85	2,59	2,72	2,63	2,48	2,28	2,17	2,72	2,66
p	Précipitations (mm)	53,6	65,6	74,3	56,4	46,4	14,5	4,1	17,2	39,0	36,0	51,0	73,5
N	Nébulosité	4	4	4	4	3	3	1	1	4	4	4	3
W/m ²	Radiance moy du rayonnement horiz	110	140	194	243	289	326	342	292	231	172	125	101
W/m ²	luminance globale	11831	15052	20887	26309	31391	35396	37142	32047	25416	18885	13620	10923
hPa	Pression atmosphérique	934	934	935	936	937	938	939	939	938	937	935	934

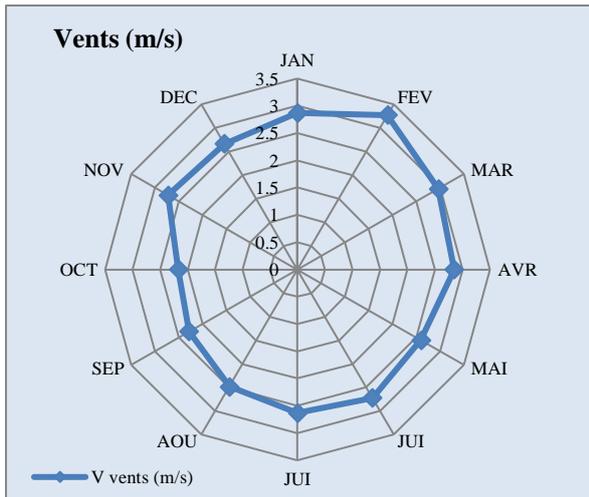
L'analyse des données climatiques de la ville de Constantine révèle qu'elle est caractérisée par un hiver froid et humide et un été sec et chaud, dont la température moyenne annuelle est de l'ordre de **17,2 °C**, et une humidité relative moyenne de **73,64%**, et moyenne de précipitations de **44,3 mm**, la luminance globale annuelle est de l'ordre de **23242 W/m²**, alors que la radiance moyenne annuelle du rayonnement globale directe est de **214 W/m²** et une pression atmosphérique annuelle **936 hPa**.



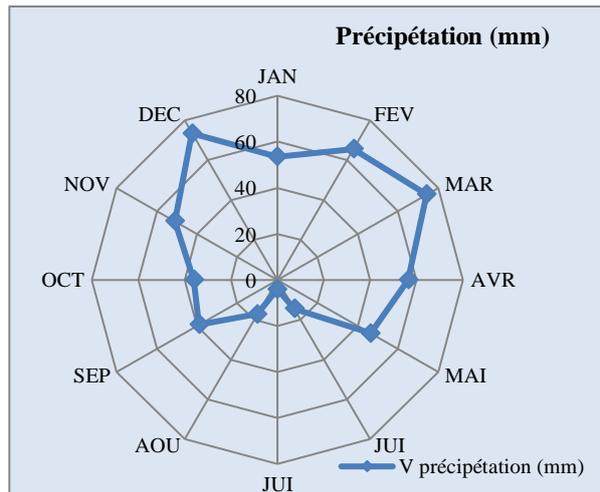
Graphe 7: variation de température de l'aire dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019)



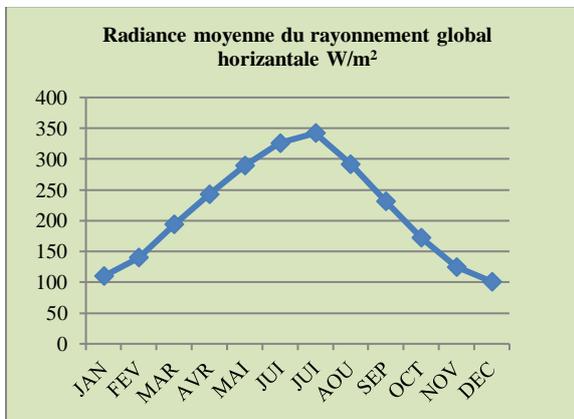
Graphe 8: variation d'humidité relative dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019)



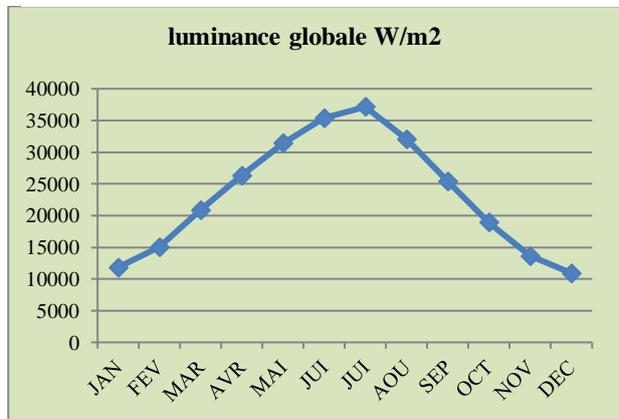
Graph 9: variation de température de l'aire dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019)



Graph 10: variation de température de l'aire dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019)



Graph 11: variation de Radiance moyenne du rayonnement global horizontale dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019)



Graph 12: variation de la luminance globale dans la période entre 2004 et 2015 (Auteur, 2019)

II-2-Définition de l'étage bioclimatique de la ville de Constantine :

II-2-1-Correction des températures et de précipitations:

Toutes les espèces végétales spécialement celles des forêts s'organisent toujours en niveaux altitudinaux ou étages successifs de végétation (Quezel & Médail, 2003) en créant un découpage altitudinale des forêts sur le pourtour méditerranéen qui répond essentiellement à des critères thermiques. Les conditions climatiques notamment la température et les précipitations sont les facteurs principaux qui déterminent le types des espèces végétale dans n'importe qu'elle altitude sachant que les données climatiques de la pluviométrie et les températures sont en relation étroite avec l'altitude, de façon générale, plus on monte en altitude, plus la température diminue.

La vie des espèces végétales se développe entre deux pôles thermiques extrêmes : la moyenne des minimales du mois le plus froid (m), et la moyenne des maximales du mois le plus chaud (M) (Emberger, 1942; Daget, 1977).

Lors de son étude sur le climat d'Algérie (Seltzer, 1946) a préconisé les gradients suivants :

✓ **Pour la température:**

-0,7 °C de diminution pour tous les 100 m de dénivellation pour les maximales (M) ;

-0,4 °C de diminution pour tous les 100 m pour les minimales (m).

✓ **Pour les précipitations:**

-Une augmentation de 40mm tous les 100 mètres pour le climat continental ;

-Une augmentation de 80mm tous les 100 m pour le climat littoral.

Ce qui donne un gradient altitudinal croissant pour les précipitations et décroissant pour les températures.

Dans notre cas, la ville de Constantine est caractérisée par une pente remarquable qui se différencie entre le nord et le sud, sachant que les données climatiques sont prise au niveau de la station de Ain El Bay à une altitude de 694m. Alors que, pour bien étudier la couverture végétale de Constantine, il paraît nécessaire de faire des corrections au niveau des températures maximales et minimales ainsi que les précipitations pour les altitude les plus élevées et qui sont caractérisée par une couverture végétale dense à savoir la station de Djbel El Ouahch à 1040m et celle de Chettaba à 1104m, pour cela nous devons calculé le coefficient de correction pour les deux stations :

-Station de Djbel El Ouahch :

-Différence d'altitude : $1040\text{m} - 694\text{m} = 346\text{m}$

-Coefficient de correction des températures maximales : $346 \times 0.7/100 = 2,42^\circ\text{C}$

-Coefficient de correction des températures minimales : $346 \times 0.4/100 = 1,38^\circ\text{C}$

-Coefficient de correction des précipitations : $346 \times 40/100 = 138,4\text{mm}$

-Station de Chettaba :

-Différence d'altitude : $1104 - 694 = 407$.

-Coefficient de correction des températures maximales : $407 \times 0.7/100 = 2,85^\circ\text{C}$

-Coefficient de correction des températures minimales : $407 \times 0.4/100 = 1,63^\circ\text{C}$

-Coefficient de correction des précipitations : $407 \times 40/100 = 162,8\text{mm}$

Après correction, nous obtenons les résultats suivants (Tableau 4):

Tableau 4: Températures et précipitations au niveau de deux stations après correction (Auteur, 2019)

	S. Ain El Bey		S.Djbel El Ouahch		S. Chettaba	
	T max	Tmin	T max	Tmin	T max	Tmin
Janvier	13,9	2,4	11,4	1,1	11	0,7
février	14,2	2,5	11,7	1,2	11,3	0,8
Mars	18,1	5,0	15,6	3,6	15,2	3,3
Avril	22,1	7,8	19,6	6,4	19,2	6,1
Mai	27,4	11,1	24,9	9,7	24,5	9,4
juin	34,0	15,8	31,5	14,4	31,1	14,1
juillet	38,6	19,9	36,1	18,3	35,7	18,2
Aout	38,1	19,7	35,6	18,5	35,2	18
Septembre	32,2	16,6	29,7	15,2	29,3	14,9
Octobre	27,6	12,8	25,1	11,4	24,7	11,1
Novembre	19,4	7,0	16,9	5,6	16,5	5,3
Décembre	14,4	3,6	11,9	2,2	11,5	1,9

-Précipitations :

- Précipitations annuelles de station de Ain El Bay = **532mm**
- Précipitations annuelles de station de Djbel El Ouahch : 532+138,4= **670,4mm**
- Précipitations annuelles de station de station de Chettaba : 532+162,8= **694,8mm**

II-2-2-définition de l'étage bioclimatique via ArgGis :

L'objectif de cette étape est de déterminer les étages bioclimatiques de la ville de Constantine afin d classer les espèces végétales qui les appartiennent. Pour cela il est nécessaire de calculer Le quotient pluviométrique Q₂ d'Emberger à travers la formule suivante :

$$Q^2 = 2000P/ M^2 - m^2 \quad (1)$$

Sachant que :

- P: précipitation annuelle (mm)
- M: la température maximale du mois le plus chaud en °C
- m: la température minimale du mois le plus froid en °C

En utilisant le logiciel ArcGis 10.5 et une application sur Excel pour calculer le Quotient d'Emberger nous obtenons les résultats suivants (Figure 10 et 11) :

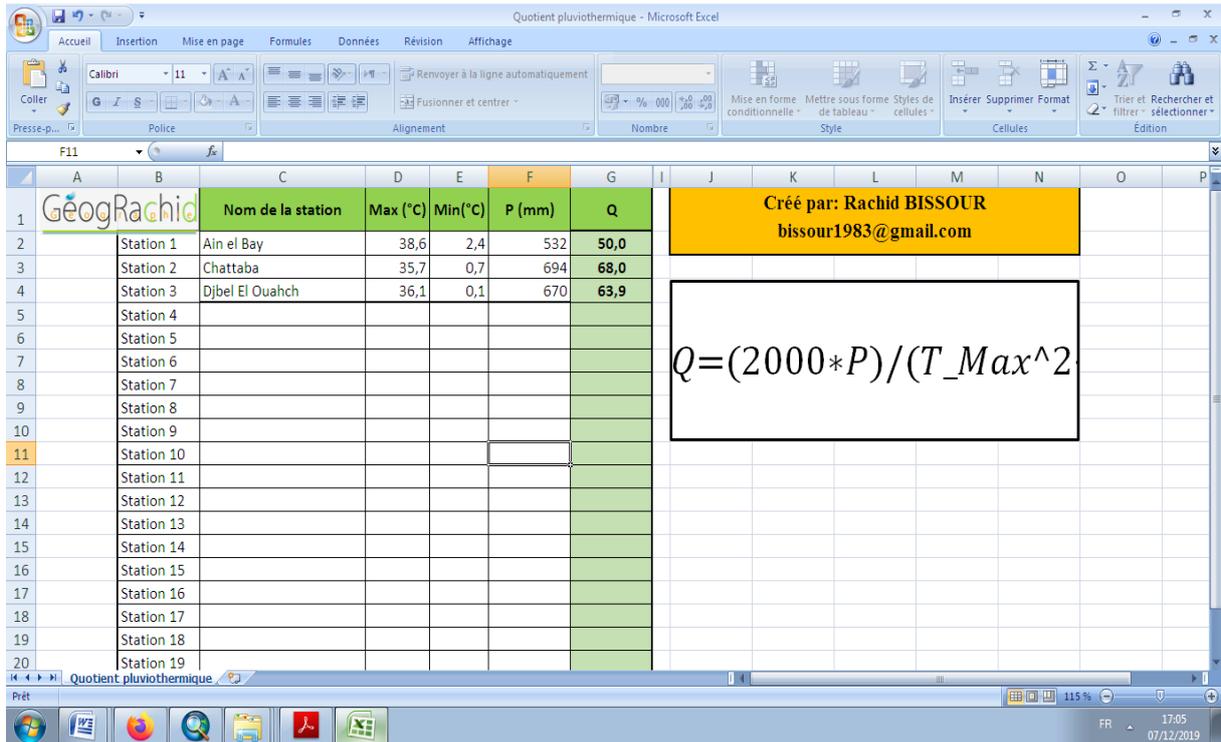


Figure 10: calcul de Quotient d’Emberger sur Excel (Auteur, 2019).

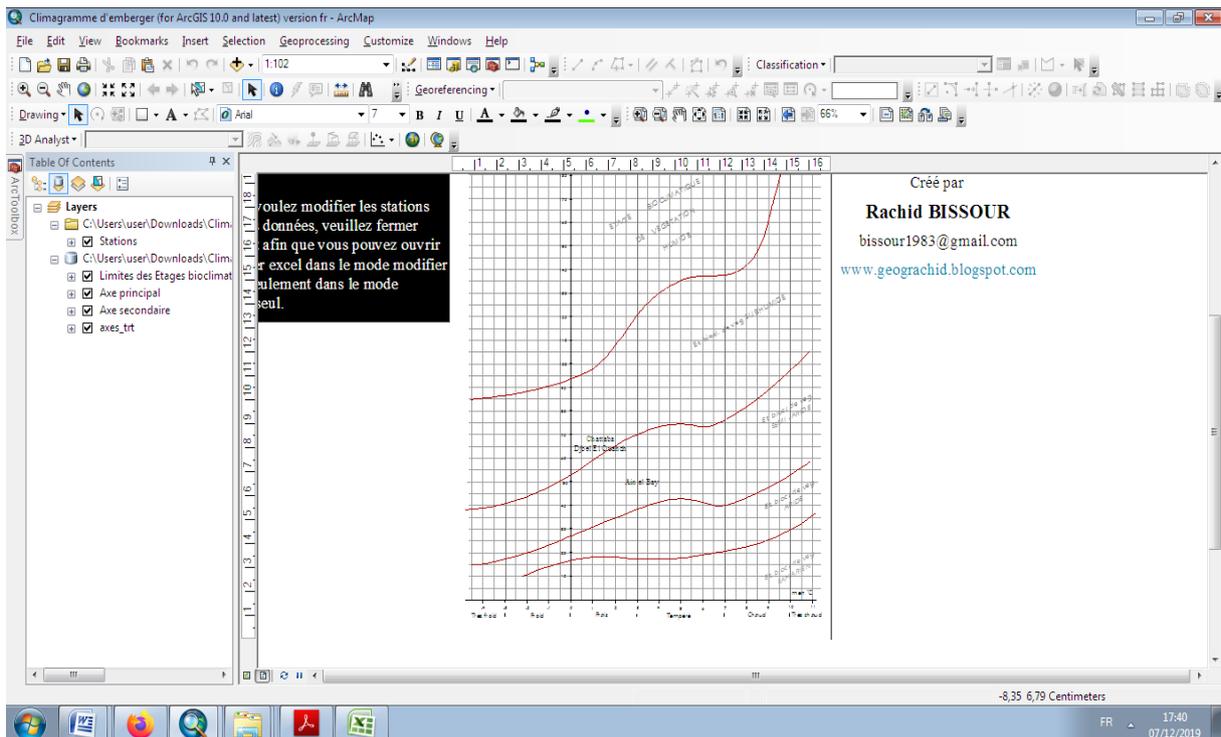


Figure 11: définition des étages bioclimatiques de chaque station via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).

Après la projection des valeurs du quotient Q2 et m sur le climagramme d’Emberger nous pouvons déduire que la station de référence (Ain El Bay ou bien Constantine) se trouve dans l’étage **semi-aride frais**. La station de DJ –OUAHCH et CHETTABA dans l’étage **Sub-humide frais** (Figure 12 et 13)

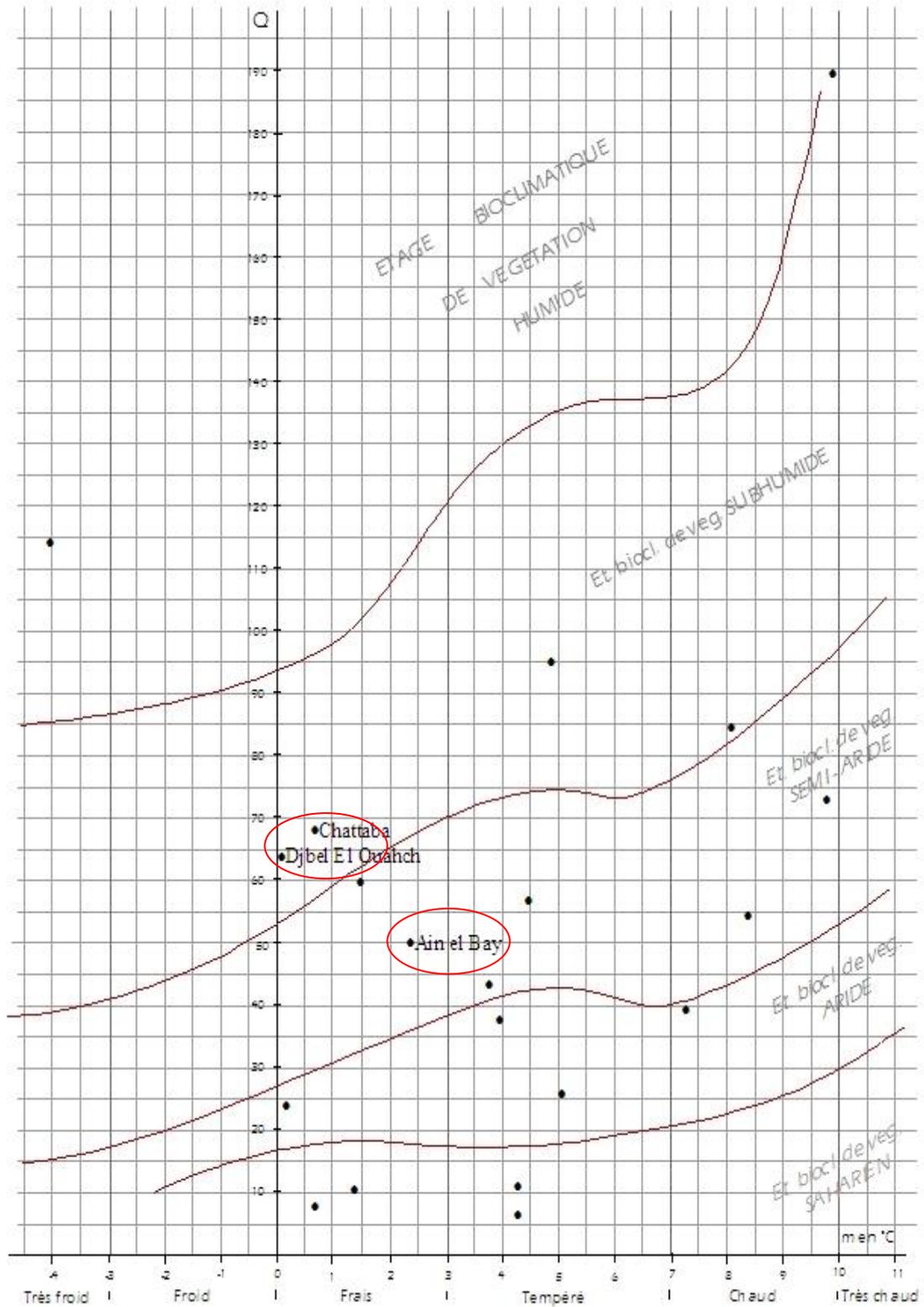


Figure 12 : les étages bioclimatiques selon le climagramme d'Emberger de trois stations (Auteur, 2019)

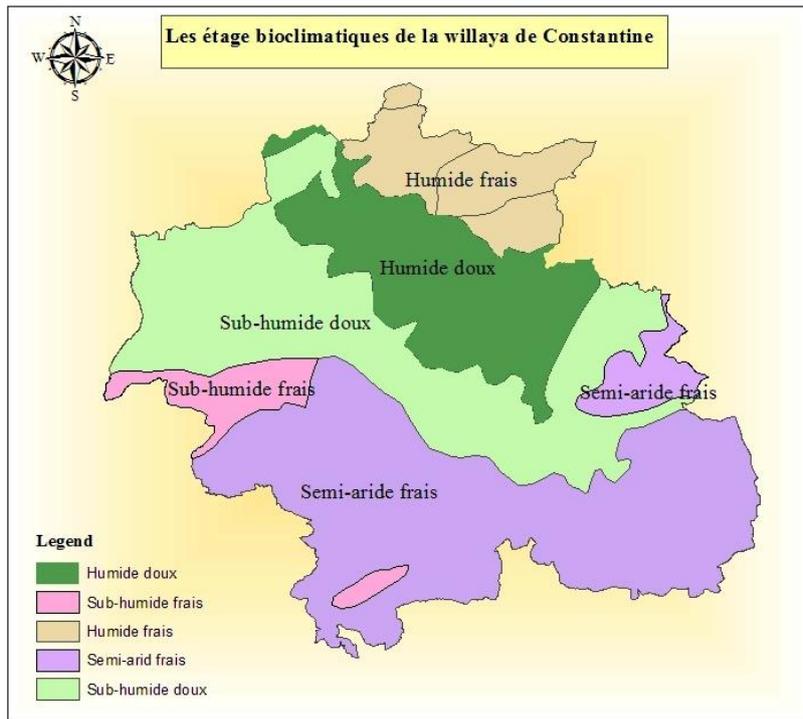
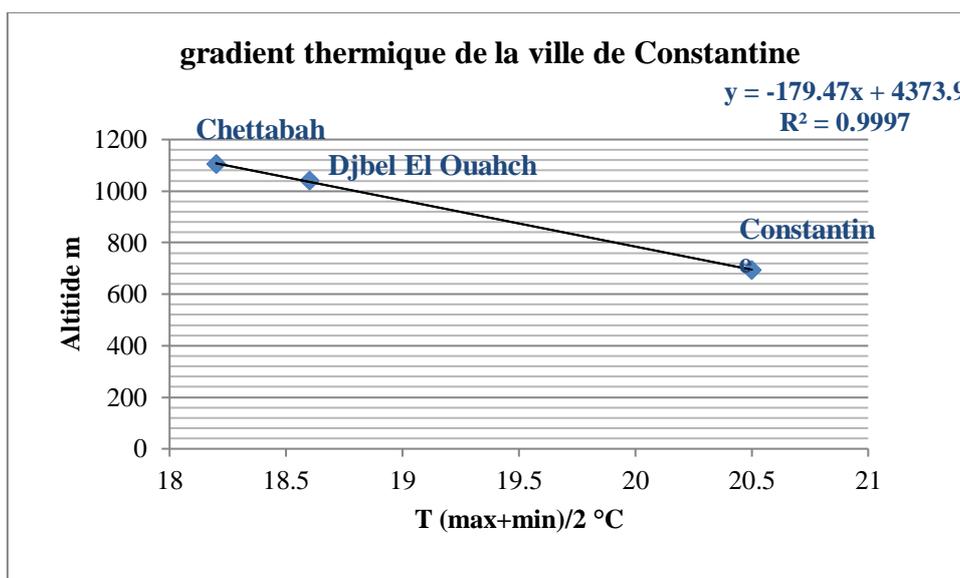


Figure 13 : les étages bioclimatiques de la wilaya de Constantine selon le climagramme d'Emberger (Auteur, 2019)

II-2-3-Le gradient thermique de la ville de Constantine :

Le calcul des gradients thermiques consiste à établir verticalement la décroissance de la température pour une tranche de 100 m de dénivellation. L'application de l'équation de la droite de régression donne directement la température cherchée en fonction de l'altitude connue. En utilisant la moyenne des températures maximales et minimale et les altitudes de chaque station, nous obtenons le résultat suivant :



Graphe 13: le gradient thermique de la ville de Constantine (Auteur, 2019).

Une relation négative a été établie entre les altitudes et la température c.-à-d. l'augmentation de l'altitude engendre la diminution de la température. L'équation de la droite de régression s'écrit comme suite (Graphe 13):

$$y = -179,4x + 4373 \text{ avec } R^2 = 0,999$$

II-2-4-Le diagramme Ombrothermique :

BAGNOULS et GAUSSEN (STEWART, 1969) ont établi des diagrammes ombrothermiques pour évaluer la durée et l'intensité de la saison sèche pendant l'année. Ces graphiques permettent de suivre facilement la suite des saisons et l'importance de leur sécheresse. Ils se sont basés sur la formule suivante :

$$P = 2 T \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

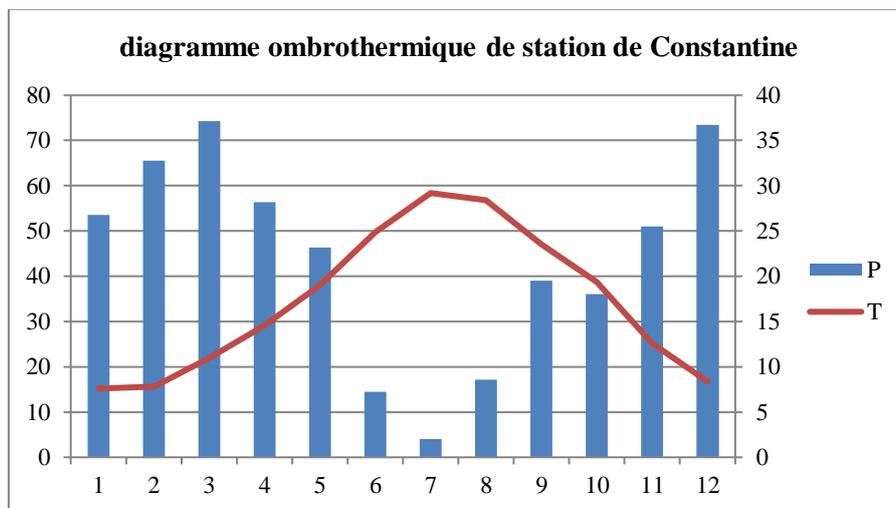
-Les mois secs sont définis, quand la courbe des précipitations est située au-dessous de celle des températures moyennes.

L'analyse de trois graphes 8, 9 et 10 montre que :

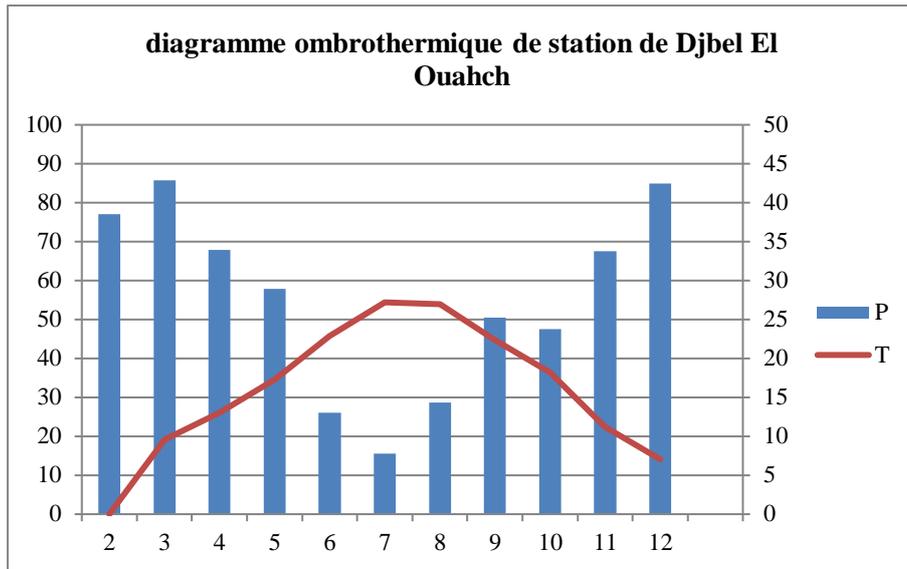
-La station de Constantine est caractérisée par une période sèche qui s'étale de mois de juin au mois d'octobre avec une durée de 120 jours et une période humide de 240 jours.

-La station de Djbel El Ouahch est caractérisée par une période sèche moins intense que celle de la station de Constantine et qui s'étale entre Juin et Août avec une durée de 90 jours et une période humide de 270 jours ;

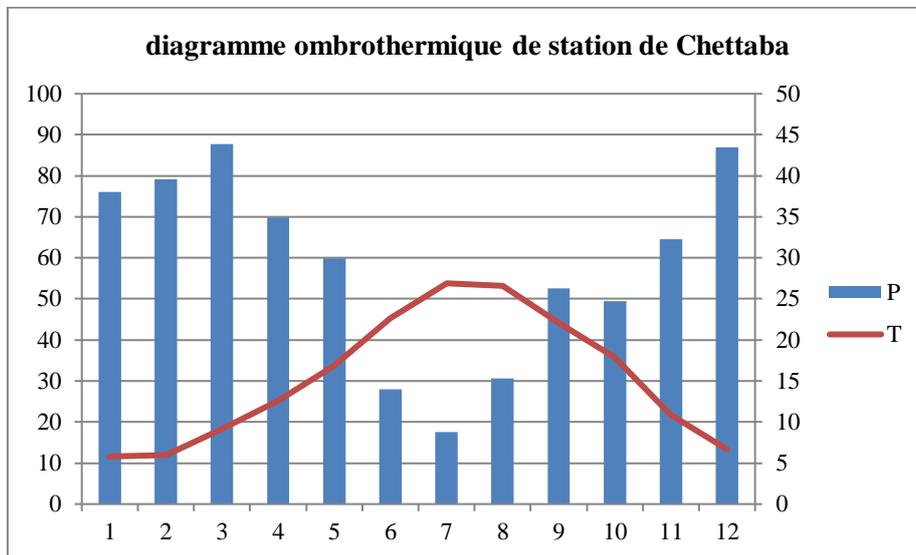
-La station de Chettaba est caractérisée par une période sèche aussi moins intense que celle de la station de Constantine et qui s'étale entre Juin et Août avec une durée de 95 jours et une période humide de 265 jours (Graphes 14, 15 et 16)



Graphe 14: diagramme ombrothermique de station de Constantine (Auteur, 2019)



Graphe 15: diagramme ombrothermique de station de Djbel El Ouahch (Auteur, 2019)



Graphe 16: diagramme ombrothermique de station de Chettaba (Auteur, 2019)

III- Caractéristiques topologiques de la ville :

La Wilaya de Constantine s'étend sur une superficie totale de **222910 ha**, elle est **caractérisée par** une topographie très accidentée, marquée par une juxtaposition de plateaux et de collines. Elle s'étend sur un plateau rocheux à 649 mètres d'altitude, coupé des régions qui l'entourent par des gorges profondes où coule l'oued Rhummel qui l'isole, à l'est et au nord, des djebels Ouahch et Sidi Mcid, dominant de 300 mètres, à l'ouest, le bassin d'El-Hamma. Le relief dans la zone nord est plus marqué avec environ 29,9% en pente comprises entre 12,5% et plus de 25% qu'en zone sud avec 45,31% de la surface totale, les pentes étant comprises entre 0 et 12,5 %. (Figures 14, 15, 16, 17 et 18).

Le milieu physique dans lequel s'inscrit la ville de Constantine se compose du Rocher, de collines, de plateaux et de vallées.

-Le site du Rocher

Il présente une surface plane faiblement inclinée, orientée vers le Sud-est. Entouré sur la 4/5de son pourtour par de profonds précipices que l'on appelle les gorges du Rummel. Le site du Rocher où s'accroche la médina est entièrement bâti en dégradé depuis la casbah, jusqu'au quartier de Souika.

-Le site des collines

C'est celui qui est occupé par l'ancienne urbanisation datant de l'époque coloniale, c'est-à-dire les collines de belle vue et de Sidi Mabrouk, puis récemment celui occupé par l'université. Le site des collines à Constantine, est sujet à de nombreux glissements de terrain à belle vue, Boufrika, Cite Elbir, Fadila Saadane, où la pente joue un rôle dans la mise en mouvement du sol.

-Le site des plateaux

Ce sont des espaces faiblement inclinés, situés au plateau du Mansourah où l'emprise militaire est importante, et au plateau de Ain El Bey. La stabilité des terrains, et les faibles pentes au niveau de ces sites, font de ces endroits les meilleurs terrains constructibles à Constantine.

-Le site des vallées :

La ville de Constantine est traversée par deux grands oueds : le Rhummel et Boumarzoug. À l'amont de leur confluence, les vallées s'ouvrent en de larges versants à fortes pentes.

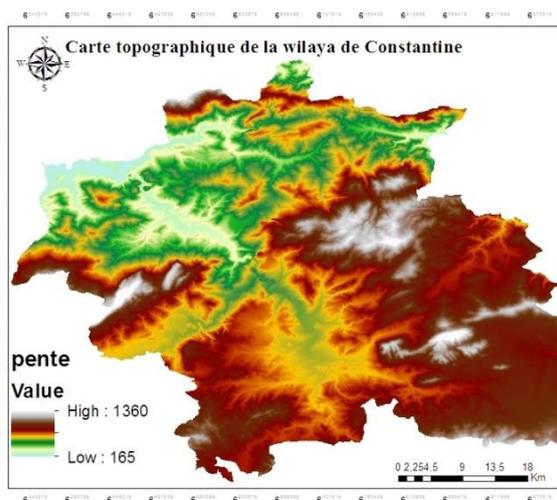


Figure 14: carte topographique de la wilaya de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).

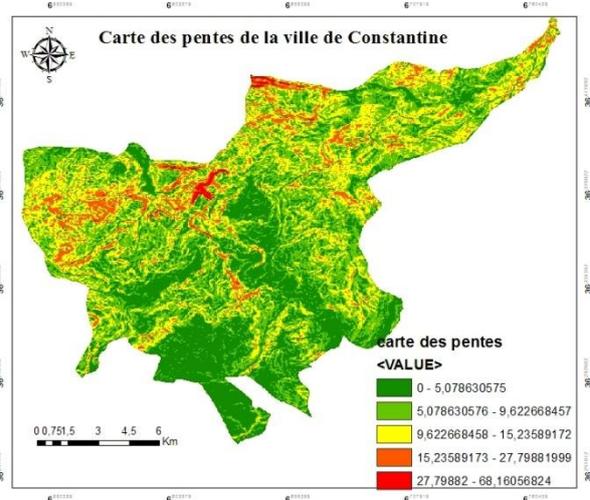


Figure 15 : carte des pentes de la ville de Constantine par degré via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).

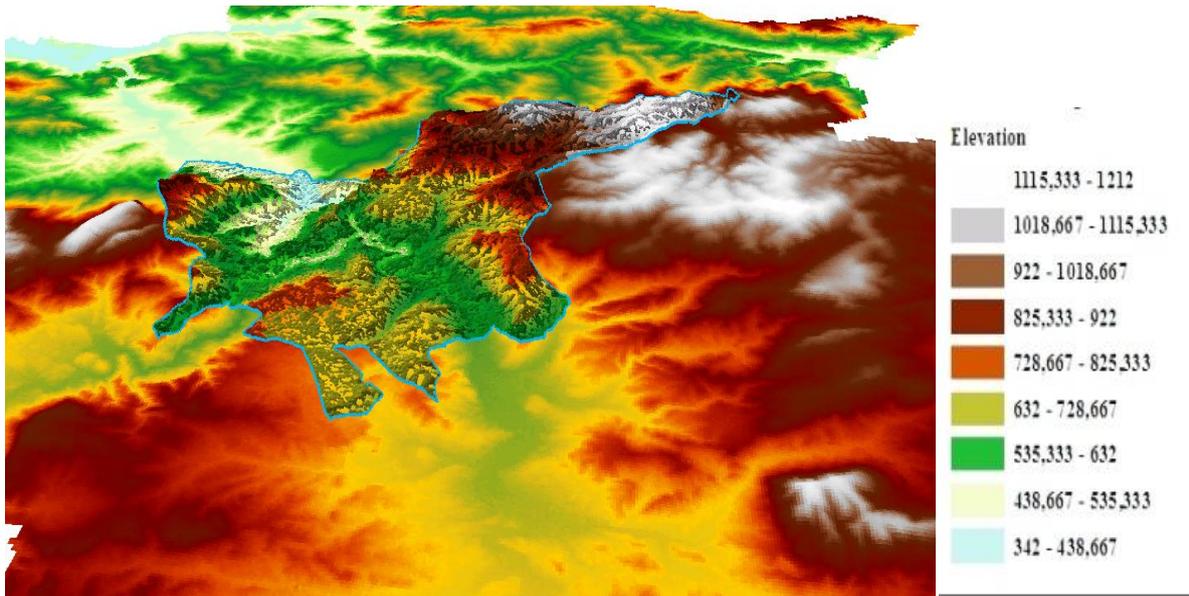


Figure 16: Carte topographique 3D de la ville de Constantine via ArcScene 10.5, (Auteur, 2019).

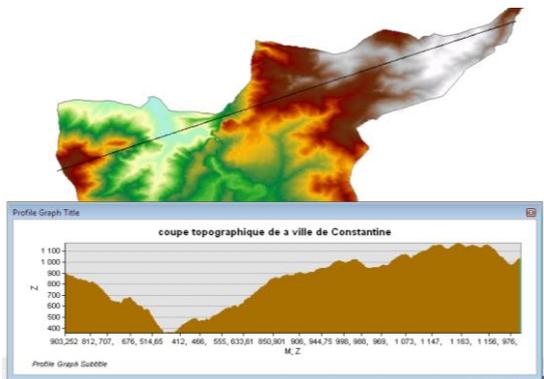


Figure 17: Coupe topographique de la ville de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).

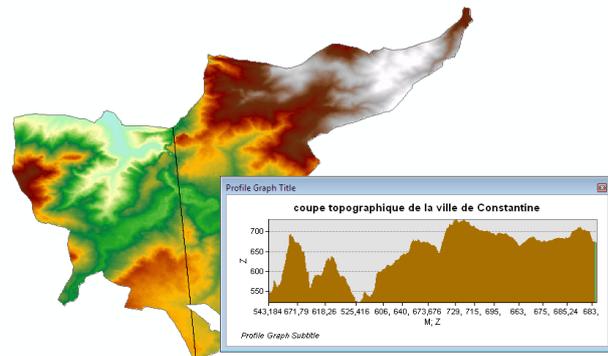


Figure 18: Coupe topographique de la ville de Constantine via ArcGis 10.5 (Auteur, 2019).

IV-L'occupation du sol :

Selon la direction des services agricoles de la wilaya de Constantine l'occupation du sol de la wilaya est comme suite :

- Prédominance des terres agricoles qui sont constituées essentiellement de cultures et cultures associées aux parcours et qui occupent une superficie totale de 170 445 Ha, soit 76% du territoire de la Wilaya.
- Les terres forestières (forêts, maquis et reboisements) occupent une superficies totale de 27 566 Ha, soit un taux de boisement de la Wilaya de 12%.
- Les parcours (hors forêts et hors SAU) occupent une superficie de 19 786 Ha, soit 9%.
- Les terres improductives (urbains, carrières, affleurement rocheux) occupent 6 560 Ha, soit 3% de la Wilaya (Figure 19).

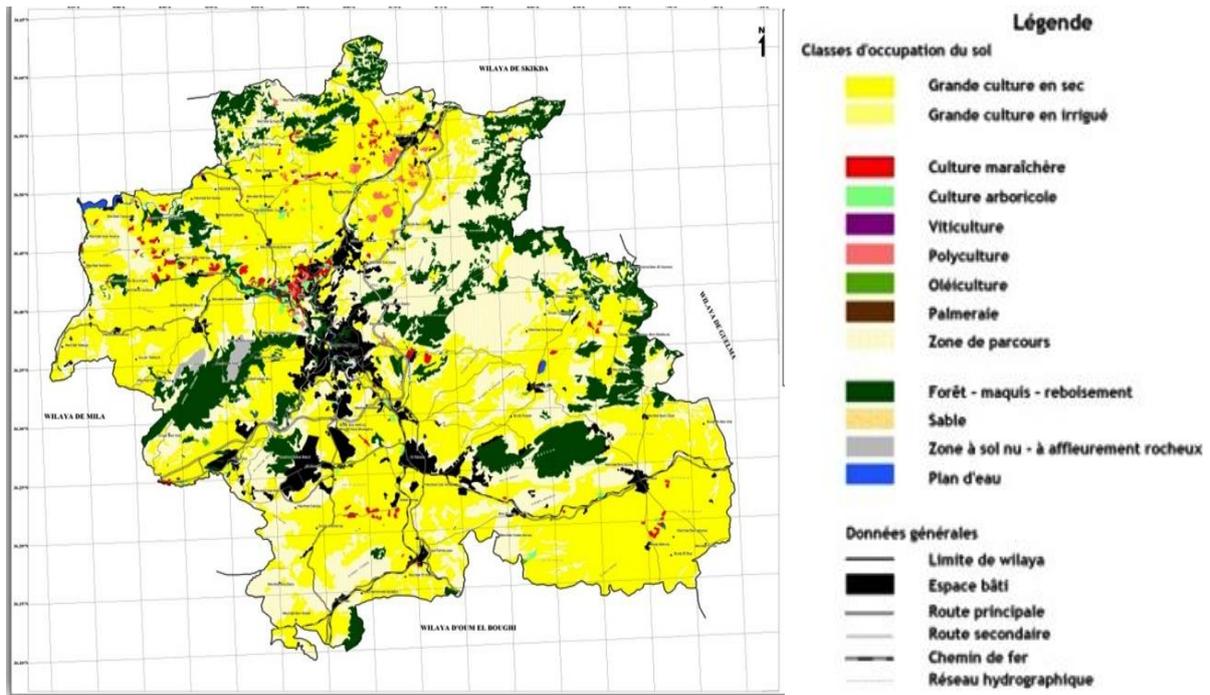


Figure 19 : Carte d'occupation du sol de la wilaya de Constantine (direction des services agricole de la ville de Constantine, 2019)

V- Le potentiel forestier de la wilaya de Constantine :

Les terres forestières (forêts, maquis et reboisements) totalisent une superficie de 27 566 Ha, soit un taux de boisement de la Wilaya de 12%. Ce taux de boisement est insuffisant compte tenu de l'ampleur des pentes fortes et de l'érosion, et ceci d'autant plus que :

- Les formations forestières sont constituées à 35% de leur superficie de maquis clairs et de maquis arborés dont la faible densité du couvert forestier ne permet pas d'assurer correctement un rôle de fixation des terres en pentes.
- Les formations forestières ne sont pas réparties sur tout le territoire de la Wilaya. L'occupation forestière du sol est concentrée au niveau de cinq (05) sous zones qui regroupent à elles seules 91%.

Il s'agit des sous zones suivantes :

-Massif de Djebel Ouahch :

- 7 275 Ha de superficies forestières.
- Forêt domaniale de Beni Selline (959 Ha).
- Forêt domaniale de Constantine (487 Ha).
- Deux (02) forêts de type T₂ totalisant 1 438 Ha.

-Collines de Zardezas :

- 6 386 Ha de superficies forestières.

- Forêt T₂ commune de Zighout Youcef.

-Piémonts d'El Aria :

-4 032 Ha de reboisements.

- Forêt T₂ communes de Benbadis et de Ain Abid (4 032 Ha).

-Djebel Chettabah et Ouled Sellam :

4 728 Ha de superficies forestières.

- Forêt domaniale de Chettabah (2 970 Ha).

- Quatre (04) forêts T₂ totalisant 1 758 Ha.

-Massif de Oum Settas :

2 573 Ha de superficie forestière..

- Forêt T₂ Benbadis, Ain Abid et Ain Abid et Ouled Rahmoun (2 573 Ha).

- Le Reboisement constitue l'essence dominante avec 8412 Ha, soit 34% de la superficie occupée par la strate arborescente (forêts et reboisements).

Les autres essences inventoriées sont réparties comme suit :

- Pin d'Alep : 8085 Ha (33%)
- Pin Pignon: 3252 Ha (13%)
- Chêne liège : 2259 Ha (9%)
- Eucalyptus : 1143 Ha (5%)
- Peuplements mélangés de pin d'Alep et de cyprès : 760 Ha (3%)
- Cyprès : 603 Ha (2%)

Le tableau 5 résume le potentiel forestier de la wilaya de Constantine :

Tableau 5: le potentiel forestier de la wilaya de Constantine (Kherief, 2006)

Commune	Superficie (ha)	Localisation	Superficie par forêt (ha)	Espèces dominantes
Constantine	4255 ha	- Mansourah	-32 ha	-Pin d'Alep
		-Djebel-elouahch	-3280 ha	-Pin d'Alep
		-Oued-Zied	-50 ha	-Pin d'Alep
		-Djebess	-120 ha	-Pin d'Alep
		-Hadji Baba	-641 ha	-Pin d'Alep
El-khroub	1936 ha	-Drâa-Naga	-1686 ha	-Eucalyptus
		-El-Meridj	-202 ha	-Pin d'Alep+Cyprès
		-Baraouia	-48 ha 64 a	-Pin d'Alep
Ibn-Badis	4974 ha	-Darmoun	-110 ha	-Pin d'Alep
		-Tarafana	-1090 ha	-Pin d'Alep+Pin
		-Tessinga	-678 ha	pignon
		-Alaiga	-38 ha	-Cyprès
		-Djebel-Krami	-1494 ha	-Pin d'Alep
		-El-Hambli	-1043 ha	-Pin d'Alep
		-Bou zemzem	-500 ha	-Pin d'Alep+ Cyprès
		-Haddaj	-21 ha	-Cyprès +Pin d'Alep
Ain -Abid	1487 ha	-Ain boumaz	-1487 ha	Pin d'Alep
Oueled Rahmoun	337 ha 24 a	-Sila	-42 ha86 a	Pin d'Alep
		-Badaoui	-94 ha 38 a	Cyprès
		-Medelsou	-200 ha	Cyprès+ Pin d'Alep
Ain Smara	253 ha 06a 25ca	-Chettaba	243 ha	Pin d'Alep
		-Hadj-Salah	250 ha	Pin d'Alep+ Cyprès
		-Ain-Smara	157 ha 06a 25ca	Pin d'Alep
Zighoud -Youcef	1139 ha	-Drâa El-youdi	159 ha	Pin d'Alep
		-Berkane	547 ha	Chêne liège
		-El-Kantour	168 ha	Pin d'Alep
		-Gattoucha	110 ha	+Eucalyptus
		-Sefardjla	155 ha	Chêne liège Pin d'Alep
Hamma-Bouziane	53 ha	-Bekira	53 ha	Eucalyptus
Messaoud boudjriou	275 ha	-Ain kerma	120 ha	Pin d'Alep
		-Kef beni hamza	15 ha	Pin d'Alep+
		-Boukhalfa	140 ha	ChêneVert Pin d'Alep+ ChêneVert
Ibn Ziad	515 ha	- Ibn Ziad	15 ha	Pin d'Alep
		-Sidi-Slimene	227 ha	Pin d'Alep+
		-R'mail	273 ha	ChêneVert Pin d'Alep+ ChêneVert
Didouche-Mourad	500 ha	-Djebel-ouahch	500 ha	Pin d'Alep+Pin Pignon
Totale			27 566 Ha	

Conclusion :

Notre cas d'étude est la ville de Constantine, capitale de l'Est Algérien, se situe à environ 431 km de la capitale Alger et à 245 km des frontières Algéro-tunisiennes, à 89 km de Skikda vers le Nord et à 235 km de Biskra vers le Sud. Sa position lui procure situation stratégique en situant à équidistance du littoral au Nord et le massif des Aurès au sud, et constituant un relais entre les villes du sud et les villes côtières.

Elle est entourés par Skikda au Nord, Mila à l'Ouest, Guelma à l'Est et Oum El Bouaghi au Sud, elle est considérée parmi les wilayas les plus importantes du pays, elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 2297,20 Km². Elle est située entre 350m et 1100m d'altitude, entre latitude 36° 17' et la longitude 6° 37'.

La ville se situe au cœur d'un pincement entre les montagnes (djebel Ouahch et Djebel Chettaba) sur un majestueux rocher localisé sur les deux cotés de OUED RHUMEL, le site est marqué par la juxtaposition de deux plateaux (El Mansourah et Ain El Bey).

La ville de Constantine est située dans une région comprise entre le Sahara au sud avec climat continental et l'influence du climat méditerranéen au nord caractérisé par des précipitations irrégulières, et une longue période de sécheresse estivale. Donc le climat de la ville est de type semi-aride frais, caractérisé par deux périodes distinctes : une période humide et froide en hiver de 197 jours et une période sèche et chaude en été de 133 jours.

Chapitre n°2 :

Approche Cartographique pour un inventaire de l'espace vert à Constantine

«A première vue, la ville de Constantine parait verte, relativement à son site à fortes pentes qui est consolidé par des plantations. Ce sont ces espaces qui lui donnent la couleur verte, surtout au printemps mais leur présence en réalité se limite à stabiliser les terres, un rôle déjà considérable.»
(Benhassine, 2011)

-Introduction

Durant la seconde moitié de 20^{ème} siècle et après l'indépendance, la ville de Constantine a connu une augmentation de la demande en logement, en conséquence les autorités ont procédé à la création et la planification d'un habitat qui répond aux besoins de la population qui a pris forme sur les étendues d'espaces verts au détriment de jardins et d'anciens vergers. Depuis lors, les seules actions menées en matière de création des espaces verts consistaient en quelques opérations sporadiques, comme la conversion des espaces résiduels en espaces verts. Aujourd'hui la ville de Constantine ne compte qu'un nombre réduit des petits , jardins et parcs, qui se concentrent dans le centre ville (le noyau central de la ville) dont la majorité est créée dans la période coloniale, alors que dans les grands ensembles et les cités collectives, l'espace vert ne présente que des vastes étendues dépouillé de verdure. En réalité la ville de Constantine ne peut offrir à ces habitants des espaces verts de détente, de loisir et de récréation, car la surface consacrée pour ce type d'espace public est une surface insuffisante. Le chapitre suivant est consacré pour faire un étude spatio-temporel de l'espace vert de la ville de Constantine, autrement dit, une étude historique (la genèse de l'espace vert) qui va nous éclaircir les étape de création de la trame verte de la ville de Constantine, et autre étude spatiale à travers la cartographie et l'analyse thématique dans l'ArcGis 10.5 pour quantifier les différents types d'espace vert constituants de la trame verte, et les localiser dans les différents quartier en créant une base de données qui va nous servir à étudier le manque en espace vert.

I-Etudes effectuées sur les espaces verts de la ville de Constantine

La problématique de l'espace vert a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques à travers le monde depuis des années, dont l'objectif est de confirmer l'importance et l'indispensabilité de l'espace vert dans le milieu urbain Face à la complexité et à la rigueur de l'environnement bâti, soit à travers l'étude de son impact écologique, psychologique, esthétique ou climatique. Parmi ces recherches, des études ont été faite sur l'espace vert de la ville de Constantine.

✓ Benhassine & Labi (2009) ont effectué une étude sur l'image et la pratique des squares de la ville de Constantine à travers la perception et les pratiques sociales, la méthode de travail utilisée dans cette recherche est une analyse psychosociologique pour faire dégager les comportements des usagers, en se basant sur le schéma d'apparence chronologique : L'observation, le questionnaire avec les usagers et les non usagers des squares, les entretiens avec les responsables des différents organismes concernés. L'enquête a inclus 100 personnes interrogée dont 50% sont de femmes et 50% sont hommes. concernant l'âge, la recherche

comprenait 20 personnes entre 20 et 40ans, 40 personnes entre 40 et 60 ans et 40 personnes âgées de plus de 60 ans.

Les résultats montrent que les squares sont pratiqués par une catégorie masculine, de jeunes à un niveau intellectuel limité et quelques vieux. Les squares Bennacer; Boursas et Beyrouth sont pratiqués par les vieux à l'inverse des squares; Guessoum, Hadj Ali et Guerfi, qui reçoivent des jeunes. Ils montrent aussi que 85% des usagers les rejettent pour leur qualité (espace bleu, mobilier). 99% les rejettent par rapport à leur état de propreté. Donc les éléments physiques, constituent un facteur qui donne une image au square, celle-la participe au rejet de ces espaces. La composition végétale est très limitée, le gazon est inexistant.

Cette étude confirme que Constantine connaît un manque considérable de squares en quantité et en qualité. Ils sont pratiquement abandonnés et exclus de l'urbanité. Ceci est dû essentiellement à deux images composées : l'image physique palpable et se trouve dans les éléments de confort de l'espace, l'image morale, négative, liée à l'information et aux facteurs culturels et psychosociologiques. Ces images ont conduit au rejet de ces espaces par la majorité de citoyens, et leur transformation en objets démunis de toute identité et déviés de leur fonction par une minorité qui cherche à se cacher (Benhassine & Labi, 2009)

✓ Merrouche (2010) a effectué une étude sur l'espace vert à Constantine pour étudier l'effet de la végétation dans 'amélioration de microclimat urbain à l'échelle de centre ville, trois espaces publics différents ont été choisis pour effectuer cette étude à savoir le jardin Bennacer (espace végétal), la place des martyrs (rond-point, espace minéral), et l'esplanade de la Brèche (terrasse du marché, espace minéral). Une campagne de mesure in situ a été effectuée au niveau des trois espaces publics urbains avec établissement des valeurs de température, taux d'humidité relative et vitesse du vent pour plusieurs journées (Juillet-Aout) et comparaison des résultats selon différentes séquences horaires (toutes les 2 heures) avec la validation des résultats en référence à la station météorologique d'Ain Bey.

Les résultats de cette étude montrent que la température de l'air au centre ville de Constantine et particulièrement dans les espaces publics dégagés dépasse largement celle de la périphérie, cela est prouvé par les résultats de mesures dans les stations d'étude (place 1er novembre, esplanade de la brèche, chaussée du boulevard Benboulaïd, place des martyrs). Sauf le jardin public Bennacer et son environnement, son trottoirs, espaces ombrés par la végétation dans les quels la chercheuse a enregistré des résultats différents. L'inexistence ou l'insuffisance de la végétation et les plans d'eau, le trafic routier intense, et les surfaces minéral, sont tous des paramètres qui influencent négativement le confort thermique des usagers au sein des espaces publics (Merrouche, 2010).

✓ L'étude d'Ali Khoudja (2010) sur la pratique de l'espace vert à Constantine avait comme objectif d'évaluer la demande sociale en matière d'espace vert afin de déterminer les activités que la population pratique ou désire pratiquer en utilisant la méthode d'investigation par questionnaire. L'enquête a été menée, durant les mois d'avril et mai 2007, auprès des habitants de deux quartiers Bellevue et la cité Daksi.

Les résultats de cette étude montrent que : 78,6 % de ses habitants fréquentent l'espace vert. La forêt El-Meridj est l'espace vert le plus fréquenté, avec 31% de la population, 27% des constantinois se dirigent vers des forêts en dehors de la ville, El-Ghorab, Ouled Rahmoun, Ain -Kerma et El-Haria, Djebel El Ouahch est fréquenté par 15% de la population. Cette étude montre aussi que la moitié de la population le fréquente régulièrement, et que l'autre moitié ne les fréquente que de façon périodique, dont Plus de la moitié de la population passe entre deux heures jusqu'à une journée dans les espaces verts lors d'une sortie et le tiers y passe entre une à deux heures.

✓ Louafi & Abdou (2011) ont étudié l'effet de la végétation urbaine sur les microclimats, le confort thermique et visuel dans les espaces extérieurs. En utilisant la technique d'observation en situation et des mesures sur terrain. L'étude a été faite sur l'esplanade du campus de l'Université Mentouri de Constantine, dont les usagers sont des étudiants et des visiteurs. Le champ de l'observation et l'investigation ont retenu la dimension climatique ainsi que les paramètres d'ambiances d'ensoleillement, d'humidité relative, de température ambiante et les facteurs lumineux. Les résultats confirment que :

-La présence de la végétation modifie les rayonnements solaires dans l'espace extérieur, la température et l'humidité relative et favorise le jeu de lumière pour un confort visuel efficace;

-L'espace vert développe des températures ambiantes plus basses et des humidités plus élevées donc une ambiance hygrothermique plus agréable.

-L'existence de la végétation influence positivement l'utilisation de l'espace extérieur de l'esplanade (Louafi & Abdou, 2011)

✓ Une deuxième étude effectuée par les même chercheuse Louafi & Abdou (2016) ; une rue de canyon avec différentes SVF (Sky view factor) a été étudié avec la présence ou l'absence d'arbres en utilisant des mesures sur le terrain et des questionnaires pendant l'été, et une série de simulation a été faite, l'objectif était d'étudier les effets de la végétation dans cinq espaces différents sur les conditions thermiques dans les espaces extérieurs avec différents ratios et SVF, comparer les performances d'une zone ombragée à une zone insolaée, étudier l'impact de l'ombre sur le confort thermique des personnes dans un climat chaud et sec, et

évaluer le confort thermique extérieur en fonction des indices de confort «prédire la température équivalente» (PET) et la température radiante moyenne (T_{mrt}).

Les résultats de cette étude montrent que :

-La présence de la végétation modifie les effets des radiations solaires dans l'espace extérieur, la température de l'air, la température du sol et l'humidité relative de l'air;

-L'espace vert développe de l'air plus bas et une humidité de l'air plus élevée, offrent ainsi un confort et une sensation plus agréables.

-Il existe une corrélation entre la température de l'air, la température moyenne de rayonnement (T_{mrt}) et la température physiologiquement équivalente (PET) pendant les saisons chaudes, ce qui influence le confort.

-Amélioration de la qualité de l'environnement urbain par l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain. Très souvent, les arbres constituent une composante importante de l'espace extérieur ouvert, ce qui contribue fortement à la qualité de l'environnement. Pour cela la valorisation des axes essentiels est préconisée par l'implantation d'arbres à feuilles caduques pour un environnement plus raffiné. (Louafi & Abdou, 2016).

✓ Une deuxième étude a été effectuée par Ali Khoudja (2017) sur la problématique de l'espace vert à Constantine et la proposition d'un plan vert pour combler le déficit en matière d'espace vert. La recherche est basée sur les données de l'APC concernant les statistiques de l'espace vert réactualisée par la chercheuse pour créer en premier lieu un inventaire. Ce dernier va servir comme base de comparaison le ratio de l'espace vert de chaque secteur avec la norme Algérienne de l'espace vert pour calculer la quantité, la carence et le déficit de l'espace vert de chaque secteur et de la ville entière.

Les résultats enregistrés donnent un ratio de 0,62 m² /hab. pour le secteur de Sidi Rached, 0,79 m² /hab. pour le secteur de Bellevue, 1,22 m² /hab. pour El Kantara, 0,48 m² pour Sidi Mabrouk et 1,10 m² pour les Mûriers tandis qu'à Ziadia, El Guammas, 5 Juillet et Boudrâa Salah le ratio est nul du fait de l'inexistence de jardins publics. Ils montrent aussi que La ville de Constantine doit combler un déficit total de 548 hectares c'est-à-dire 298 hectares d'espaces verts de proximité, 162 hectares d'espaces verts inter-quartiers et 88 hectares d'espaces verts périurbains favorables aux loisirs de fin de semaine. A la fin de cette étude la chercheuse a identifier les lieux constituant un potentiel pour proposer un plan vert à la ville de Constantine. (Ali Koudja, 2017).

II-Etude de la genèse de l'espace vert à Constantine

II-1-Genèse de l'espace vert avant la colonisation de la ville de Constantine en 1937

Plusieurs civilisations se sont succédées sur le rocher de Constantine : les numido-berbères, les phéniciens, les romains, les byzantins, les arabes, les ottomans et les français. La médina de Constantine a conservé son aspect sous la dominance des byzantins, arabes et ottomans (Ali Khoudja, 2011), une cité fortifiée par des remparts, qui s'est caractérisée par une trame urbaine dense composée de mosquées, madrasas, souk, plais du Bey, et maisons. Les rues sont étroites et sinueuses en s'adaptant à la topographie du rocher et qui assurent l'intimité des habitants, et les passages sont souvent couverts.

L'espace vert dans cette période se résume en quelques petits jardins et patios à savoir les jardins des maisons avec fontaine ou bassin et un plant de vigne ou de figuier, et ceux du Palais de Bey (le jardin des Orangers et le jardin des palmiers) (Figures 1 et 2).

« Au milieu du jardin des Orangers se trouve une vasque entourée d'arbustes couverts de fleurs, de massifs de verdure et bien sur de plusieurs orangers. Ce jardin est à peu près carré; il a vingt mètres d'un côté et dix-huit de l'autre » (Ali Khoudja, 2011).

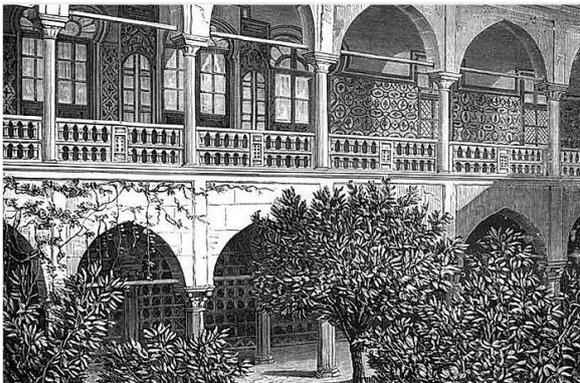


Figure 1: jardin des orangers, palais Ahmed Bey
(<https://palaisdumaghreb.wixsite.com/epoqueottomane/palais-ahmed-bey-constantine>)



Figure 2: jardin des palmiers, palais Ahmed Bey
(<http://cnra.dz/atlas/palais-ahmed-bey/>)

Des jardins privés et publics ont été placés aussi dans les faubourgs extra muros, sur des vergers et des forêts telles que Sidi Ghorab, Sidi Mabrouk, Sidi M'Cid, El-Hamma et Ain El Bey (Figure 3). Ces forêts entouraient souvent les résidences du Bey et des notables de la ville ainsi que les tombaux des Saints et d'autres jardins publics pour le loisir et la détente des habitants (Ali Khoudja, 2011).

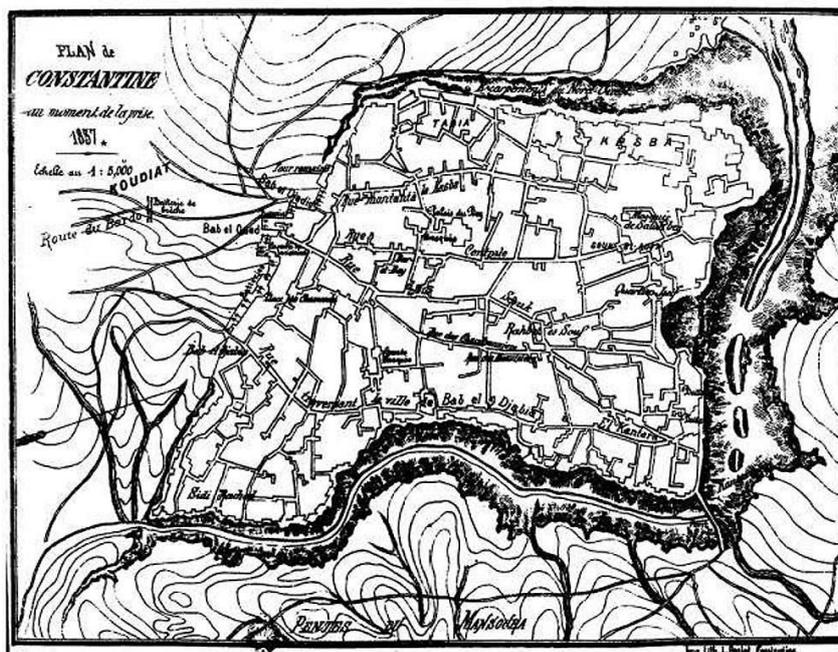


Figure 3: Plan de la médina de Constantine en 1837, (<http://www.constantine-hier-aujourd'hui.fr/>)

II-2-Genèse de l'espace vert dans la période coloniale

Après la prise de la ville en 1837, l'expansion de la ville et sa transformation sur le site de la médina et en dehors, vont changer la structure urbaine de la médina, particulièrement dans ses parties Ouest, sur le Coudiat Aty et au-delà (Ali Khoudja, 2011).

Les travaux de transformations venaient en réponse aux besoins de l'armée comme:

- La consolidation de l'enceinte et relèvement de la brèche ;
- Organisation d'une place d'arme près de la porte Valée en 1841 (La brèche / Bâb el oued) ;
- Implantations des colons au niveau des maisons traditionnelles (transformation du quartier résidentiel de la casbah en quartier militaire), le palais du bey servira de résidence au commandant de la province.

La construction d'une caserne militaire sur les plateaux de Mansourah, a été associée par une opération de boisement commençant en 1846 afin de dissimuler cette caserne, ce qui a donné naissance plus tard à la forêt urbaine d'El Masourah (Ali Khoudja, 2011).

Durant la seconde moitié du 19^{ème} siècle, une intervention coloniale sur le tissu urbain de la médina pour donner plus de la lisibilité à cette structure dense à travers l'élargissement de ces rues (Figure 4). C'était la période des tracés de grands boulevards et de rues bordées d'arbres associés à des squares, à des places et à des jardins publics de forme et de dimensions variées selon le site (Figure 5), les jardins sont reliés entre eux par des avenues plantées, et relayés par des squares. (Ali, Khoudja, 2011).



Figure 4: vue aérienne sur le percement colonial
(<https://www.judaicalgeria.com/pages/constantine.html>)

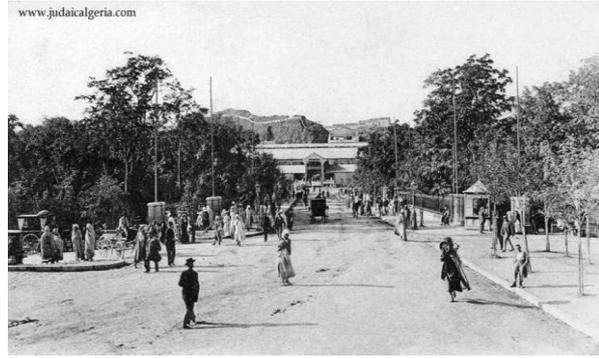


Figure 5: la rue des squares
(<https://www.judaicalgeria.com/pages/constantine.html>)

Dans cette période, trois grands squares ont été créés dans la partie sud Ouest de la médina, et qui s'étendaient de Bab-El-Oued jusqu'au piémont du Coudiat, des espaces verts publics qui ont changé l'image de la ville et l'a donné une certaine convivialité (Figure 6). Le square Valée (actuellement jardin Bachir bennacer) connu sous le non de Djene El Mourkantia (Figure 7), et le square de la République (actuellement jardin Ahmed Bey) étaient dressé sur la voie qui relie la médina avec le Coudiat, et finalement le square Panis (jardin Hadj Ali) connu sous le non Djene Ezzaoualia implantait sur un remblai (Ali Khoudja, 2011).

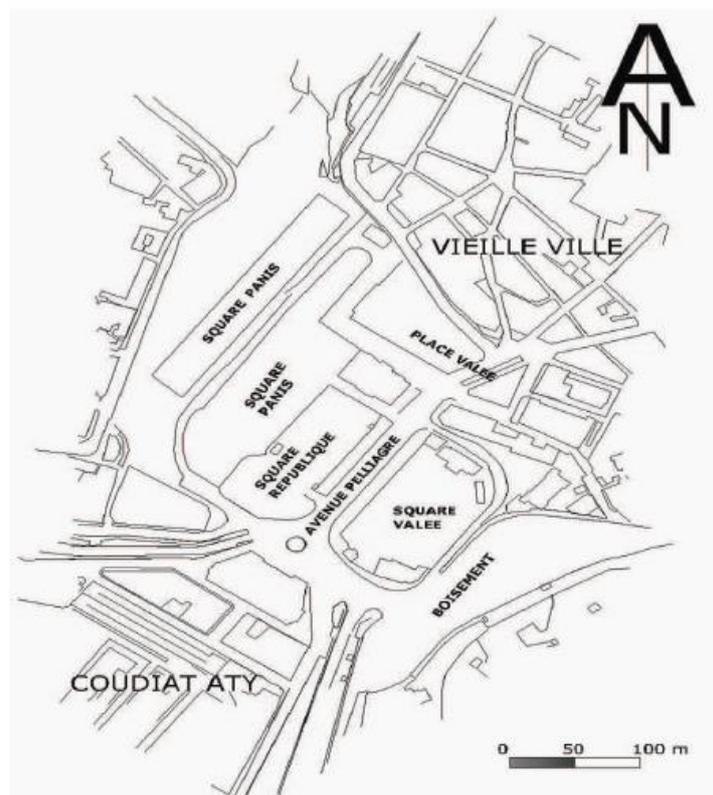


Figure 6: Squares et jardins publics du centre ville de Constantine (Ali Khoudja, 2011)



Figure 7: Square Bachir Bennacer actuellement (Auteur, 2019)

L'augmentation de nombre de la population ainsi que la volonté de créer des véritables quartiers européens capables de renverser la centralité du rocher vont donner naissance aux premiers faubourgs coloniaux. Les premières extensions se sont faites près de la gare à El Kantra en 1864, autour de la colline du Koudiat et à l'ouest en 1873, le Faubourg Saint-Jean. Une nouvelle configuration spatiale répond aux aspirations de la population en matière d'agrément ; une trame urbaine de formes modernes qui remplacent la formation d'îlots compacts se caractérise par ces rues vastes bordées d'arbres et ces différents squares, jardins et places publiques.

En 1895, d'une forme presque carrée, et une superficie de 300 m², le square Gambetta (aujourd'hui square Guessoum) a été créé dans le quartier de Saint-Jean (Figure 8). Puis avec l'expansion du faubourg, le square a été élargi sur une superficie de 1,2 hectare en 1910 (Ali Khoudja, 2011).



Figure 8: Le square Gambetta, (<https://www.facebook.com/AlgerieCartesPostalesAnciennes/>)

Au début de 20^{ème} siècle, la ville a connu un doublement de ces surfaces urbanisées. Avec la crise du logement des années 1920 à cause d'une forte demande de logement de la part de l'armée française, sont apparues les premières cités ouvrières à Belle vue (la cité des

combattants) et le Faubourg Lamy autour de la colline du Mansourah (1919) ainsi qu'à Sidi Mabrouk (la cité de la police, 1922), un habitat sous forme pavillonnaire. Cette opération d'expansion a été toujours associée par la création des espaces de détente et de repos comme les jardins, les squares et les places publiques.

Un autre espace vert de détente et de récréation a été créé sur les gorges du Rhumel, au dessous du pont d'El Kantara, le jardin de Sousse créé en 1935 avec une superficie de 1,5hectare (Figure 9), dans un site naturel. Le choix de ce site était pour objectif de valoriser cet emplacement ainsi que le pont suspendu de Sidi M'cid (Ali Khoudja, 2011), en 1940, un autre jardin a vu le jour dans le même secteur, celui d'El Kantara connu aujourd'hui sous le nom le jardin Boursas avec une surface de 1,65hectares.



Figure 9: le jardin de Sousse, (<https://www.facebook.com/BladyAljazyrNhbhaWnhbAllyYhbha/>)

En 1940, le square Loucif dans la partie sud de Bellevue avec 6000m² de superficie, En 1945, le square de Bayrouth (Figure 10) d'une superficie de 8700m² a été créé dans la partie supérieure de Sidi Mebrouk, et dernièrement en 1962 Boudjenana le dernier square qui a été créé à El-Kantara avec 3000m².



Figure 10: jardin Bayrouth à Sidi Mebrouk (Auteur, 2018)

Selon Ali Khoudja (2011), la partie Sud-ouest de la ville a été aménagée par un grand parc hippique constitué de terrains de rugby, de football et d'un champ de courses hippiques. La

ville vivait aussi plusieurs opérations de boisement tel que le boisement du versant surplombant le Bardo, le reboisement des forêts de Djebel-El-Ouahch en 1856 et celle du Meridj en 1857.

La figure 11 résume la genèse de l'espace vert durant la période coloniale à la ville de Constantine.

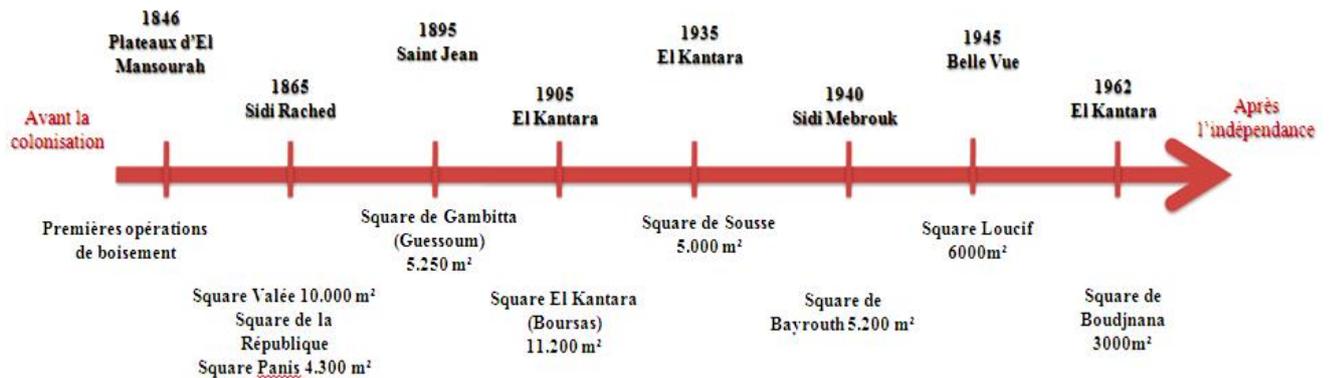


Figure 11: genèse de l'espace vert de la ville de Constantine dans la période coloniale (Auteur, 2019)

II-3-Genèse de l'espace vert après l'indépendance

Après l'indépendance, Constantine a connu une évolution urbaine à cadence très rapide. Le processus d'attraction a donné l'exode rurale qui provoqua à son tour la crise de logement .dans l'optique de résorber cette crise, le phénomène de diffusion fait apparition par l'extension de la commune sur la périphérie, en conséquent, des Zones d'Habitat Urbains Nouvelles ZHUN ont été créés pour résoudre le problème de logement engendrant, ainsi, la rareté des espaces verts dans la proche campagne et dans la ville. À partir des années 1980 plusieurs quartiers fut implantées à savoir Daksi, Ziadia, La BUM, la Cité du 20 Aout, Boumerzoug, Ain-El-Bey, Boudjenana, Boussouf et 5 Juillet. Ceci a eu un effet catastrophique sur l'espace vert car certaines cités furent implantées sur des zones boisées (Ali Koudja, 2011 et 2017).

Un nombre réduit de jardins et squares fut créé après l'indépendance dont la plupart sont le résultat de verdissement de quelques espaces résiduels, des terrains au niveau des quartiers résidentiels ou des terrains délaissés.

Le jardin de la protection civile à Belle vue a été créé en 1968 avec une superficie de presque 5000m² en s'allongeant sur une terre pleine qui sépare deux voies mécaniques, un emplacement qui influence l'usage de ce jardin négativement.

Un deuxième jardin dans le même secteur de Belle vue, celui de Guerfi, qui a été créé en 1973, sa superficie est de 10000m², un espace public par excellence pour les habitants de ce quartier (Figure 12).



Figure 12: Jardin des sept tournants et Guerfi à Ciloc (Auteur, 2019)

Un troisième jardin dans le secteur de belle vue au niveau de Filali, à l'origine est un vieux bosquet qui a été clôturé et auquel aucun aménagement n'a été ajouté, (Ali Khoudja, 2011 et 2017). Et un autre quatrième jardin dans ce secteur, au niveau de Fadila Saadane, le jardin de Benioudane crée en 1977 avec une superficie de 10.000m².

Toujours sur des terrains résiduels ont été aménagés deux espaces verts à Daksi, et de Sidi Mabrouk. A Boumerzoug après avoir rasé un bidonville, un complexe de loisir d'une superficie de 2,9 hectares a été implanté durant l'année 2006. Plusieurs de ces espaces verts ne peuvent être qualifiés de jardins publics ceci est dû notamment à leur formes et à leurs localisations, ils ne sont d'ailleurs, pour la plus part, pas fréquentés par la population (Ali khoudja, 2011).

Nous notons que le square Hadj Ali, Ex Panis, dans le secteur Sidi Rached au centre ville a été détruit en 2006, pour construire à sa place un hôtel, la protection civile et Guerfi sont détruits en 2009, pour la réalisation de tramway.

II-3-1-Le parc de Djbel El Ouahch

Le projet de création de parc zoologique de djebel Ouahch est programmé en Mai 1981, par la wilaya de Constantine qui a fixé les grandes orientations et programmes de cet équipement qui doit compenser avec ses 500 hectares, les influences en espaces verts dans cette métropole de l'Est Algérien. Par son programme et par sa richesse de son milieu naturel, le parc zoologique doit aussi combler certaines insuffisances en infrastructures culturelles, et de loisirs en milieu naturel à l'échelle de la ville.

Ce site pittoresque de 500 hectares est un endroit frais même en plein été. Il est caractérisé par un relief accidenté, une couverture végétale dense, un arboretum de plus de 19 hectares, une réserve biologique d'environ 100 hectares qui recèle une riche variété en arbres forestiers, quatre lacs artificiels, une retenue collinaire. Le tout constitue de beaux paysages pouvant offrir à la population de Constantine et de ses environs des possibilités diverses et variées de détente, de récréations et de loisirs en milieu naturel (Figure 13).



Figure 13: parc de Djbel El Ouahch (<https://www.trfihi-parks.com/en/park-details/4811-Altasliat-jabal-alwahsh-park>)

Un plan de réhabilitation et de développement vise à créer un parc de loisirs et de détente sur une Superficie de 200 ha, Une aire d'activités sportives sur plus de 100 ha est également prévue. Initié en 2005 par le ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, le projet d'aménagement d'un parc suburbain à Djebel Ouahch ne s'est pas concrétisé, à ce jour, sur le terrain. Confié aux soins de la direction de la biodiversité, ce méga projet prévu sur 550 ha. A cet égard, ce dessein a pour ambition, au vu du plan de gestion et de développement de cette vaste zone naturelle considérée comme le poumon du Vieux rocher, de classer au final la forêt de Djebel Ouahch en aire protégée en raison de la diversité de sa faune et de sa flore.

II-3-2-Le parc de Bardo

Le parc urbain du Bardo a été construit sur une assiette ayant abritée des habitations précaires, éradiquées dans le cadre d'une vaste opération de relogement lancée par les autorités locales en 2009. S'étendant sur une superficie de 65 hectares, ce parc écologique, le premier du genre à l'échelle nationale, est composé entre autres d'un jardin botanique, de cours d'eau, de piscine, d'espaces forestiers, et d'une ferme pédagogique aux abords du Rhumel, ainsi que d'une maison écologique appelée la maison du Bardo, mettant en exergue l'impact de ce grand projet dans le développement du sens environnemental et de la protection de la nature chez les citoyens (Figures 14 et 15)



Figure 14: Terrain du parc de Bardo avant l'intervention (Archive de l'auteur)



Figure 15: Parc de Bardo actuellement (Auteur, 2019)

II-3-3-Espace vert dans les quartiers résidentiels

Les espaces verts dans les grands ensembles d'habitations collectifs ne présentent que de vastes étendues qui ont bénéficié de opérations de verdissement non étudiées et qui ne jouent généralement aucun rôle (Figure).



Figure 16: espaces verts dans l'habitat collectif de Ciloc et Boussouf respectivement (Auteur, 2019)

II-3-4-les espaces verts à Zoughi slimane

C'est un ensemble de trois espaces verts situé dans l'agglomération de Zouaghi, dans une zone en pleine expansion urbaine. Cet espace présente l'avantage d'avoir une forme régulière. Il a fait partie des sites bénéficiés par le projet d'amélioration urbaine de l'agglomération de Zouaghi. Il existe deux jardins ouverts et un autre clôturé. Ce dernier s'étale le long des logements Bortolazzo de la cité des frères Ferrade, il est équipé de bancs et d'une aire de jeux doté d'un terrain de sable pour la protection des enfants et d'un espace pour la pratique du sport (Figure 17). Un deuxième jardin qui s'étale entre deux voies mécaniques, adopte une richesse floristique avec différentes espèces. Il est équipé d'une grande fontaine, des équipements d'éclairage public et des bancs (Figure 18). Et dernièrement un troisième jardin ouvert .

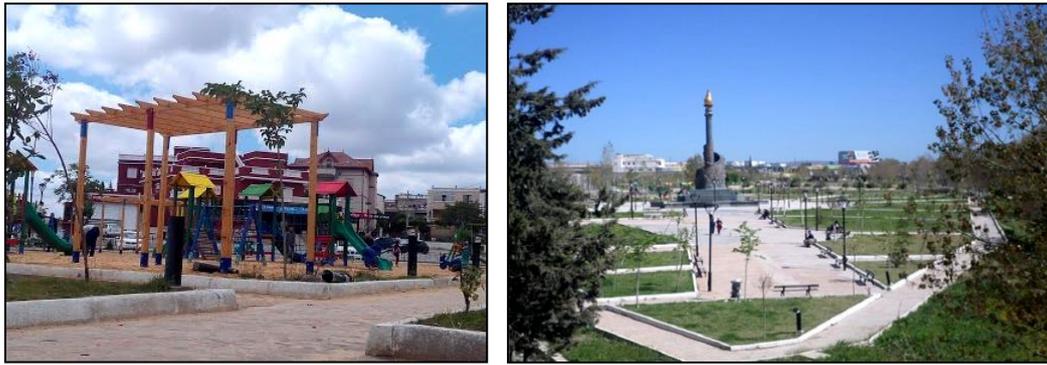


Figure 17: jardin public à Zouaghi Slimane (Archive de l'auteur)



Figure 18: jardin public à Zouaghi Slimane (Auteur, 2018)

II-3-5-Les arbres d'alignement :

Les arbres d'alignement dans la ville de Constantine datent de l'époque coloniale, mais la commune a lancé plusieurs opérations pour implanter des arbres d'alignement. Les espèces les plus utilisées sont: *Acacia dealbata*, *Populus nigra*, *Eucalyptus globulus*, et *Ficus retusa*. Les problèmes que nous avons relevés sur les arbres d'alignement concernent les fosses de plantation, le non respect de la distance entre l'arbre et le bâti et le non remplacement des sujets morts. Ces arbres rencontrent plusieurs contraintes : la mutilation, l'abattage et la pollution. Cependant, nous constatons que des tuteurs sont utilisés dans certaines rues pour protéger les jeunes plants et des grillages sont placés pour protéger les sols contre le piétinement et permettre à l'arbre de récupérer l'eau pluviale (Figure 19).



Figure 19: arbres d'alignement à Constantine (Auteur, 2019)

II-3-6-Les forêts urbaines

La ville de Constantine comptait plus de 150hectares de forêts urbaines avant l'indépendance, alors que ne compte aujourd'hui moins de 50 hectares. Selon (Ali Khoudja, 2011 et 2017), la forêt d'El Mansourah, la plus importante forêt urbaine de la ville comptait plus de 61hectares, mais l'installation de la 5^{ème} région militaire, le pont géant et la croissance urbaine ont réduit considérablement la superficie de cette forêt (moins de 7 hectares) (Figure 20)

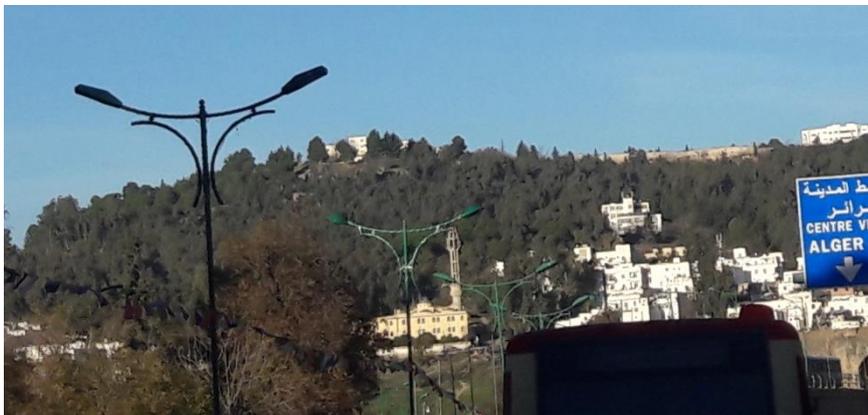


Figure 20 : Vue sur la forêt d'El Mansourah (Auteur, 2019)

La forêt El Meridj a toujours été l'un des poumons verts de Constantine en s'étalant sur 200 hectares, un lieu de loisir et de détente par excellence attire les habitants de la wilaya de Constantine ces dernières années, le reboisement de cette forêt a eu lieu pendant la colonisation mais dans cette dernière décennie, elle a bénéficié de plusieurs projets d'aménagement pour la rendre accessible par les habitants. Le projet de 2011 était de créer un espace commercial avec une maison de l'Artisanat. L'année suivante, celui d'aménager des espaces de jeux et de loisirs fut plus réalisable. Et peu à peu, des voies d'accès bitumées, des

lampadaires, du mobilier urbain, des conduites d'eau potable, des pistes cyclables, deux lacs artificiels et une cascade rendirent ce site encore plus attirant (Figure 21).

« Les seules forêts périurbaines qui ont été équipées en installations de loisir sont celles de Djebel-El-Ouahch et la forêt d'El-Meridj qui en 1981 a été équipée en parkings en terrains de sports et en installations de jeux pour les enfants des balançoires, des toboggans ainsi que des tables et des bancs pour pique-niques. » (Ali Khoudja, 2017)



Figure 21: Forêt El Meridj (<https://www.trfihi-parks.com/en/park-details/4829-El-Meridj>)

II-3-7-Les berges des Oued Rhumel et Oued Boumerzoug :

L'aménagement des oueds est une opération structurante qui a été engagée sur un linéaire de près de 12 km. Ce chantier a été subdivisé en trois lots, le premier sur 1,2km entre le pont du diable et la gare routière (ouest) à proximité du stade Chahid Hamlaoui, le second ciblant 1,6km entre la gare routière et la zone industrielle et le troisième lot de près de 9 km de la partie ouest de la ville jusqu'au centre de l'agglomération constantinoise. L'objectif de ces travaux est la réalisation sur les berges de ces deux oueds de plusieurs cascades d'eau, des ponts et passages pour piétons et des jets d'eau, en plus de l'aménagement d'espaces verts, de loisirs et de détente pour la population. Ces équipements sont réalisés sur les abords de ces deux oueds, au niveau de Djenane Zitoune, Bardo, en plein cœur des quartiers de Boumerzoug et Bab El Kantara (Figure 22).



Figure 22: Berge d'Oued Rhumel et Boumerzoug respectivement (Auteur, 2019)

III-La normalisation des espaces verts en Algérie :

Dans les pays développés, les espaces verts sont classés en termes d'échelle et de distribution. Chaque pays dispose de normes standards qui sont formulées en m² par habitant et varient d'une région à une autre, selon la particularité du lieu et selon le climat.

Cependant, des villes dans le monde montrent des ratios élevés et supérieurs à la norme internationale fixée à 10 m²/hab. Les grandes wilayas d'Algérie à vocation industrielle et qui connaissent des problèmes de pollution atmosphérique présentent des ratios très faibles: Alger (0.11 m²/hab.), Oran (0.32 m²/hab.), Annaba (0.32 m²/hab.).

Pendant plus de deux décennies, la circulaire interministérielle du 31 octobre 1984 reste le seul texte qui édicte les normes concernant les espaces verts en Algérie. Cette circulaire est venue pour parachever l'organisation urbaine afin qu'elle soit harmonieuse et équilibrée et cela à partir d'une évaluation des besoins dans le domaine d'espace vert selon la nature de chaque opération urbaine, en ordonnant les normes minimales d'espaces verts urbains comme suit (Mili, 2018):

1- Espace vert d'accompagnement pour les cités d'habitations collectives ou les lotissements :

6.8 m²/habitant, repartis comme suit :

- ✓ Espace vert résidentiel planté : **1.8 m²/habitant** ;
- ✓ Aires de jeux :
 - Jardin d'enfant (moins de 4 ans) : **0.20 m²/habitant**
 - Jardin d'enfant (de 4 à 10 ans) : **0.80 m²/habitant**
 - Aire sablée pour jeux libres : **0.5 m²/ habitant**
 - Plaine de jeux pour enfants au dessus de 10 ans : **3 m²/habitant**
- ✓ Espace libre homogène de rencontre sous forme de placettes, allées de promenade, boulevards : **0.5 m²/habitant.**

2- Espace vert inter quartier (square et jardin public) : 4 m²/habitant ;

3-Espace vert situé autour des édifices publics et à l'intérieur des structures à vocation socio-économique et culturelle dont les zones industrielles, parcs et forêts récréatifs : 10m²/habitant.

IV-Cartographie et inventaire des espaces verts de la ville de Constantine

IV-1-Méthodologie du travail

La méthode consiste à faire un document cartographique (un inventaire pour savoir quantifier l'espace vert existant), pour cela, on a fait recours au système d'information géographique (ArcGIS) et le logiciel d'observation de la terre (Google Earth). La création de la base de données géographique, nécessaire à l'étude des espaces verts, passe par trois étapes :

- ✓ vectorisation de tous les espaces verts de la ville de Constantine ;
- ✓ relevé de terrain et collecte de données ;
- ✓ intégration des données collectées dans ArcGis 10.5
- ✓ Faire un inventaire de l'état actuel de l'espace vert de la ville de Constantine
- ✓ Calculer la carence et le déficit en espace vert par rapport à la norme algérienne

La vectorisation des espaces verts est faite par le logiciel Google Earth à l'aide d'images satellitaires pour délimiter les espaces verts, les arbres d'alignements et les zones boisées. La digitalisation a été effectuée pour délimiter les espaces verts par :

- ✓ des polygones (Forêt, parc, jardin square, aire de jeux, espace vert de voirie etc.) ;
- ✓ des lignes (berge d'Oueds) (Figure 23) ;

Les images utilisées appartiennent au satellite très haute résolution Landsat datant du 29/01/2020, une fois la vectorisation sous Google Earth achevée, les fichiers vecteurs des espaces verts seront transférés vers ArcGis 10.5 pour subir une projection cartographique afin de créer la base de données cartographique nécessaire pour l'étude spatiale et l'analyses quantitative des espaces verts (création de l'inventaire) puis le calcul de ratio et le déficit de l'espace vert par secteur.

IV-2-Vectorisation de l'espace vert :

Dans cette étape on a basé sur la vectorisation des forêts, parcs, jardins, espace vert de Voirie, espaces verts résidentiels Aménagés ou non aménagés, les aires de jeux et les espaces qui présentent un potentiel pour créer des espaces verts futures (Figure 23)

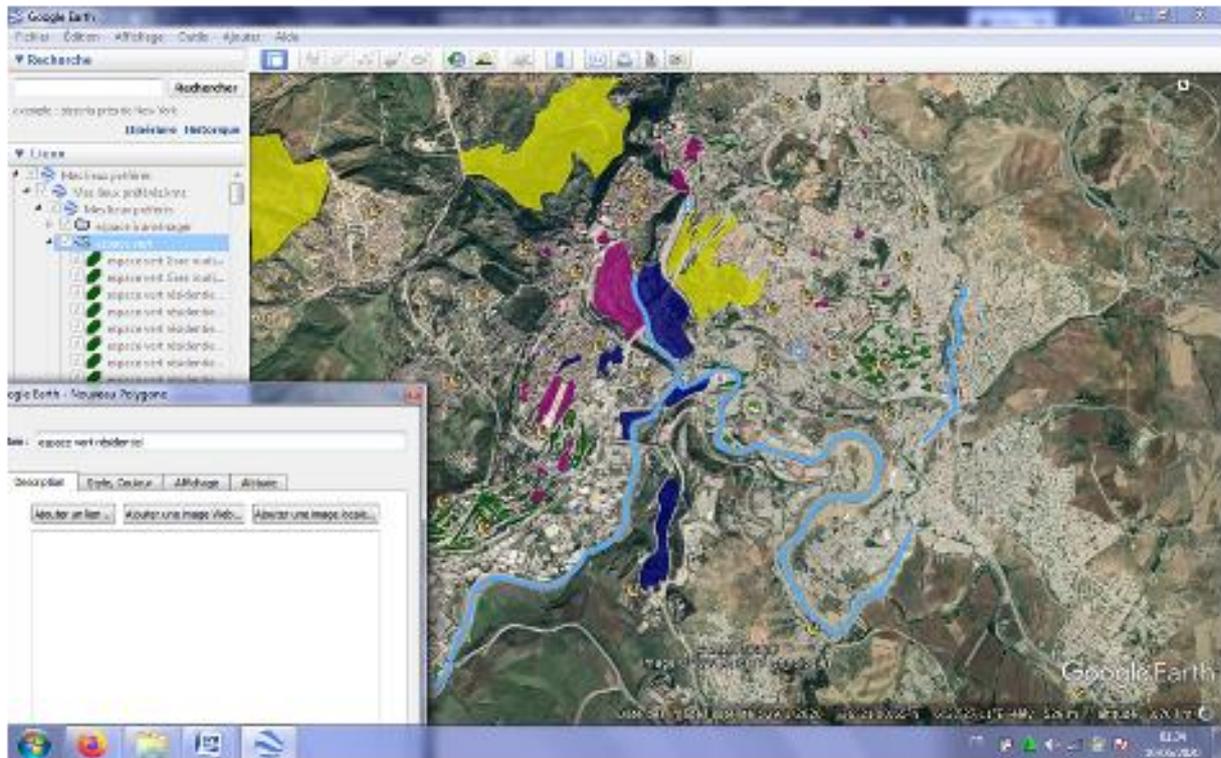
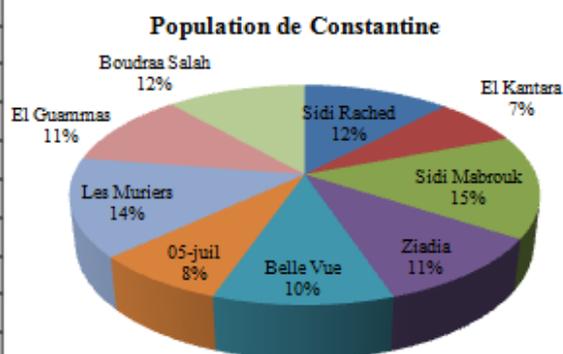


Figure 23: vectorisation des espaces verts à Constantine (Auteur, 2020)

IV-3- Distribution de la population à Constantine

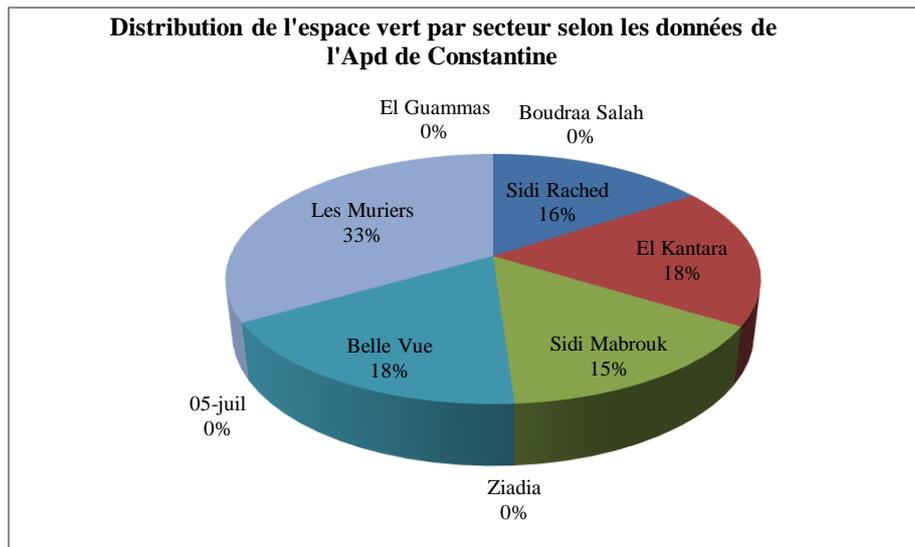
La population de la ville de Constantine est distribuée sur 9 secteurs selon le recensement général de la population et de l'habitat (RGPH) de 2008, la distribution est presque équitable dont les secteurs les plus peuplés sont Sidi Mabrouk avec 66109 habitants et les Muriers avec 63207habitants, tandis que les secteurs moins peuplés sont el Kantara et 5 Juillet (Gaphe 1).

Secteur	Population
Sidi Rached	52.801
El Kantara	31.074
Sidi Mabrouk	66.109
Ziadia	46.642
Belle Vue	45.674
5 juillet	33.930
Les Muriers	63.207
El Guammas	48.389
Boudraa Salah	50.335
Total	438161



Graph 1: distribution de la population de la ville de Constantine par secteur (Auteur, 2020)

Selon les données de l'APC de Constantine, l'espace vert est constitué de 17 jardins représentant les espaces de récréation et de loisirs principaux pour les habitants de la ville, ils sont distribués comme suit (Graph 2):



Graph 2: distribution de l'espace vert de la ville de Constantine par secteur selon les données de l'APC (Auteur, 2020)

IV-4-traitement de données sur ArcGis

Le fichier vecteur préparé sur Google Earth sous format KML a été transféré vers ArcGis 10.5 sous forme d'un Shapefile pour estimer la surface de chaque type d'espace vert existant dans chaque secteur (Figure 24).

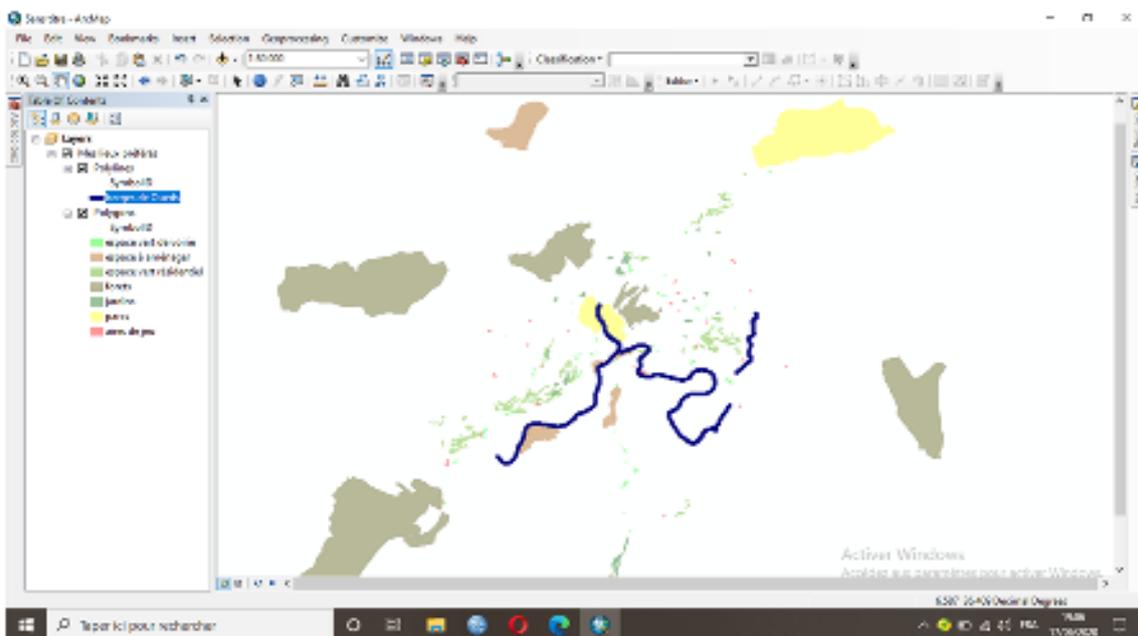


Figure 24: traitement de données collectées sur ArcGis10.5 (Auteur, 2020)

IV-5-Inventaire quantitatif de l'espace vert à Constantine

Après avoir vectorisé et traité les données collectées, les espaces verts constituant la couverture végétale de la ville de Constantine sont divisés en aires de jeux pour les enfants et de pleines de jeux pour les adolescents, les espaces vert résidentiels, les jardins et les squares, les parcs et les forêts de récréation, les résultats enregistrés sont comme suite :

IV-5-1-Secteur de Sidi Rached

Ce secteur représente le cœur de la ville, un tissu composé de traditionnel et de colonial, il se caractérise par une densité urbaine très élevée, malgré le grand nombre des gens qui fréquentent, habitent et utilisent ce secteur, le tissu est presque dépourvu de tous types d'espace vert, sauf les deux jardins créés dans la période coloniale (Jardin Bennacer et Jardin Guessoum) et le parc de Bardo créé récemment et qui reste hors service jusqu'au aujourd'hui (Figure 25).

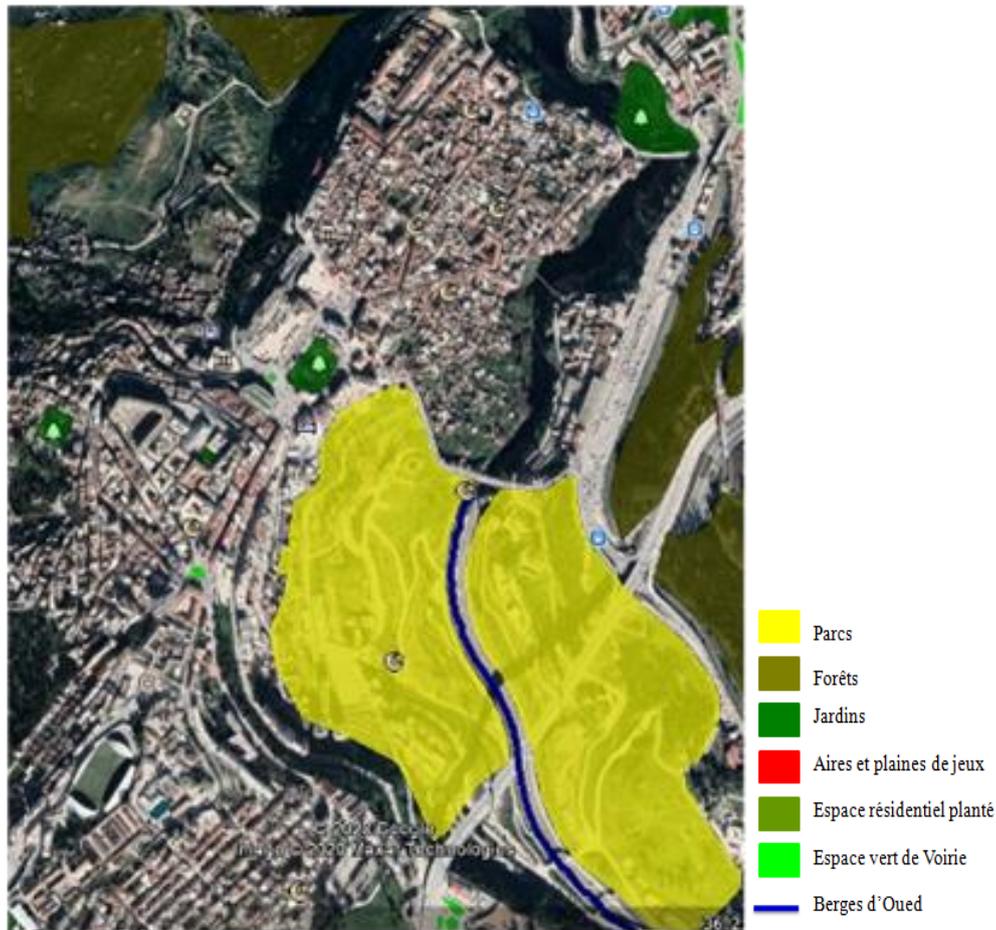


Figure 25: secteur urbain Sidi Rached (Auteur, 2020)

Les résultats de notre étude sont enregistrés dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1: espace verts de secteur de Sidi Rached (Auteur, 2020)

Secteur Sidi Rached		
	Espace	Surface m ²
Jardins	Jardin Guessoum 5024 m ²	14441
	Jardin Bennacer 9417m ²	
Aire de jeux		-
Espace vert résidentiel		-
Parc de Bardo		655000
Totale		669441

La surface verte dans ce secteur est dominée par la surface du Parc de Bardou, Un espace public qui peut servir toute l'agglomération de Constantine avec excellence, alors que la surface des jardins reste très modeste et insuffisante par rapport à la densité urbaine de ce secteur, nous avons remarqué aussi le manque de tous types d'aire de jeux pour enfant ou adolescent, et espace vert résidentiel hormis quelque jardins privés tel que le jardin de palais el Bay.

IV-5-2-Secteur d'El Kantara

Un secteur urbain très actif et moins dense que le précédent, l'espace vert se résume en trois jardins, celui de Boudjenana à coté de l'entrée principale de l'hôpital, le jardin Boursas et Sousse, le jardin moins pratiqué parmi les trois. (Figure 26).

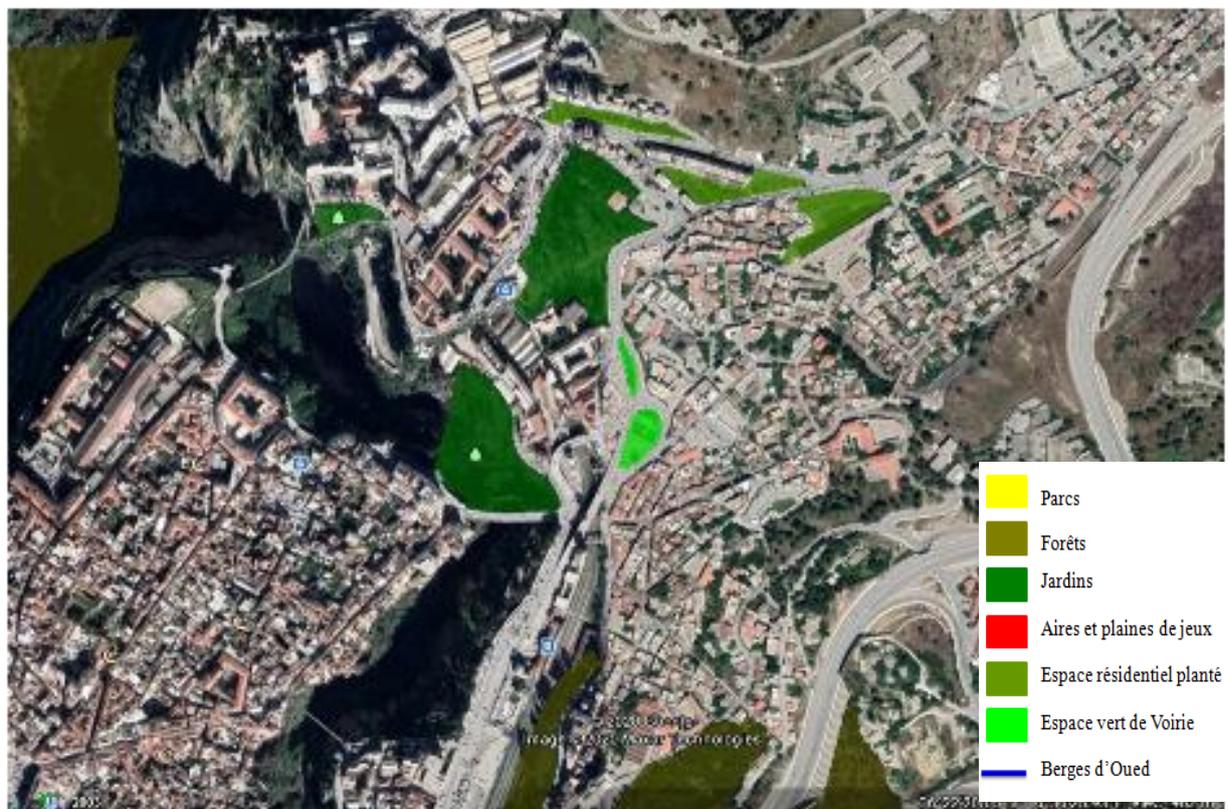


Figure 26: secteur urbain El Kantara (Auteur, 2020)

Les résultats enregistrés dans ce secteur sont présentés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2: espace vert de secteur d'El Kantara (Auteur, 2020)

Secteur El Kantara		
Espace		surface m ²
Jardins	Jardin Boudjenana	3400 m ²
	Jardin Boursas	16500 m ²
	Jardin Sousse	15500 m ²
Aire de jeux		-
Espace vert résidentiel		18036
Parcs		-
Totale		53436

La couverture végétale dans ce secteur reste insuffisante, nous avons enregistré une carence totale d'aires et plaines de jeux (enfant ou adolescents), tandis que la surface des espaces verts résidentiels reste toujours modeste.

IV-5-3-Secteur de Belle Vue

Un secteur très dense aussi, constitué d'un tissu colonial et poste colonial, c'est le secteur le plus riche en espaces verts par rapport aux autres, nous avons enregistré une variété d'espace vert, notamment dans la partie sud (cité de Fadila Saadane, 20 Aout et Fillali) (Figure 27)

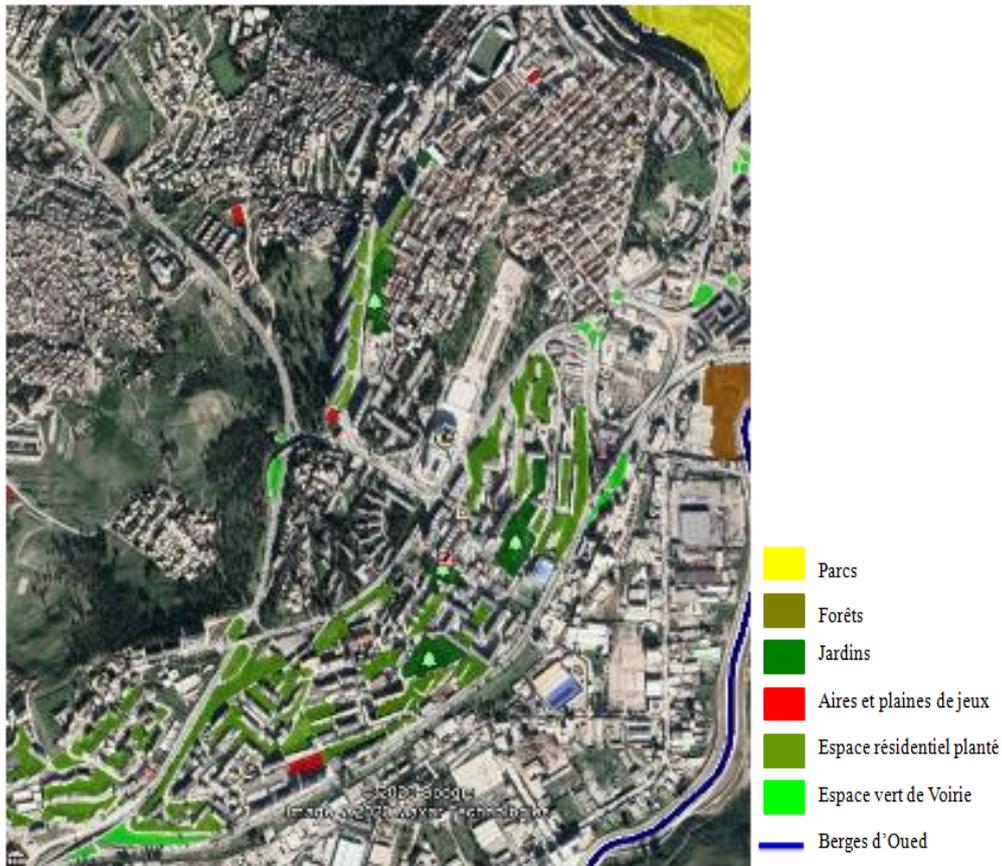


Figure 27: secteur urbain Belle Vue (Auteur, 2020)

Les résultats de notre étude sont présentés dans le tableau 3 suivant :

Tableau 3: espace vert de secteur de Belle Vue (Auteur, 2020)

Secteur Belle Vue		
	Espace	surface m ²
Jardins	Jardin Guerfi	11970 m ²
	Jardin 7 tournants	11655 m ²
	Jardin Benboulaid	19015 m ²
	Jardin Fadila Saadane	4538 m ²
	Jardin 20 Aout	13195 m ²
Aire de jeux		6570
Espace vert résidentiel		190372
Parc s		-
Totale		257315

Nous avons constaté que la couverture végétale dans le secteur de Belle Vue est une couverture acceptable par rapport aux autres secteurs, l'existence de 5 jardins avec une surface totale de 60373m² et des espaces verts d'immeubles avec une surface de 190372m² rend le secteur vert, malgré que la surface des aires et plaines de jeux reste très modeste. Les espaces verts résidentiels souffrent d'un manque d'équipement pertinent.

IV-5-4-Secteur de Sidi Mabrouk

Un tissu urbain très dense et varié (habitats collectif, lotissements, la 5^{ème} région militaire, équipements...etc.), la croissance urbaine dans ce secteur prend place de la forêt d'El Mansourah qui ne compte aujourd'hui que 7 hectare. Cette croissance qui n'a pas donnée faveur à l'espace vert qui reste en-deçà des superficies nécessaires (Figure 28).

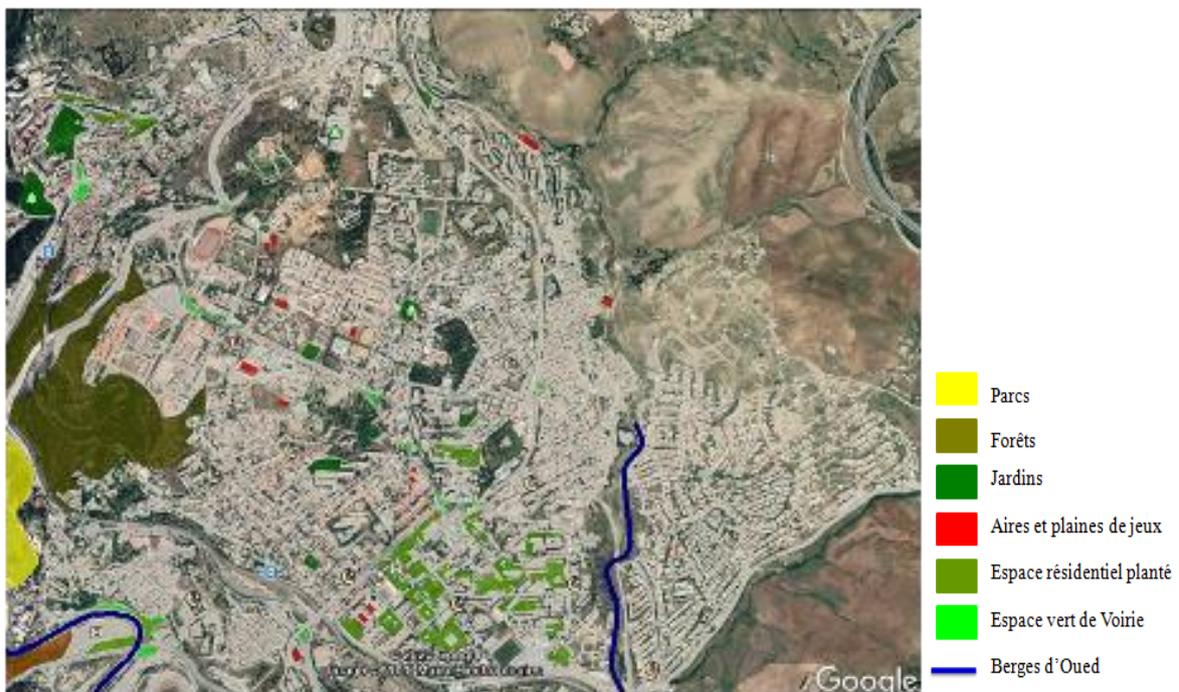


Figure 28: secteur urbain Sidi Mebrouk (Auteur, 2020)

Les résultats de notre étude sont présentés dans le tableau 4 suivant :

Tableau 4: espace vert de secteur de Sidi Mabrouk (Auteur, 2020)

Secteur Sidi Mabrouk		
Espace		surface m ²
Jardins	Jardin Bayrouth	6800 m ²
	Jardin El masdjara	4170 m ²
	Jardin 1	3100 m ²
	Jardin 2	2820 m ²
		16890
Aire de jeux		18080
Espace vert résidentiel		127960
Parcs		-
Totale		162930

On constate que le secteur de Sidi Mabrouk contient plusieurs types d'espace vert, la surface verte oscille entre 16890m² pour les jardins, 18080m² pour les aires de jeux et 127960m² pour les espaces résidentiels plantés, une superficie qui reste insuffisante, on note que les jardins dans ce secteurs sont créés dans la période coloniale.

IV-5-5-Secteur les Muriers

Un secteur urbain très vaste et moins dense, il se compose de plusieurs nouveaux quartiers résidentiels qui se sont développés tout au long de l'axes d'extension de la ville de Constantine vers le sud, un secteur pauvre en matière d'espace vert avec un nombre restreint de jardins (Figure 29).

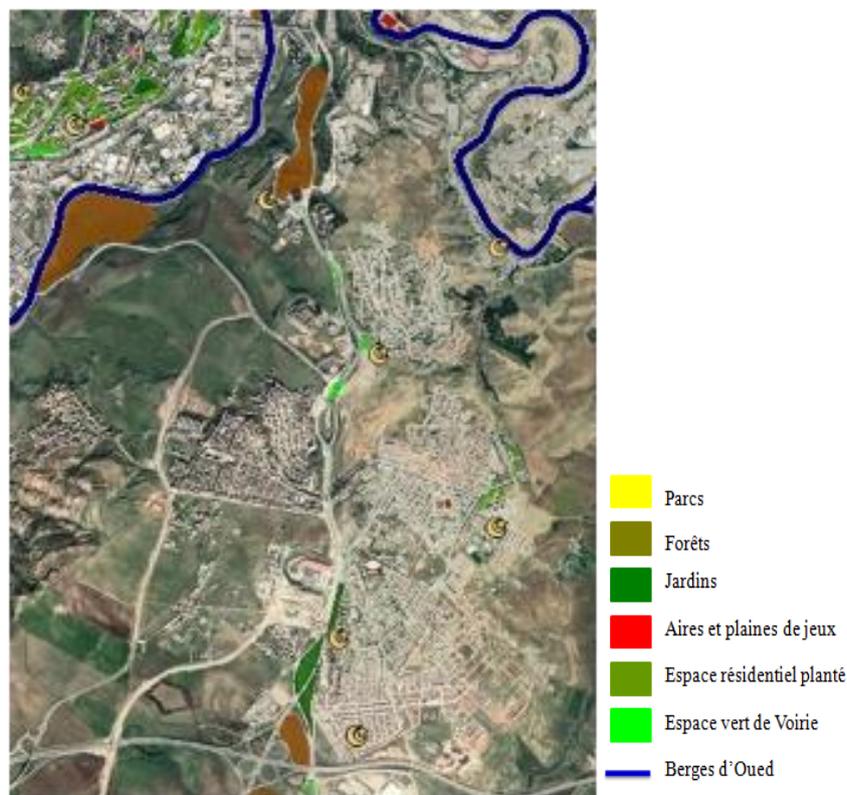


Figure 29: secteur urbain les Muriers (Auteur, 2020)

Les résultats enregistrés sont présentés dans le tableau 5 suivant :

Tableau 5: espace vert de secteur les Muriers (Auteur, 2020)

Secteur les Muriers		
Espace		surface m ²
Jardin	Espace vert Gare routière	11770 m ²
	Jardin Zouaghi 1	12422 m ²
	Jardin Zouaghi 2	19684 m ²
	Jardin Zouaghi 3	20700 m ²
Aire de jeux		34873
Espace vert résidentiel		12330
Parc		-
totale		111779

De la lecture de tableau, on constate que la superficie des de la couverture végétale dans ce secteur urbain est très en-deçà des superficies recommandées notamment celles des aires de jeux et des espace résidentiels plantés, la surface verte ne dépasse les 111779m². On note aussi que les jardins au niveau de la cité Zoughi Slimane sont moins fréquentés par rapport à ceux du centre ville, on déplore le fait que ces jardins sont récemment créés mais ils souffrent d'un manque d'équipement, ainsi qu'ils sont mal placés entre deux voies principale ce qui a créé des problèmes aux utilisateurs.

IV-5-6-Secteur 5 Juillet

Ce secteur urbain s'est développé sur l'axe sud ouest qui relie la ville de Constantine et Ain Smara, il se compose généralement des cités collectives et la zone industrielle (Figure 30).

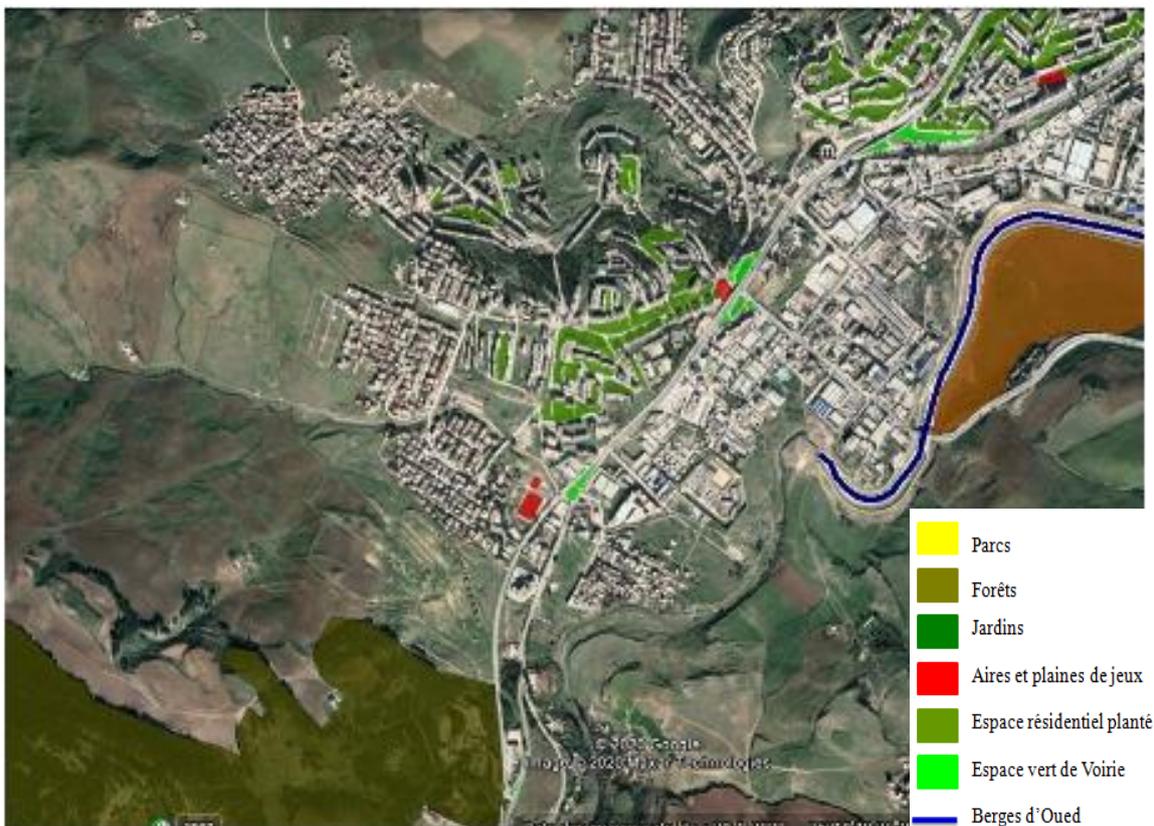


Figure 30: secteur urbain 5 Juillet (Auteur, 2020)

Les résultats enregistrés sont présentés dans le tableau 6 suivant :

Tableau 6: espace vert de secteur 5 juillet (Auteur, 2020)

Secteur 5 juillet	
Espace	surface m ²
Jardin	-
Aire de jeux	9820
Espace vert résidentiel	97586
Parc	-
Totale	107406

L'analyse de ce tableau montre la dominance des espaces verts résidentiels avec une surface de 97586m², et nous avons enregistré une absence totale de squares et jardins, et 3 aires de jeux représentant la surface totale de ce type d'espace vert.

IV-5-7-Secteur de Ziadia

Un secteur récent et en cours d'urbanisation, il se compose de l'habitat individuel et collectif, les lotissements sont dépourvus de tout type d'espace vert tandis que l'habitat collectif est accompagné par des espaces verts résidentiels considérablement plantés, ce secteur souffre d'une carence en matière de squares et jardins, alors que la surface des aires de jeux reste très modeste par rapport à la norme Algérienne. Ce qui caractérise cette région est le parc de loisir de Djbel El Ouahch, un espace de rencontre, loisir et récréation par excellence (Figure 31)

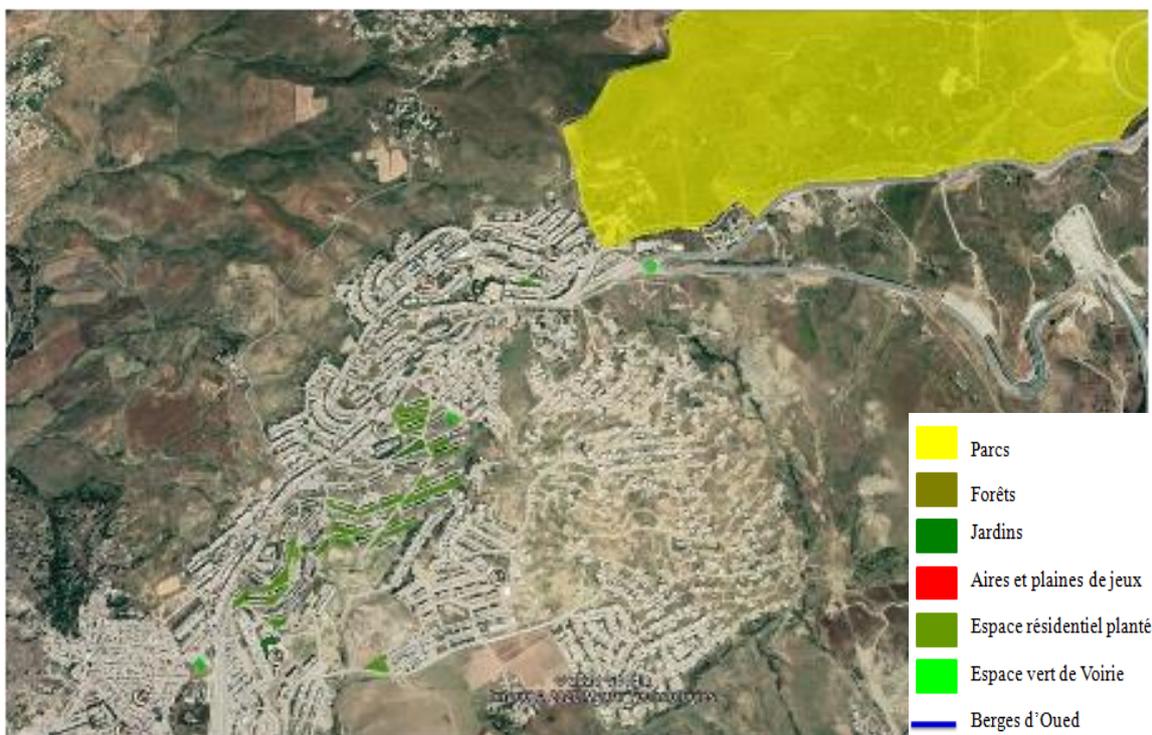


Figure 31: secteur urbain Ziadia (Auteur, 2020)

Les résultats enregistrés sont présentés dans le tableau 7 suivant :

Tableau 7: espace vert de secteur Ziadia (Auteur, 2020)

Secteur Ziadia	
Espace	surface m ²
Jardin	-
Aire de jeux	9050
Espace vert résidentiel	59034
Parc Djbel El Ouahch	3520656
Totale	3588740

La lecture de ce tableau révèle que la surface d'espace vert dans ce secteur est dominée par la superficie du parc de Djbel El Ouahch qui dépasse 350 hectares, avec l'absence totale de

jardins, quant à l'espace résidentiel planté, la surface reste très modeste par rapport aux terrains vides qui peuvent en servir.

IV-5-8-Secteur de Guammas

Un secteur totalement dépourvu de l'espace vert, malgré la densité urbaine très élevée. La trame urbaine très serrée empêche de créer des poches vertes au sein de ce tissu urbain (Figure 32)

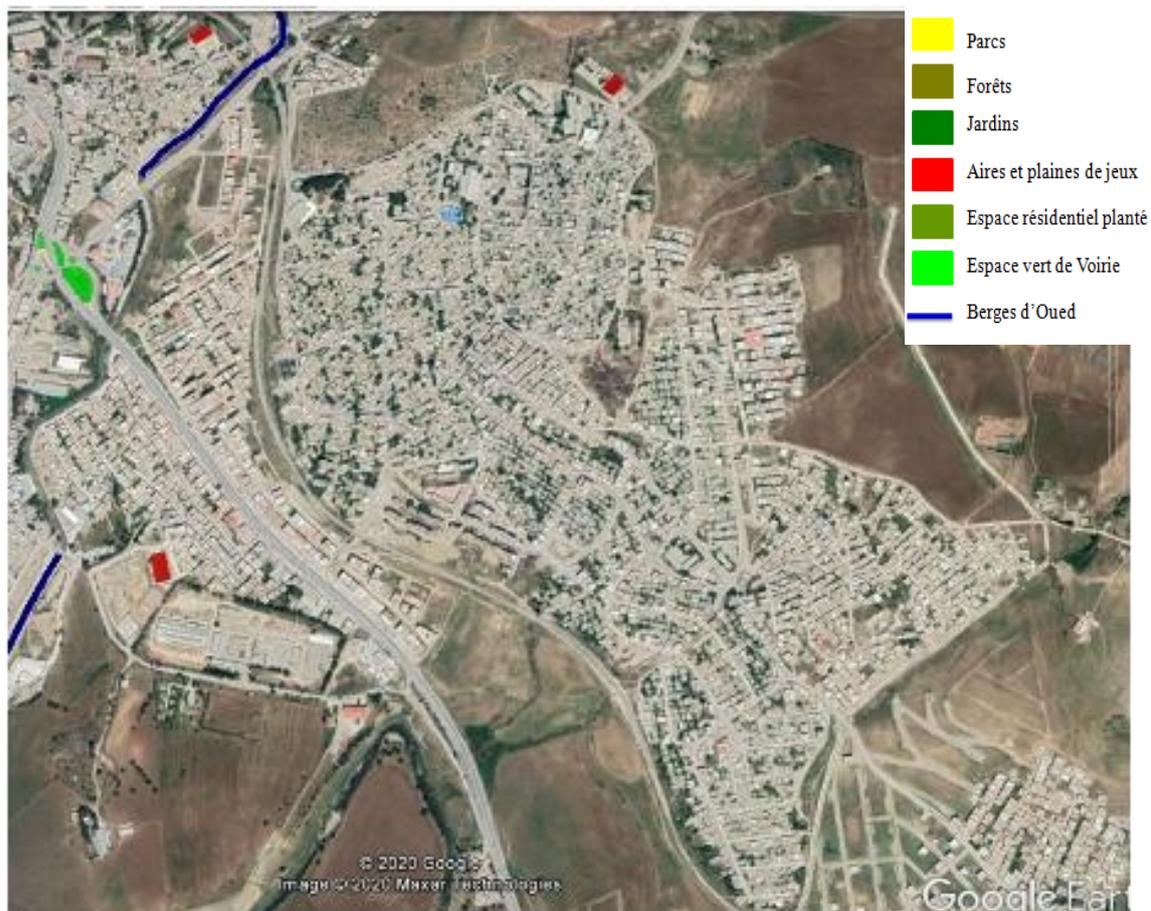


Figure 32: secteur urbain El Guammas (Auteur, 2020)

Les résultats enregistrés sont présentés dans le tableau 8 suivant :

Tableau 8: espace vert de secteur El Guammas (Auteur, 2020)

Secteur El Guammas	
Espace	surface m ²
Jardin	-
Aire de jeux	3550
Espace vert résidentiel	-
Parc	-
totale	3550

De notre étude, nous avons enregistré une carence sévère en matière d'espaces verts, nous avons remarqué que seulement 2 aires de jeux constituent la totalité de la surface verte dans ce secteur urbain, et qui reste en-deçà de la superficie recommandée par la norme Algérienne.

IV-5-9-Secteur de Boudraa Saleh

Un autre secteur qui souffre aussi de la carence en espace vert, une surface verte très en-deçà des superficies recommandées par la norme Algérienne (Figure 33).

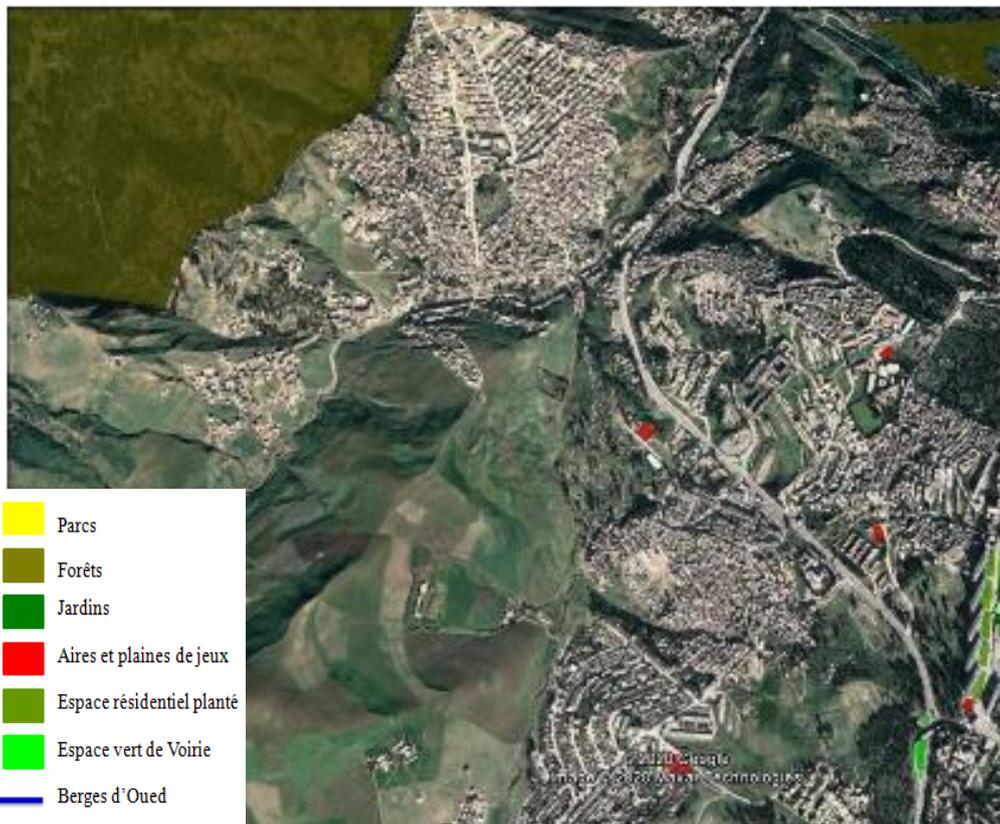


Figure 33: secteur urbain Boudraa Saleh (Auteur, 2020)

Les résultats enregistrés sont présentés dans le tableau 9 suivant :

Tableau 9: espace vert de secteur Boudraa Saleh (Auteur, 2020)

Secteur Boudraa Salah	
Espace	surface m ²
Jardin	-
Aire de jeu	7489
Espace vert résidentiel	-
Parc	-
Totale	7489

De l'analyse de tableau il révèle que seulement quatre terrains de jeux avec une surface de 7489m², représentent la surface verte dans le secteur de Boudraa Saleh, une surface qui reste loin de la norme recommandée malgré la densité très élevée de population, et la situation stratégique de ce secteur tout au long de l'axe qui relie la ville de Constantine avec plusieurs Wilaya à savoir Mila, Jijel, Annaba et Skikda.

Le tableau 10 ci-dessous résume la distribution et la composition de la couverture végétale de la ville de Constantine :

Tableau 10 : tableau récapitulatif de distribution et la composition de la couverture végétale de la ville de Constantine (Auteur, 2020)

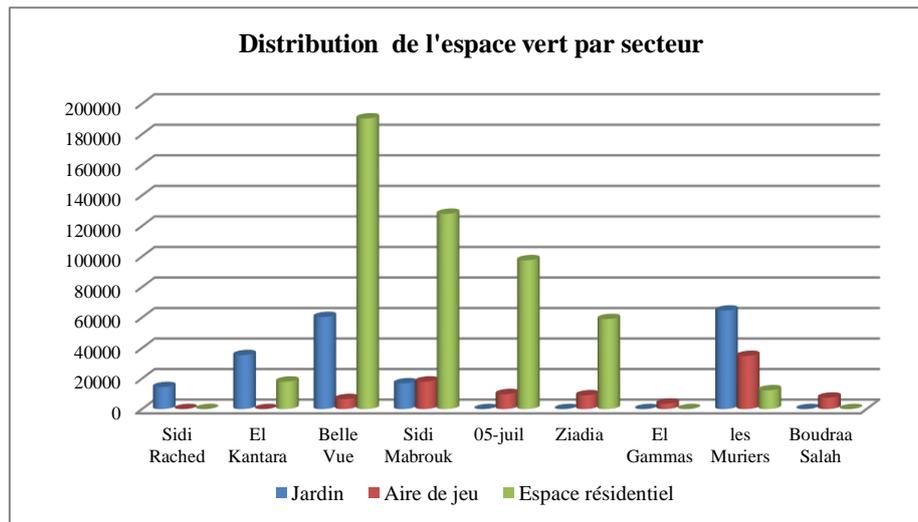
Secteur	Jardin	Aire de jeux	Espace résidentiel	Parc	Forêts récréatifs
Sidi Rached	14441	-	-	550000	-
El Kantara	35400	-	18036	-	-
Belle Vue	60373	6570	190372	-	-
Sidi Mabrouk	16890	18080	127960	-	-
5 juillet	-	9820	97586	-	-
Ziadia	-	9050	59034	3520656	-
El Gammas	-	3550	-	-	-
les Muriers	64576	34873	12330	-	-
Boudraa Salah	-	7489	-	-	-
Totale	191680	89432	505318	4070656	3500000
Surface totale	Espace vert urbain 786430m²			Espace vert périurbain 7570656 m²	

Le tableau 10 résume la distribution totale de la couverture végétale dans notre cas d'étude, nous avons recensé 17 jardins d'une surface totale de 191680m² distribué déloyalement entre cinq secteurs urbains dont le secteur de 5 juillet, Ziadia, El Gammas et Boudraa Saleh sont dépourvue totalement de ce type d'espace vert (Graphe 3).

Pour les aires de jeux, une distribution inéquitable aussi entre secteurs dont la surface totale est de 89432m², nous avons enregistré une carence totale au niveau de Sidi Rached et El Kantara ; deux secteurs très denses et conviviaux et qui présentent le cœur de la ville, les deux secteurs les Muriers et Sidi Mabrouk contiennent le grand nombre, tandis qu'El Gammas et Boudraa Saleh ne comptent que 3 ou 4 terrains de jeux (Graphe 3).

Les espaces résidentiels plantés sont accompagné généralement à l'habitat collectif, notre étude révèle que presque la totalité des lotissements et de l'habitat individuels sont dénuées des espaces plantés. La distribution de la surface totale (505318m²) entre secteurs reste déloyale dont le secteur de belle vue est le plus planté suivie par le secteur de Sidi Mabrouk, alors que le secteur de Sidi Rached, El Guammas et Boudraa Saleh ne comptent aucun espace vert résidentiel(Graphe 3).

La ville de Constantine a bénéficié de la création de deux parcs de loisirs qui servent toute l'agglomération de Constantine à savoir le parc de Djbel El Ouajch d'une surface de 3.520.656m² soit plus de 350 hectares et celui de Bardou d'une surface de 550000m². Quant aux forêts récréatives la forêt d'El Meridj, Constantine compte une surface plus de 350 hectares (Graphe 3).



Graph 3: Distribution de l'espace vert cartographié par secteur (Auteur, 2020)

IV-6-Estimation de déficit en espace vert

Selon Benhassine (2009), les 7 squares de la ville de Constantine ne comptent que 37.250 m² sur une surface totale de 161.600 m². Ce qui donne un ratio de 0,06 m²/hab. (Benhassine & Labi, 2009), pour Ali khoudja (2010), le ratio de l'espace vert est de 0,29 m²/hab (Ali Khoudja 2010). Une autre étude de sur les espace verts en Algérie montre que le ratio de l'espace vert à Constantine ne dépasse 0,05 m²/ hab (GHERIB et al, 2016), après avoir suivie la méthodologie expliquée auparavant nos résultats sont présentés dans le tableau 11 comme suit :

Tableau 11: espace vert disponible et ratio à la ville de Constantine (Auteur, 2020)

Secteur	Espaces verts existants (m ²)				Ratio (m ² par habitant)			
	jardins	E.V.R	Aires de Jeux	Parc et forêts	Ratio jardin	Ratio E.V.R	Ratio aires de Jeux	Ratio Parc et forêts
Sidi Rached	14441	-	-	-	0,27	-	-	-
El Kantara	35400	18036	-	-	1,13	0,58	-	-
Belle Vue	60373	190372	6570	-	1,32	4,16	0,14	-
Sidi Mabrouk	16890	127960	18080	-	0,25	1,93	0,27	-
5 juillet	-	97586	9820	-	-	2,87	0,28	-
Ziadia	-	59034	9050	-	-	1,26	0,19	-
El Gammas	-	-	3550	-	-	-	0,07	-
les Muriers	64576	12330	34873	-	1,02	0,19	0,55	-
Boudraa Salah	-	-	7489	-	-	-	0,14	-
Totale	191680	505318	89432	7570656	0,43	1,15	0,2	17,27
	Espace vert urbain 786430			E.V périurbain 7570656	Ratio EV urbain 1,79			E.V périurbain 17,27

De l'analyse de tableau 11, il ressort que le calcul de ratio de l'espace vert nous donne les résultats suivant :

- Le secteur de Sidi Rached : le ratio de l'espace vert dans ce secteur est celui des jardins publics **0,27m²/hab** ;
- Le secteur d'El Kantara : on compte un ratio de 1,13 m²/hab pour les jardins, 0,58m²/hab pour les espaces verts résidentiels, ce qui totalise **1,71 m²/hab** ;
- Le secteur de Belle Vue : dans ce secteur on compte 1,32 m²/hab pour les jardins, 4,16 m²/hab pour les espaces verts résidentiels et 0,14 m²/hab pour les aires de jeux, ce qui nous donne un total de **5,62 m²/hab**. un ratio un peu considérable par rapport aux autres secteurs ;
- Le secteur de Sidi Mabrouk : on a enregistré un ratio de 0,25 m²/hab pour les jardins, 1,93 m²/hab pour les espaces verts résidentiels et 0,27 m²/hab pour les aires de jeux, ce qui totalise **2,45 m²/hab** ;
- Le secteur de 5 juillet : un ratio de 2,87 m²/hab pour les espaces résidentiels plantés et 0,28 m²/hab pour les aires de jeux, le total est **3,15 m²/hab** ;
- Le secteur de Ziadia : on a obtient un ratio de 1,26 m²/hab pour les espaces verts résidentiels et 0,19 m²/hab pour les aires de jeux, le total est **1,45 m²/hab** ;
- Le secteur d'El Gammas : le secteur le plus pauvre en matière d'espace vert, le ratio total est celui des aires de jeux avec une valeur de **0,07 m²/hab** ;
- Le secteur des Muriers : on compte 1,02 m²/hab ratio de jardins publics, 0,19 m²/habn ratio des espaces résidentiels plantés et 0,55 m²/hab ratio des aires et plaines de jeux, ce qui totalise **1,76 m²/hab** ;
- Le secteur de Boudraa Salah ; un deuxième secteur souffre de la carence en espace vert, le ratio de ce dernier est celui des aires de jeux **0,14 m²/hab**.

On déplore que le ratio total de l'espace vert urbain (Aires et plaines de jeux, espaces résidentiels plantés, jardins et squares) est de **01,17m²/hab**, un ratio très faibles et demeure très loin de la norme Algérienne qui préconise 6,8 m²/hab pour l'espace vert urbains.

Quand aux forêts récréatifs et Parcs, la surface préconisée est de 10m²/ha, les deux parcs sont hors service actuellement, si on prend seulement la surface des forêts on aura un ratio de **7,98m²/hab**, mais si on ajoute la superficie des deux parcs on aura un ratio de **17,27m²/hab** en dépassant la surface préconisée.

Après avoir étudié la distribution et la composition de la couverture végétale nous passons au calcul des besoins et carences par secteur (Tableau 12)

Tableau 12: besoin et déficit en espace vert à la ville de Constantine (Auteur, 2020)

Secteur	Besoin en espace vert (m ²)				Déficit en espace vert (m ²)			
	Besoin en jardin	Besoin en E.V.R	Besoin aires de Jeux	Besoin Parc et forêts	déficit en jardins	déficit en E.V.R	déficit en Aires de jeux	déficit en Parc forêts
Sidi Rached	211204	95041,8	264005	-	196763	95041,8	264005	-
El Kantara	124296	55933,2	155370	-	88896	37897,2	155370	-
Belle Vue	182696	82213,2	228470	-	122323	-	221900	-
Sidi Mabrouk	264436	118996,2	330545	-	247546	-	312465	-
5 juillet	135720	61074	169650	-	135720	-	159830	-
Ziadia	186568	83955,6	233210	-	186568	24921,6	224160	-
El Gammas	193556	87100,2	241945	-	193556	87100,2	238395	-
les Muriers	252828	113772,6	316035	-	188252	101442,6	281162	-
Boudraa Salah	201340	90603	251675	-	201340	90603	244186	-
Totale	1752644	788689,8	2190805	4381610	1560964	283371,8	2101373	-
	Besoin en EV urbain 4732138,8			E.V périurbain 4381610	Déficit en EV urbain 3945708,8			-

De l'analyse de tableau, il ressort que l'ensemble de secteurs urbains connaît un déficit de 1560964m² soit 156 hectares en matière de jardins, de 283371,8m² soit 28,33 hectares en matière d'espaces résidentiels verts et de 2101373m² soit 210,13 hectares en matières d'aires de jeux.

Selon la norme édictée par le circulaire interministériel n° 6838, la superficie nécessaire pour atteindre cette norme est de 4732138,8m² 473,21 hectares pour les espaces verts urbains (Aires et plaines de jeux, espaces résidentiels plantés, jardins et squares) et de 4381610m² soit 438,16 hectares en espace vert interurbain (Parcs et forêts de récréation). A travers nos calculs, il ressort que notre ville connaît un déficit estimé à environ 3.945.708,8m² soit 394,57 hectares et ça concerne seulement les espaces verts inter-quartiers, Quand aux parcs et jardins publics ; la surface est largement suffisante pour la population de la ville de Constantine sans prendre en considération la population des autres centres urbains qui les fréquentent.

Pour les allées de promenades, la norme Algérienne préconise 0,5m²/hab, on a enregistré une longueur de 12,28Km soit 12280m et une largeur de 10m aménagé en Berges de Oued, 122800m² soit un ratio de **0,28m²/hab** qui peut servir comme une allée de Promenade.

Conclusion

À l'époque turque, Constantine était à l'image d'une civilisation maghrébine. Les espaces verts étaient périurbains à caractère agricole, ils se trouvaient derrière les remparts. Le seul espace vert dans la ville se trouvait dans les jardins des maisons et de palais du bey (Benhassine, 2009). L'époque coloniale s'est distinguée par une dynamique particulièrement identique à celle de la reconstruction des villes européennes. L'émergence des espaces verts urbains sous toutes leurs formes : forêt urbaine, arbres d'alignements et squares, a été vue à cette époque. Après l'indépendance, Constantine a connu une évolution urbaine à cadence très rapide. Le processus d'attraction a donné l'exode rural qui provoqua à son tour la crise de logement. Dans l'optique de résorber cette crise, le phénomène de diffusion fait apparition par l'extension de la commune sur la périphérie. Engendrant, ainsi, la rareté des espaces verts dans la proche campagne et dans la ville.

L'approche cartographique nous a permis de faire un inventaire quantitatif pour estimer l'existant, le besoin et le déficit en matière d'espace vert. Notre cas d'étude compte un nombre restreint de jardins et de squares, une surface insuffisante des espaces verts résidentiels qui demeurent non aménagés pour répondre aux besoins des usagers, et un nombre très modestes des aires et plaines de jeux en donnant un ratio de $01,17\text{m}^2/\text{hab}$ pour les espaces verts urbains, $7,98\text{m}^2/\text{hab}$ pour les forêts récréatives et $0,28\text{m}^2/\text{hab}$ pour les allées de promenade.

La ville de Constantine renferme un potentiel en terres agricoles et espaces verts qui peuvent servir comme espaces publics verts bien structurés afin de combler le déficit actuel et hausser le ratio pour atteindre la norme recommandée.

Chapitre n° 3 :

**Evaluation de l'impact de l'espace
vert sur le climat urbain de la ville de
Constantine à travers la télédétection**

-Introduction

Le désir des gens de vivre ensemble dans des groupes était la principale raison de la croissance des grandes villes. Aujourd'hui, plus de 50% de la population mondiale vit dans les villes, un pourcentage qui continue à s'élever, en particulier dans les pays développés (United Nations, 2011). L'urbanisation est un processus qui influe sur la biodiversité, les écosystèmes, les climats régionaux et les microclimats. L'urbanisation rapide entraîne une diminution sévère des espaces verts et une augmentation rapide de la surface construite (Guo *et al.*, 2012 ; Landsberg, 1981). En effet, ces surfaces construites sont caractérisées par un albédo faible, une imperméabilité élevée et des propriétés thermiques favorables pour le stockage d'énergie et le dégagement de chaleur (Pena, 2008). Cette transformation rend le cœur de la ville plus chaud que sa périphérie. L'un des plus importants de ces effets est appelé l'îlot de chaleur urbain (ICU), ce dernier est défini comme événement lorsque la zone urbaine est plus chaude que la périphérie. Les émissions de chaleur anthropiques et le chauffage solaire indirect sont les principales raisons de l'effet (ICU). En outre, ce phénomène est causé par plusieurs facteurs, tels que la pollution atmosphérique, le manque de végétation et de plans d'eau et le dégagement de chaleur excessif stocké par les constructions (Santamouris, 2014; Ridd, 1995).

La température de surface du sol a été considérée comme un facteur primordial pour examiner le bilan énergétique de surface et évaluer l'effet ICU de surface (Friedl, 2002; Weng & Fu, 2014 ; Weng *et al.*, 2004). Elle aide également à étudier les risques liés à la chaleur et à la susceptibilité dans les villes (Harlan *et al.*, 2006). L'augmentation de cette température est principalement influencée par les interactions d'énergie entre l'atmosphère et les surfaces de la Terre (Dousset & Gourmelon, 2003).

Les données de télédétection ont été largement utilisées pour analyser l'effet ICU dans de nombreuses études, en plus des données obtenues à partir de mesures au sol. La première observation d'ICU de la surface du sol utilisant des données de capteurs satellitaires a été signalée par Rao (1972), qui a exploré la possibilité de distinguer les régions urbaines sur la base de données infrarouges thermiques (TIR) acquises par un capteur. Depuis lors, diverses combinaisons de capteurs et de plates-formes basées sur des satellites ont été utilisées pour les observations à distance. De nombreuses études sur l'ICU de surface sont basées sur des données de télédétection thermique provenant de différents satellites (Dousset & Gourmelon, 2003 ; Aniello *et al.*, 1995 ; Mathew *et al.*, 2017).

Les arbres et les plantes en tant qu'éléments importants du système terrestre, aident à réguler le climat urbain et atténuent l'îlot de chaleur urbain en créant un effet de refroidissement en donnant de l'oxygène, absorbant le dioxyde de carbone, minimisant et interceptant les rayons du soleil, générant de l'ombre et absorbant les flux de radiations (Kong *et al.*, 2014, Taha *et al.*, 1988 ; Oliveira *et al.*, 2011). En outre, le type, la densité, la taille et la forme des espaces verts et la zone d'ombre sont tous des paramètres importants pour déterminer l'effet de refroidissement (Giridharan *et al.*, 2008). Les surfaces vertes peuvent effectivement contribuer à la réduction des températures plus élevées causées par les effets de l'îlot de chaleur urbain en maintenant sa température plus froide. Ils prolongent également cet effet de refroidissement au-delà des limites de ces surfaces (Tan & Li, 2013).

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer l'impact de la couverture végétale de la ville de Constantine sur son climat urbain pour atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU), en analysant son effet sur la température de surface du sol (LST) dus au changement de cette couverture végétale au fil du temps à l'aide de la technique de télédétection.

I-Méthodologie du travail

La méthode de travail se divise en deux grands volets comme suite (Figure 1):

-le premier volet consiste à l'investigation de la relation entre l'indice de végétation NDVI et la température de surface du sol LST, ainsi que l'estimation des îlots de refroidissement de la couverture végétale: l'ensemble de données utilisées dans cette étude est une série chronologique d'images Landsat saisies par les capteurs Landsat 5 TM, et Landsat 8 OLI/TIRS. Les informations sur les données sont présentées dans le Tableau 1. Les images ont été téléchargées en tant qu'ensemble de données géo-référencées à partir du site web de l'United States Geological Survey (USGS) avec une résolution de 30m par pixel. Ces images ont été acquises par des intervalles de 5 ans et au cours de la même saison (la saison sèche) et exactement au mois de juin.

Le logiciel de traitement d'images utilisé est ArcGIS (version 10.5), dans le but est de générer des cartes de NDVI (l'Indice différentiel normalisée de végétation) et LST (température de surface du sol), afin d'estimer l'îlot de refroidissement de l'espace vert.

-Le deuxième volet consiste à faire une investigation sur l'impact de changement de la composition et la configuration spatiale de l'espace vert sur la température de surface du sol et le microclimat, dans cette partie, des images de Google Earth pro nous ont servi pour faire la classification supervisée et générer les cartes de l'usage du sol afin d'étudier les changements spatio-temporels de la couverture végétale de la ville de Constantine au fil du temps, les cartes

de l'usage du sol seront transformées en fichier ASCII et analysées par le logiciel FRAGSTATS 4.2.1 pour calculer les indices du paysage (les métriques paysagères) notamment ceux du paysage vert. Les résultats vont montrer la relation entre les métriques paysagères et la température de surface du sol, les cartes de corrélation seront générées par le logiciel SAGA et SPSS 26.

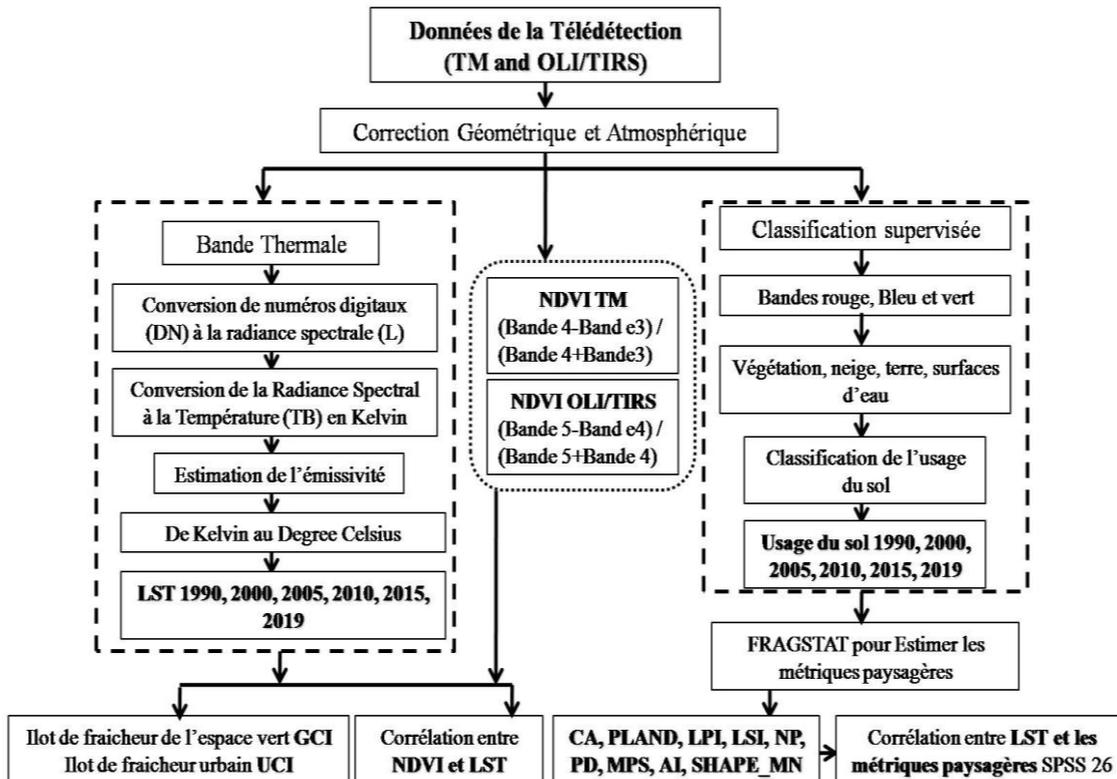


Figure 1 : méthodologie du travail (Auteur, 2019)

-FRAGSTATS est un logiciel conçu pour calculer une grande variété de métriques de paysage pour les modèles de cartes catégoriques. Le logiciel original (version 2) est sorti dans le domaine public en 1995 (McGarigal et Marks 1995). Dès lors, des centaines de professionnels ont apprécié l'utilisation de FRAGSTATS. En raison de sa popularité, le programme a été complètement repensé en 2002 (version 3). Récemment, le programme a été mis à niveau pour accueillir ArcGIS10. La version actuelle (v4.2) a essentiellement les mêmes fonctionnalités que la version 3, mais avec une nouvelle interface utilisateur qui reflète la refonte de l'architecture du pattern, la prise en charge de formats d'image supplémentaires et une variété de méthodes d'échantillonnage pour analyser les sous structure du paysage.

I-1-Acquisition de données

Le tableau 1 présente les données utilisées dans l'étude:

Tableau 1: données des images utilisées dans l'étude (Auteur, 2019)

satellite	date	Heure	L'azimuth	Sun_elevation	Cloud_cover	WRS_PATH
Landsat 5TM	1990-06-24	09:27:30	106.1049385	60.0376830	0.00	193
	2000-06-03	09:43:25	113.5118685	63.2847977	0.00	193
	2005-06-08	10:01:00	116.0255042	65.5377627	1.00	194
	2010-06-22	10:04:06	115.0124398	65.9116536	0.00	194
Landsat 8 OLI	2015-06-29	10:06:42	118.0622757	67.1399442	0.00	193
	2019-06-24	10:07:12	118.2548474	67.5160376	0.01	193

Le tableau 2 résume les données des images utilisées dans l'étude pour avoir les changements de la couverture végétale d'une saison à une autre (Landsat 8 OLI/TIRS):

Tableau 2 : données des images utilisées pour comparer les changements entre les saisons (Auteur, 2019)

	25November 2017	02 April 2018	05 June 2018	25 September 2018
Time	10h07	10h06	10h06	10h07
SUN_AZIMUTH	160.77925077	141.80492721	121.08358550	150.37884782
SUN_ELEVATION	30.74310991	52.95669106	67.47736749	49.07153217
CLOUD_COVER	5.31	0.10	2.56	9.95
WRS_PATH	193	193	193	193

I-2- Traitement et analyse de données : cette étape consiste à extraire les différents indices nécessaires pour notre étude, il s'agit de :

I-2-1-Indice différentiel normalisé de la végétation (Normalized Difference Vegetation Index NDVI): c'est l'indice de végétation le plus utilisé, il est calculé à partir de la lumière visible et proche infrarouge réfléchi par la végétation. La végétation saine absorbe la plus grande partie de la lumière visible qui l'atteint et réfléchit une grande partie de la lumière proche infrarouge. Cependant, la végétation malsaine reflète plus de lumière visible et moins de lumière dans le proche infrarouge (Weier & Herring, 2000). Il est calculé à l'aide de cette formule :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad (1)$$

Pour Landsat5, $\text{NDVI} = (\text{Bande 4} - \text{Bande 3}) / (\text{Bande 4} + \text{Bande 3})$

Pour Landsat 8, $\text{NDVI} = (\text{Bande 5} - \text{Bande 4}) / (\text{Bande 5} + \text{Bande 4})$

Sachant que les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondent aux surfaces non végétales comme la neige, l'eau ou les nuages. Pour les sols nus, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Quant aux formations végétales elles

ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7, les valeurs les plus élevées correspondent aux couverts les plus denses.

L'indice NDVI nous offre la possibilité d'analyser le changement de la couverture végétale durant les années d'étude. Il va être corrélé avec la température de la surface du sol (LST) pour analyser l'impact de la végétation sur la température de surface.

I-2-2-Température de surface du sol (Land Surface Temperature LST)

Il s'agit de la température radiative de la peau au-dessus du sol. Ce n'est pas la même chose que la température de l'air incluse dans le bulletin météo quotidien. Le LST joue un rôle important dans la physique de la surface du sol car il intervient dans les processus d'échange d'énergie et d'eau avec l'atmosphère (Boudjellal & Bourbia, 2018).

Cet indice sera utilisé pour calculer les îlots de rafraîchissement de l'espace vert et de l'eau, il nous offre des informations pour analyser le changement de la température de surface du sol durant la période d'étude.

A-Extraire la température de surface du sol LST sous LandSat 5TM :

La température de surface du sol sous Landsat 5TM est calculée à partir de la bande thermique 6, les étapes pour extraire cette température sont comme suite (Giannini et al, 2015):

-La réflexion atmosphérique (Atmospheric reflectance):

Les images peuvent être converties en radiances du sommet de l'atmosphère (TOA) en utilisant l'expression suivante :

$$L\lambda = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{cal\ max} - Q_{cal\ min}} \right) \cdot (Q_{cal} - Q_{cal\ min}) + L_{min} \quad (2)$$

Avec :

$L\lambda$ = TOA Réflexion spectrale planétaire

$Q_{cal\ max}$: est la valeur maximale du pixel calibré quantifié en DN ;

$Q_{cal\ min}$: est la valeur minimale du pixel calibré quantifié en DN ;

Q_{cal} : la valeur du pixel calibré quantifié en DN de la zone d'étude ;

L_{min} : est la radiance spectrale correspondant à $Q_{cal\ MIN}$ (DN = 0) ;

L_{max} : est la radiance spectrale correspondant à $Q_{cal\ MAX}$ (DN =255).

Les données de la bande TIRS peuvent être converties du rayonnement spectral à la température de luminosité au sommet de l'atmosphère à l'aide des constantes thermiques du fichier de métadonnées :

$$TB = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

Avec:

T_B = TOA Température de Luminosité, en Kelvin;

$L\lambda$ = rayonnement spectrale (Watts/(m² * sr * μm))

K_1 = Constante de conversion thermique pour la bande ($K_1_CONSTANT_BAND_n$ fichier de métadonnées)

K_2 = Constante de conversion thermique pour la bande ($K_2_CONSTANT_BAND_n$ fichier de métadonnées)

- Estimation de la couverture végétale fractionnaire (Fractional Vegetation Cover FVC)

pour une image en utilisant NDVI:

$$P_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (4)$$

- Estimation de l'émissivité de la surface terrestre (Land Surface Emissivity):

$$\varepsilon = 0.004 \times P_V + 0.986 \quad (5)$$

- Estimation de la température de surface du sol (Land Surface Temperature LST):

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\frac{L\lambda' + T_B}{P} \right) \times \ln(\varepsilon)} \quad (6)$$

B-Extraire la température de surface du sol LST sous LandSat 8 OLI/TIRS :

La température de surface du sol sous Landsat 8 OLI/TIRS est calculée à partir de la bande thermique 10 et la bande thermique 11, les étapes pour extraire cette température sont comme suite (Boudjellal & Bourbia, 2018, Rasul et al, 2015) :

-La réflexion atmosphérique (Atmospheric reflectance):

Les données des bandes OLI et TIRS peuvent être converties en facteurs de radiation spectrale TOA fournis dans le fichier de métadonnées, on peut calculer cette réflexion à travers la formule suivante:

$$L\lambda' = M_p \times Q_{cal} + A_p \quad (7)$$

Avec:

$L\lambda'$ = TOA Réflexion spectrale planétaire, sans correction pour l'angle solaire;

M_p = Facteur d'échelle multiplicatif de réflectance pour la bande;

Q_{cal} = Valeur de pixel L1 dans DN ;

A_p = Facteur d'échelle additif de réflectance pour la bande.

-La température de luminosité atmosphérique (Atmosphere Brightness Temperature):

Les données de la bande TIRS peuvent être converties du rayonnement spectral à la température de luminosité au sommet de l'atmosphère à l'aide des constantes thermiques du fichier de métadonnées :

$$TB = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (8)$$

Avec:

T_B = TOA Température de Luminosité, en Kelvin;

$L\lambda$ = rayonnement spectrale (Watts/(m² * sr * μm))

$K1$ = Constante de conversion thermique pour la bande ($K1_CONSTANT_BAND_n$ fichier de métadonnées)

$K2$ = Constante de conversion thermique pour la bande ($K2_CONSTANT_BAND_n$ fichier de métadonnées)

- Estimation de la couverture végétale fractionnaire (Fractional Vegetation Cover FVC)

pour une image en utilisant NDVI:

$$Pv = \left[\frac{NDVI - NDVI \min}{NDVI \max - NDVI \min} \right]^2 \quad (9)$$

- Estimation de l'émissivité de la surface terrestre (Land Surface Emissivity):

$$\varepsilon = 0.004 \times Pv + 0.986 \quad (10)$$

- Estimation de la température de surface du sol (Land Surface Temperature LST):

$$LST = \frac{TB}{1 + \left(\frac{L\lambda' + TB}{P}\right) \times \ln(\varepsilon)} \quad (11)$$

I-2-3-Estimation de l'effet de l'ilot de refroidissement de l'espace vert (green cool island GCI) :

L'effet de refroidissement des espaces verts a été largement étudié. Jusuf et al (2007) ont étudié la distribution de la température de l'air à Singapour, en utilisant des données de télédétection et des données d'enquête mobile. Il a été constaté que la température était en corrélation significative avec l'utilisation des terres et diminuait à mesure que la densité de la verdure augmentait. La végétation pourrait compenser le réchauffement atmosphérique d'environ 0,6 ° C sur les terres au cours d'une période de 30 ans (Bounoua et al, 2010).

- L'effet de GCI est évalué par la différence de température LST entre les espaces verts et leur environnement. Il est calculé avec cette formule (Boudjellal & Bourbia, 2018) :

$$GCI = \Delta LST = LST_U - LST_O \quad (12)$$

Dont LST_O représente la valeur LST moyenne à l'intérieur de la classe de végétation et LST_U représente la moyenne de LST dans la zone urbaine.

I-2-4-Estimation de l'îlot de refroidissement urbain de l'espace vert (UCI)

L'UCI fait généralement référence au phénomène selon lequel les espaces végétalisés ont une température inférieure à celle des zones bâties environnantes. En général, il existe deux types d'UCI fondés sur la source de données appliquée comme suit : UCI air/atmosphère et UCI de surface. Les études relatives à l'UCI de l'air utilisent la température atmosphérique obtenue à partir de stations météorologiques fixes ou d'équipements mobiles, les observations basées sur la température atmosphérique ont montré que la taille et la forme des patches de végétation, ainsi que les espèces d'arbres, sont des facteurs importants pour influencer les effets de refroidissement (Georgi & Dimitriou, 2010 ; Fintikakis, 2011). Ces observations sur le terrain ont permis de constater que les espaces verts urbains sont de 1 °C à 7 °C plus froids que les environs. En moyenne, les grands parcs sont plus frais que les plus petits mais pas toujours, tandis que les îlots de refroidissement urbains (UCI) des parcs sont davantage liées aux caractéristiques des parcs (Chang, 2007).

Cet indice est calculé à travers la formule suivante :

$$UCI = \Delta T = T_i - \bar{T} \quad (\Delta T \leq 0) \quad (13)$$

Dont (\bar{T}) est LST moyenne du cas d'étude et T_i est la température dans chaque pixel.

I-2-5-Les indices du paysage utilisés (les métriques paysagères):

Le logiciel FRAGSTAT nous a permis de calculer les indices de la structure spatiale de la végétation, en utilisant les trois niveaux d'application (Patch, classe et paysage). Dont le but est de faire ressortir la relation entre la structure spatiale et la température de surface du sol LST. Pour cela une série d'indices a été sélectionnée pour faire l'analyse comme suit :

-La surface occupée (CA) : Elle mesure la surface (hectare) occupée pour chaque classe d'occupation du sol.

-L'indice de la forme (SI) : c'est la mesure la plus simple de la complexité globale de la forme

-L'indice d'agrégation (AI) : AI mesure l'arrangement spatial des taches (%) correspondantes aux types d'occupation du sol. Une valeur AI élevée indique des unités adjacentes et donc des taches agrégées.

-La densité du patch (PD) : Le nombre de patches pour 100 ha

-Le nombre des patches (NP) : Il mesure le nombre de taches d'une occupation du sol. Cet indice renseigne sur la fragmentation d'une classe entre deux périodes. L'augmentation du nombre de taches d'une classe peut être due à la fragmentation de cette classe.

-L'indice de forme du paysage (LSI) : il mesure la longueur totale du bord impliquant la classe correspondante divisée par la longueur minimale du bord de classe pour une classe agrégée au maximum.

-Pourcentage total du paysage (LPI) : LPI mesure la surface (%) de la tâche la plus grande pour chaque classe d'occupation du sol. Les grandes valeurs de LPI indiquent une forte dominance d'une tâche unique.

-L'indice moyen de la forme des patches (SHAPE_MN) : elle mesure la valeur moyenne de l'indice de forme

-Proportion du paysage (PLAND) : Le PLAND mesure la proportion du paysage (%) occupée par des types d'occupation du sol. Il donne une idée de dominance des classes d'occupation

-Taille moyenne des patches (MPS) : est la surface moyenne de tous les patches d'un type donné, donc il mesure la surface moyenne des taches (hectares) de chaque classe. Cette valeur diminue lorsque le paysage se présente de plus en plus fragmenté.

-Nombre de classes (PR) : il mesure le nombre de classe d'occupation du sol présent dans le paysage. Si PR s'augmente alors le paysage s'accroît en hétérogénéité.

Le tableau 11 résume les métriques paysagères utilisées dans l'étude, les niveaux d'application et les unités de chaque métrique.

II-Résultats de l'analyse

II-1-Traitement des images

Cette étape a permis de faire l'importation des images, les corrections géométriques et radiométriques et l'extraction du secteur d'étude. Cela a été fait par le logiciel ArcGis 10.5.

II-2-La composition colorée

C'est une combinaison de trois bandes spectrales d'une image multi-spectrale en procédant à leur affectation respective aux trois couleurs primaire (rouge, vert et bleu) pour une meilleure distinction de nuance. Elle permet l'interprétation de l'image à travers la signature spectrale de l'objet. Ainsi, la composition colorée fausse couleur standard de ETM+ est 4 3 2 tandis que celle de OLI-TIRS est 5 4 3 est utilisé dans le cadre de cette étude. Cette composition combine respectivement les bandes du proche infrarouge, du rouge et du vert du capteur au plan d'affichage rouge, vert et bleu de l'écran. Elle a permis d'obtenir 8 classes d'occupation du sol qui ont été validé par un contrôle terrain (Guechi, 2018).

Il existe deux types de composition colorée :

-La composition colorée de vrai couleur : pour avoir une composition de vrai couleur il suffit d'affecter la band rouge au canal rouge, la bande bleu au canal bleu et la band rouge au canal rouge;

-La composition colorée de fausse couleur : pour avoir une composition colorée fausse couleur il suffit d'affecter n'importe quelle bande aux trois canaux (exemple : la bande infrarouge au canal rouge, la band vert au canal vert et la band rouge au canal rougr) (Voir Annexe 1).

Le Tableau 3 montre l'usage de quelques compositions colorées de fausses couleurs et le Tableau 4 montre les bandes constituantes de l'image satellitaire de Landsat TM, ETM+ et OLI/TIRS

Tableau 3: usage de quelques compositions colorées de fausses couleurs (Auteur, 2019)

composition de bandes de Landsat 8 affectée aux canaux RVB	usage de la composition
4, 3, 2	couleurs vrai (naturelles)
7, 6, 4	fausses couleurs (vocation urbaine)
5, 4, 3	couleurs infrarouge végétation
6, 5, 2	Agriculture
7, 6, 5	Pénétration atmosphérique
5, 6, 2	végétation saine
5, 6, 4	sol/eau
7, 5, 4	infrarouge à ondes courtes
6, 5, 4	analyse de la végétation

Tableau 4: les bandes composantes des images Landsat 5 TM et Landsat 8 OLI/TIRS (traité par l'auteur, 2019)

	Landsat 5 thematic Mappers (TM)				Landsat 8 Operational Land Imagers (OLI) & Thermal infrared sensors (TIRS)		
	resolution (m)	Wavelength (micrometer)	Band Name		Band Name	Wavelength (micrometer)	resolution (m)
band1	30	0.450-0.520	Blue	band1	Ultra-Blue	0.435-0.451	30
band2	30	0.520-0.600	Green	band2	Blue	0.452-0.512	30
band3	30	0.630-0.690	Red	band3	Green	0.533-0.590	30
band4	30	0.760-0.900	NIR	band4	Red	0.636-0.673	30
band5	30	1.550-1.750	SWIR1	band5	NIR	0.851-0.879	30
band6	120	10.40-12.50	Thermal	band6	SWIR1	1.566-1.651	30
band7	30	2.080-2.350	SWIR2	band7	SWIR2	2.107-2.294	30
				band8	Panchromatic	0.503-0.676	15
				band9	Cirrus	1.363-1.384	30
				band10	TIRS1	10.60-11.19	100*(30)
				band11	TIRS2	11.50-12.51	100*(30)

Afin d'avoir une composition colorée de vrais couleurs (Figures 2, 3 et 4) qui nous aide à analyser la végétation, les bandes utilisées sont :

-Pour les images Landsat 5 TM, la bande 3, 2 et 1, et

-Pour les images Landsat 8 OLI/TIRS les bandes 4, 3 et 2.

Pour la composition colorée pour l'analyse de la végétation (voir annexe)

Les résultats sont comme suite :

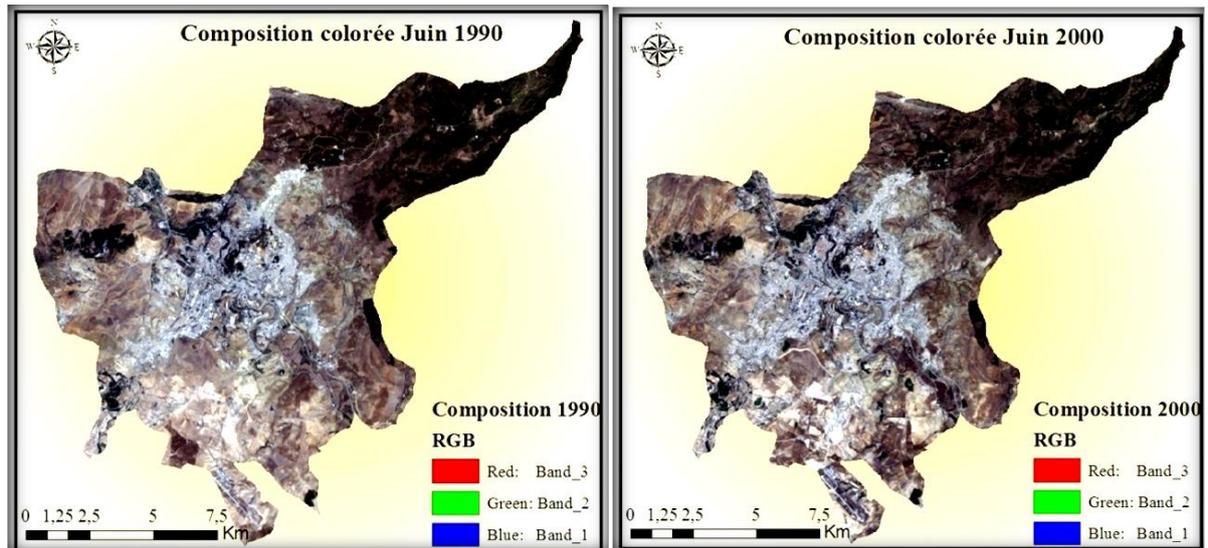


Figure 2: Composition colorée de la scène de juin 1990, et juin 2000 respectivement (Auteur, 2019)

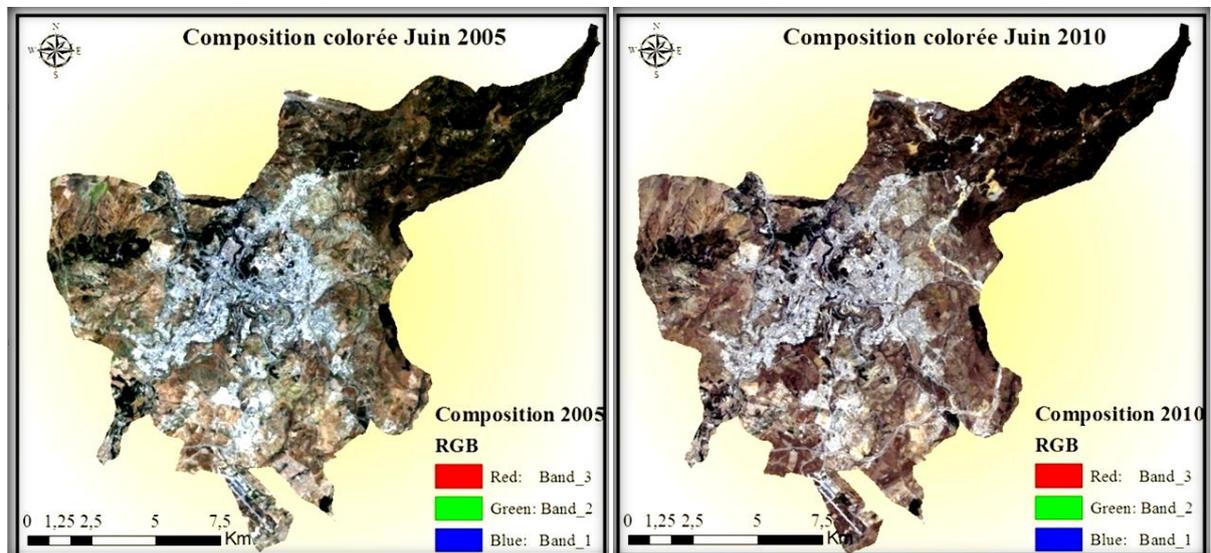


Figure 3: Composition colorée de la scène de juin 2005 et juin 2010 respectivement (Auteur, 2019)

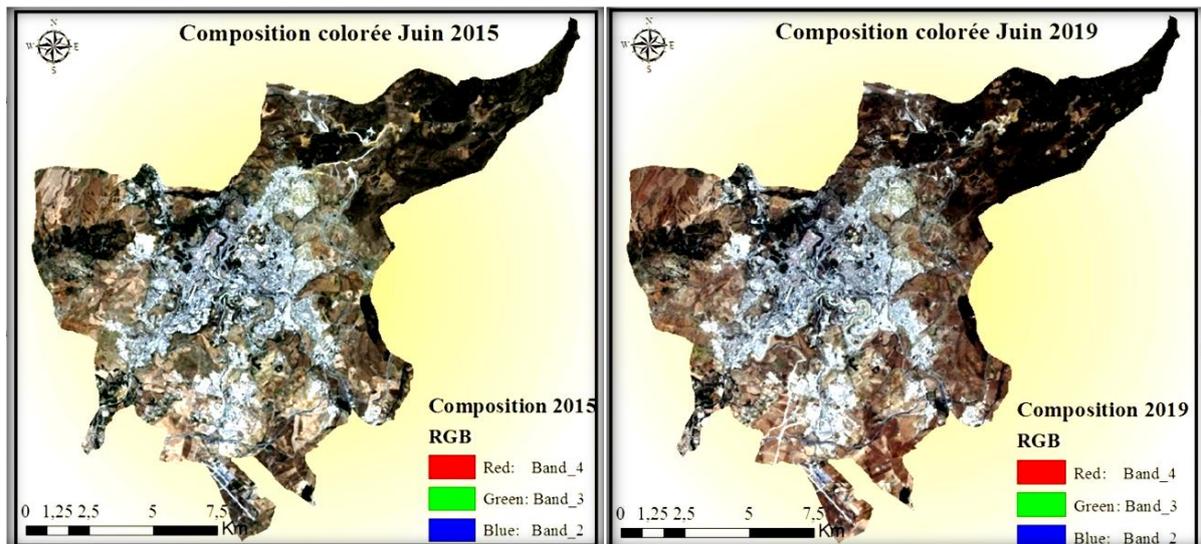


Figure 4: Composition colorée de la scène de juin 2015 et juin 2019 respectivement (Auteur, 2019)

La lecture des cartes (Figures 2, 3, 4) montre un changement remarquable au niveau de la tache urbaine de la ville de Constantine et ainsi que l'espace vert, ces changements seront étudiés dans la partie suivante après la création des cartes de l'usage du sol.

II-3-Carte de l'usage du sol (Classification supervisée)

Cette opération consiste à choisir dans un premier temps, des parcelles d'entraînement (ROI) qui sont des regroupements de pixels purs caractéristiques d'une occupation du sol donnée en se basant sur la connaissance du terrain et sur la signature spectrale. Ensuite, l'algorithme Maximum de Vraisemblance a été utilisé pour classifier les images. Il estime la moyenne et la variance à partir des sites d'entraînement de l'image. Cela consiste à choisir les pixels qui correspondent aux valeurs de la moyenne et de la variance. Cet algorithme offre une bonne capacité de généralisation. Les résultats d'étude sont comme suit :

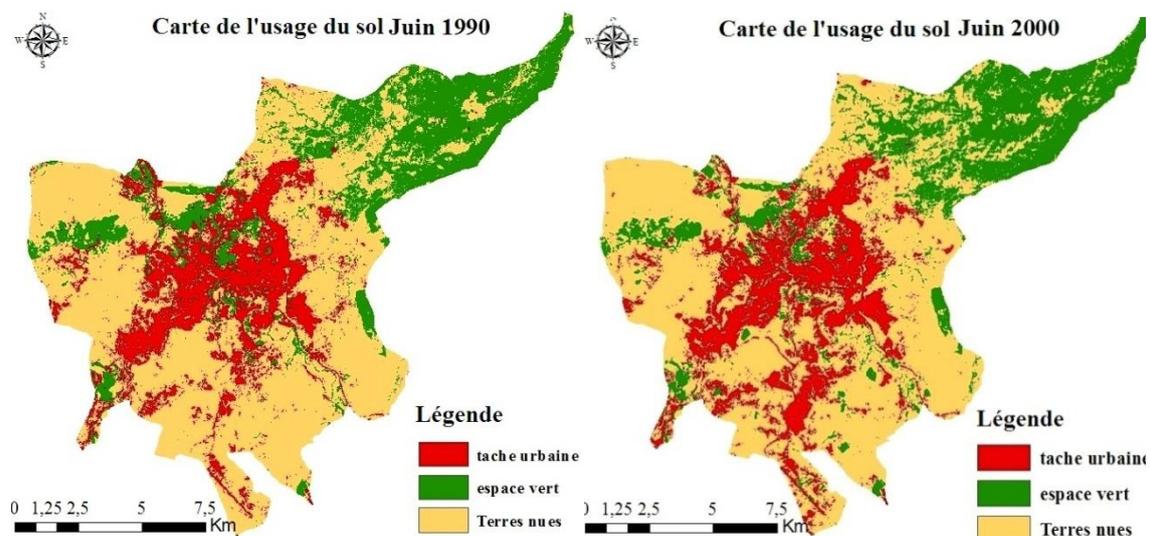


Figure 5: Usage du sol, Juin 1990, 2000 respectivement (Auteur, 2019)

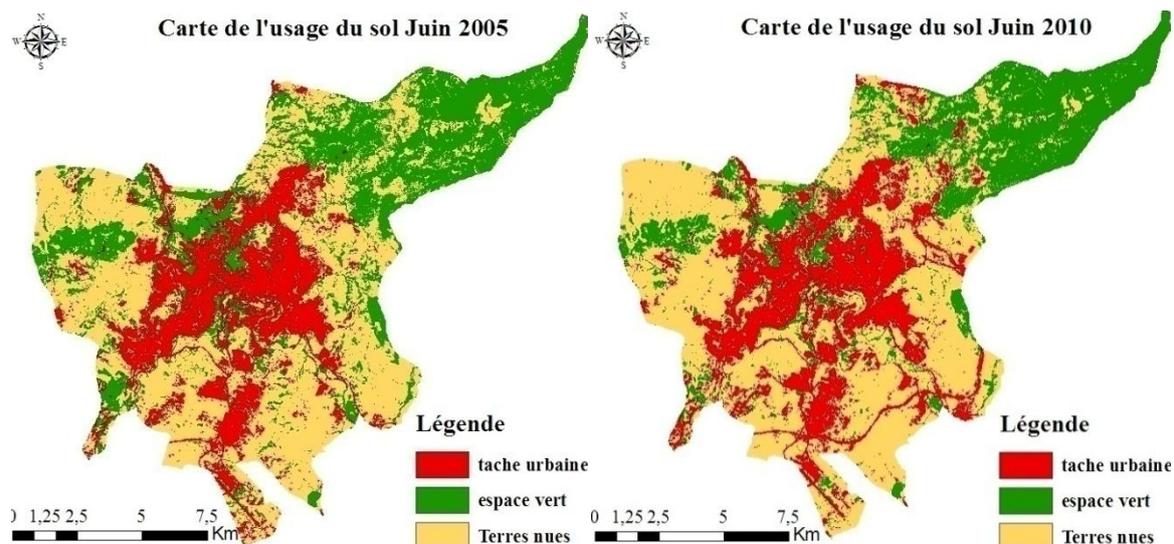


Figure 6: Usage du sol, Juin 2005, 2010 respectivement (Auteur, 2019)

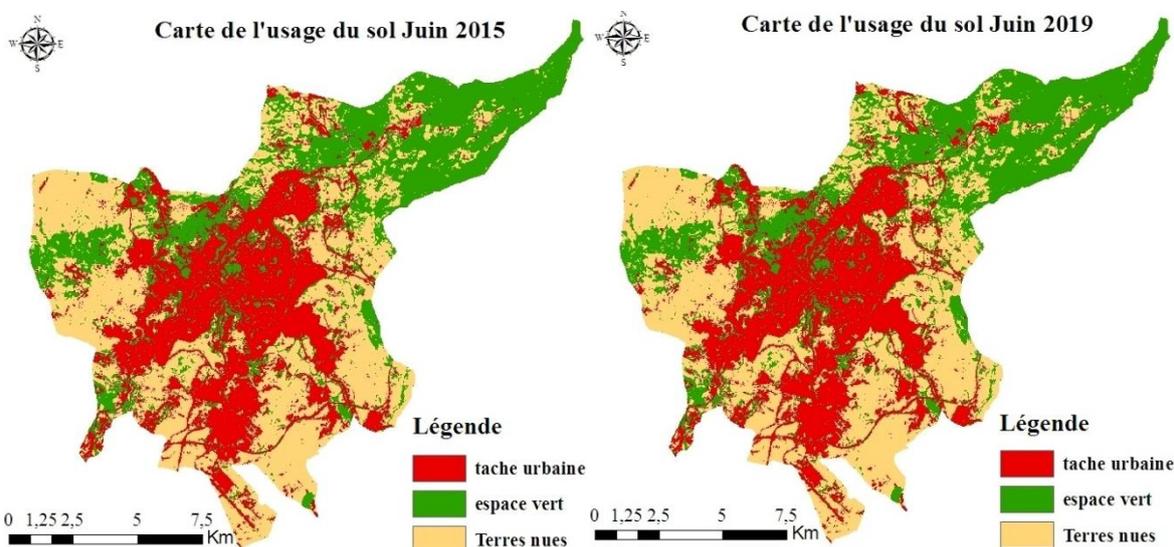


Figure 7: Usage du sol, Juin 2015, 2019 respectivement (Auteur, 2019)

Les cartes de l'usage du sol (Figures 5, 6 et 7) montrent l'évolution de la surface urbanisée durant la période d'étude dans plusieurs directions. Sachant que durant le deuxième Plan Quadriennal 1974–1977 a donné l'importance au secteur de l'habitat et de l'urbanisme et, par conséquent une prise en charge de la crise de logement qui était à son apogée. C'est à travers ce plan qu'une politique urbaine intégrée au développement national a été mise en place. Ceci s'est matérialisé par la création d'importants programmes de construction de logements sous forme de Z.H.U.N à l'Est et au Nord de Constantine, telles que les Cités Ziadia, Daksi, 20 août et 05 juillet.

Alors, par manque de terrains à urbaniser la croissance de Constantine durant la décennie 1980 s'est faite en dehors de son périmètre urbain avec la création d'une part, des Z.H.U.N de Békira au Nord, de Zouaghi au Sud et Boussouf à l'Ouest et, d'autre part des lotissements

d'habitat individuel implantés sur ces mêmes sites. L'extension urbaine de cette ville s'est poursuivie sans programmation le long des axes de communication. Cet état de fait a engendré une urbanisation favorisant la conurbation avec les centres urbains avoisinants constitués de lotissements privés informels ainsi que de certains nombres de poches d'habitat de type précaire, (ONAMA, Sissaoui, Benchergui, etc....).

Cette croissance urbaine engendre la réduction de la surface des terres agricoles, des espaces verts et forêts urbaines, la ville de Constantine comptait 150 hectares des forêts urbaines après l'indépendance, mais actuellement elle ne compte que 50H (la forêt d'El Mansorah avait une superficie de 61 hectares, actuellement elle n'occupe que 7,11 hectares, la forêt de Fort dans le secteur de Sidi Mebrouk avait une superficie de 20 hectares, actuellement elle n'occupe que 13 hectares. D'autres forêts ont complètement disparues à savoir la forêt de Sidi Djellis d'une superficie de 32 hectares, et la forêt de Sidi M'cid d'une superficie de 8 hectares)

Dans la dernière décennie la ville de Constantine a doté un système végétal à tous les niveaux et échelles dans le cadre d'un Projet Urbain Global (PUG), afin de réussir une cohérence urbaine inscrite dans une coulée verte. Des espaces verts périurbains, interurbains et urbains ont été proposés comme un projet urbain global spécifique à l'agglomération de Constantine. Des parcs de loisir périurbains d'attraction, aquatiques ou zoologiques pour relier la ville de Constantine et les autres centres urbains qui l'entourent (Benahassine, 2011).

Et dans le cadre d'un Projet Urbain Local (PUL), dont le but est de rendre la ville verte, un nombre important des espaces vert a été proposé au niveau des équipements collectifs, éducatifs et sanitaires, et des grands ensembles (les espaces vert au niveau de la cité Zoughi, le réaménagement des espaces intermédiaires dans les équipements collectifs).

II-4-Indice différentiel normalisé de la végétation (NDVI)

Afin de bien analyser les valeurs de l'indice NDVI, l'étude sera faite en deux étapes ; la première consiste à comparer les valeurs de chaque saison, et la deuxième consiste à comparer les valeurs de NDVI durant la période d'étude dans la saison sèche (mois de juin)

II-4-1-Comparaison entre les saisons

Les résultats enregistrés sont comme suit :

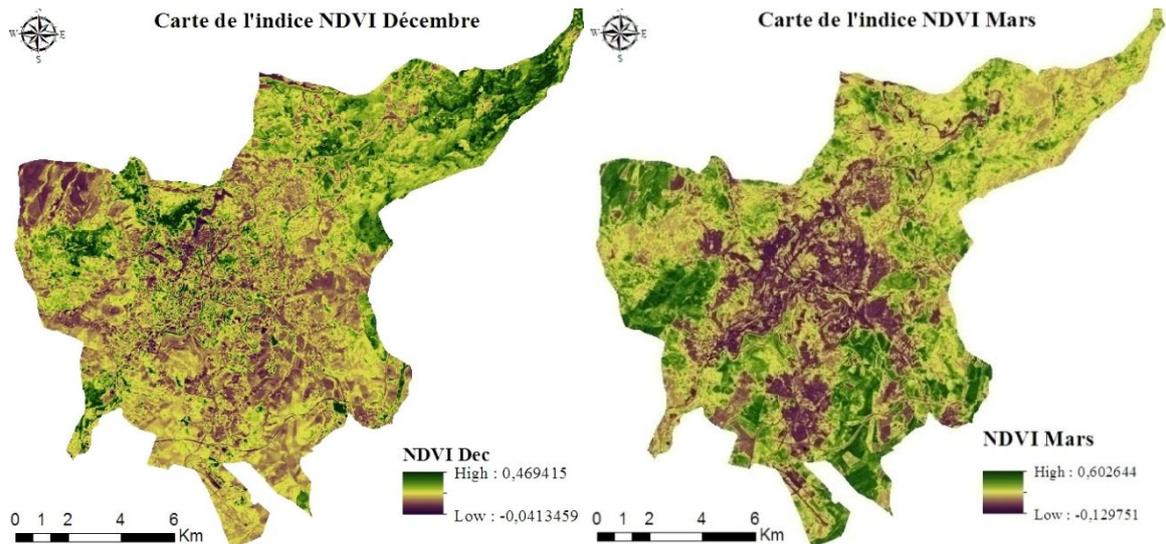


Figure 8: Carte de l'indice NDVI de Décembre 2018 et Mars 2019 respectivement (Auteur, 2019)

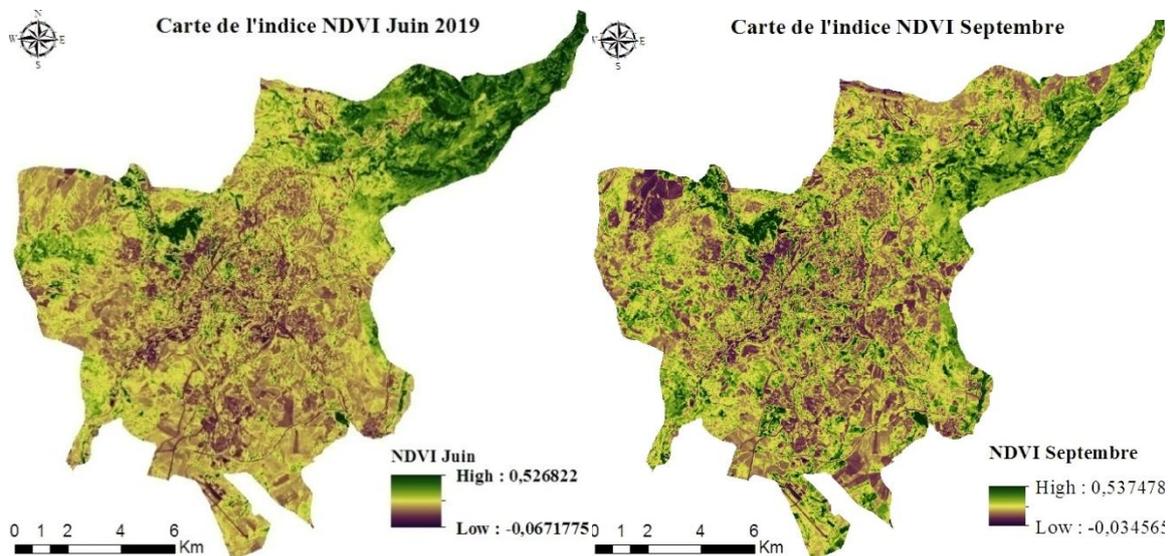


Figure 9: Carte de l'indice NDVI de Juin et Septembre 2019 respectivement (Auteur, 2019)

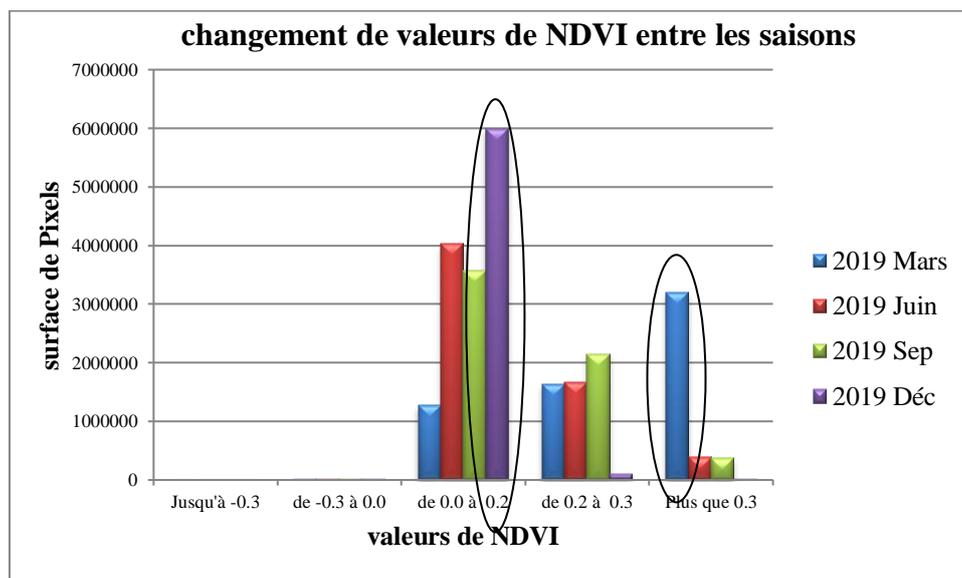
Les cartes de l'indice de NDVI (Figure 8 et 9) montrent une différence remarquable entre les quatre saisons, une couverture végétale riche, dense et saine dans le printemps et une carence de végétation des valeurs très basses en hiver, les valeurs enregistrées de l'indice NDVI varient entre (-0,041 et 0,46) avec une moyenne de 0,10 en Décembre, entre (-0,12 et 0,60) avec une moyenne de 0,30 en Mars. Entre (-0,06 et 0,52) et une moyenne de 0,18 en juin. Entre (-0,03 et 0,53) et une moyenne de 0,18 en Septembre.

Selon la conservation des forêts de la ville de Constantine, les espèces plantées dans la wilaya de Constantine varient entre arbres forestiers, plantes à hautes tiges et plantes d'ornements. La liste des espèces est la suivante :

Acacia(cyanophilla et horrida)-Micocoulier- Sophora- Caroubier- Mélia- Frêne- Faux poivrier Cyprés- Févier d'Amérique- Casuarina- Eucalyptus- Troène arbre- Myoporum-

Ailante- Mûrier- Genevrier- Robinier pseudo Acacia- Pin d'Alep – Pin pignon- Peuplier- Saule pleureur- Lierre- Troène (japon et orientale)- Laurier rose- Romarin- Iris- Generéa- Palmier washingtonia- Canna- Bigaradier- Troène haie- Jasmin jaune- Jasmin blanc- Ambre- Fusin- Agave - Galant de nuit- Passiflore - Vigne vierge- Lavande - Géranium- Spirée- Chrysanthème- Souci- Biota- Pyracanthe- Seringa- Rosier- OEillet d'Inde- Plante grasse- Belle de nuit- Hibiscus- Lantana- Ricin- Spire- Chèvre feuille- Abutilon- Ciste- Verveine- Absinthes- Hibisens R/ chène- Justicia- Girofle- Maryolaine- Yocca- Pyttos sporom- Margueritte- Clou des girofle.

Cette variance en couverture végétale entre les saisons revient à la nature des plantes qui ne résistent pas au froid et au gel en hiver d'une part, et d'une autre part la prédominance des terres agricoles généralement exploitées pour la grande culture de Sec et d'irriguée. Cela est exprimé dans (le graphe1) qui montre l'augmentation des valeurs de NDVI qui dépassent 0.3 en mois de Mars après une saison de pluie, et qui prend à diminuer vers la saison sèche. Les valeurs qui varient entre 0.00 et 0.2 sont très élevées en mois de décembre après une longue saison sèche (Graphe 1).



Graphe 1: changement de valeurs de NDVI d'une saison à une autre (Auteur, 2019)

II-4-2-Comparaison de l'indice de NDVI durant la période d'étude

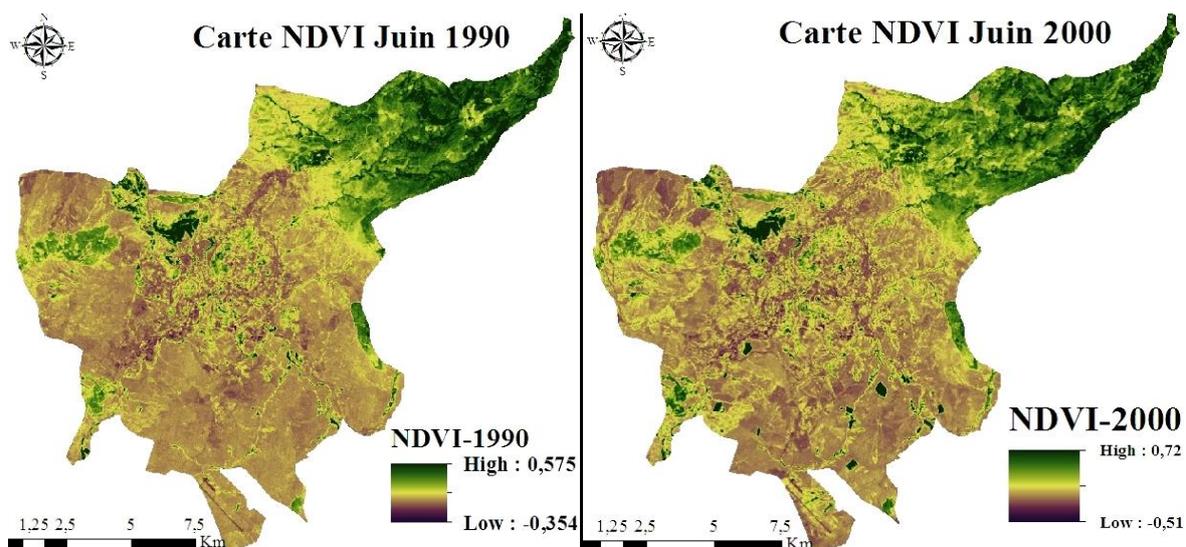


Figure 10: Carte de l'indice NDVI de Juin 1990 et 2000 respectivement (Auteur, 2019)

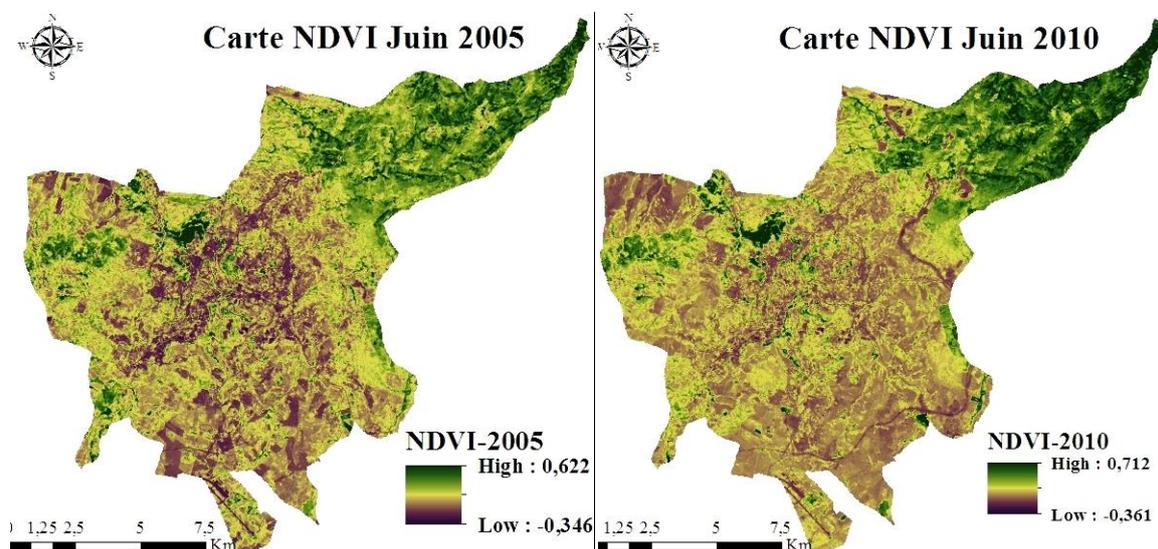


Figure 11: Carte de l'indice NDVI de Juin 2005 et 2010 respectivement (Auteur, 2019)

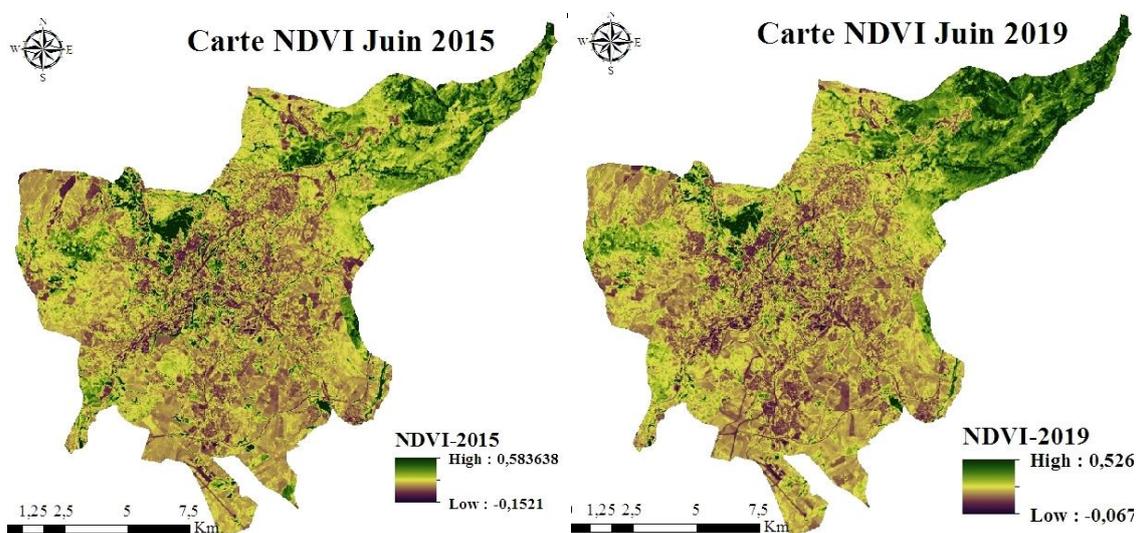
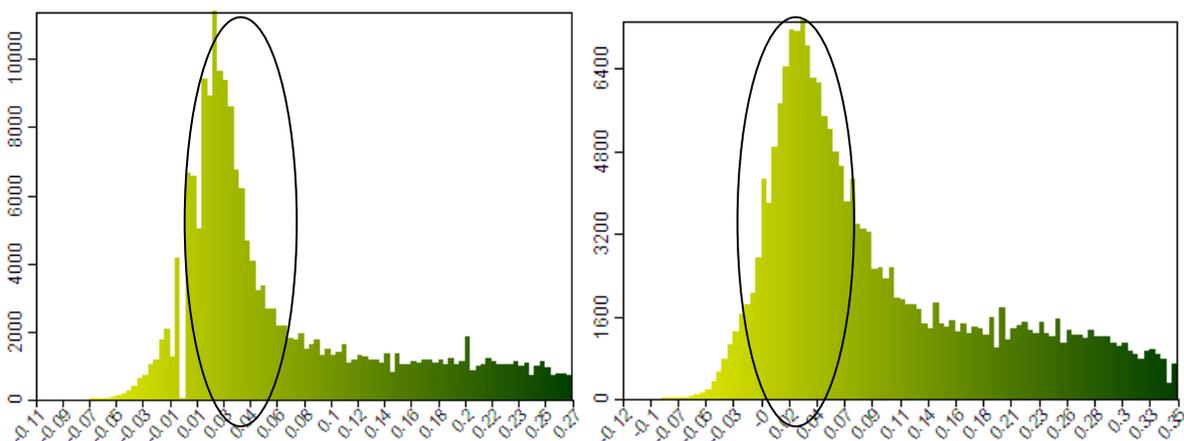


Figure 12: Carte de l'indice NDVI de Juin 2015 et 2019 respectivement (Auteur, 2019)

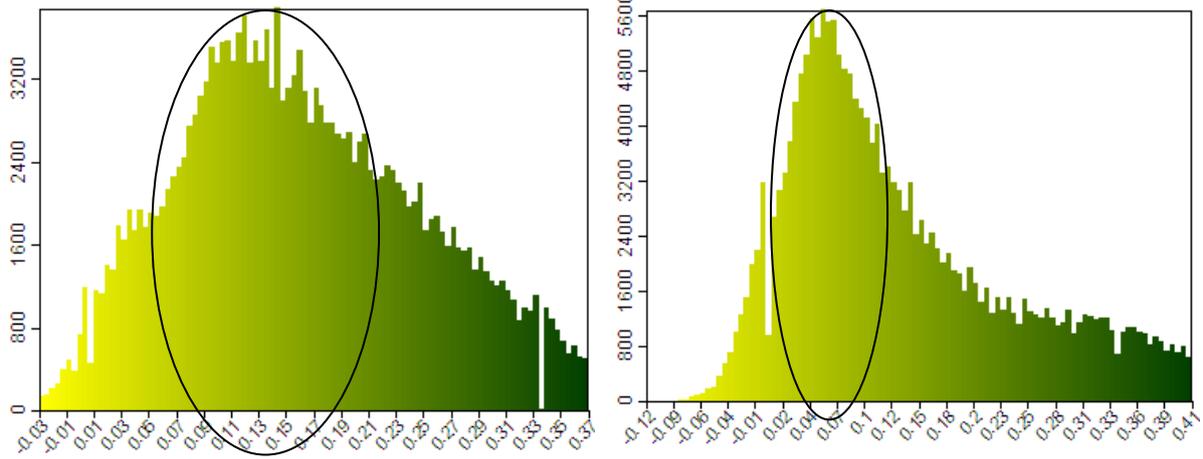
Les cartes de l'indice de NDVI (Figure 10, 11 et 12) montrent que les valeurs enregistrées de l'indice NDVI se varient entre (-0.354 et 0.575) avec une moyenne de 0.082 en Juin 1990, entre (-0.511 et 0.728) avec une moyenne de 0.114 en Juin 2000. Entre (-0.346 et 0.622) et une moyenne de 0.165 en Juin 2005. Entre (-0.361 et 0.712) et une moyenne de 0.148 en Juin 2010. Entre (-0.152 et 0.583) et une moyenne de 0.169 en juin 2015. Entre (-0.067 et 0.526) et une moyenne de 0.187 en juin 2019 (pour voir la carte de NDVI de la wilaya de Constantine voir annexe).

Les valeurs de NDVI dominées durant la période d'étude sont celles qui varient entre 0.00 et 0.2 et qui présentent les terres agricoles et les terres nues (graphes). Les valeurs qui sont supérieure de 0.3 et qui présentent la végétation dense (généralement les forêts) sont plus élevées en Juin 2010 (Graphes 2, 3 et 4).

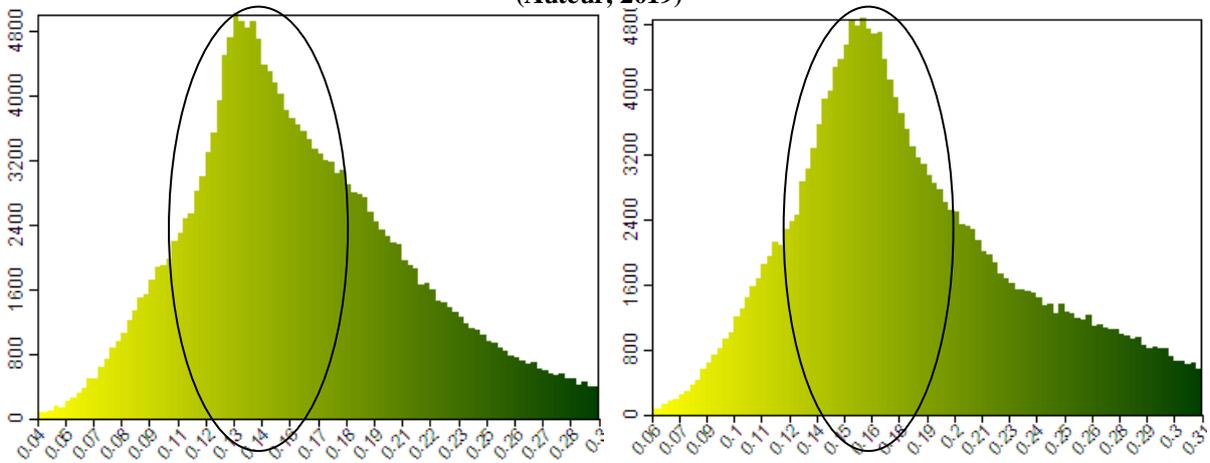
Les cartes (Figure 12, 13 et 14) montrent une différence remarquable durant la période d'étude, la couverture végétale varie d'une année à une autre, cela revient d'un part à la croissance urbaine de la ville de Constantine au détriment des terres agricoles et notamment les forêts urbaines (exemple : la forêt d'El Mensourah), et d'autre part, la rigueur de la saison froide (le gel) et le volume des précipitations qui influencent fortement la couverture végétale. Les cartes montrent aussi une augmentation considérable pendant les dernières années et ça revient à la politique de verdissement de la ville de Constantine par la création de plusieurs espaces vert tels que le parc de Bardo, l'implantation des arbres d'alignement et les espaces verts dans les quartiers résidentiels. (Graphe 5).



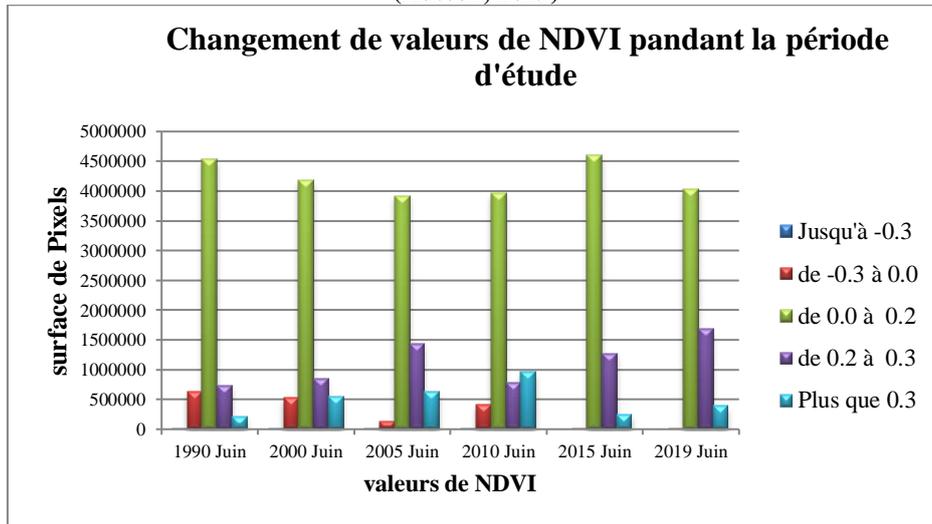
Graphe 2: variation de valeurs de NDVI de Juin 1990 et 2000 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019)



Graph 3: variation de valeurs de NDVI de Juin 2005 et 2010 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019)



Graph 4: variation de valeurs de NDVI de Juin 2010 et 2019 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019)



Graph 5: changement de valeurs de l'indice NDVI durant la période d'étude (Auteur, 2019)

II-5-Extraction de la température de surface du sol (LST)

Après avoir extrait les cartes de l'indice NDVI, et bien cerner les changements de cet indice durant presque 30 ans, l'étape suivante est de calculer la température de surface du sol LST de

chaque année, en suite, les résultats obtenus seront corrélés avec les résultats de NDVI pour étudier la relation entre la couverture végétale et la température de surface du sol. Les résultats de LST sont comme suit :

Les cartes montrent que les valeurs de LST varient entre 44.3°C et 20.1°C. Les valeurs de LST varient entre (44.3°C et 26.9°C) et une moyenne 36°C en Juin 1990, entre (42,9°C et 23,2°C) et une moyenne de 34,4°C en Juin 2000, entre (41,07°C et 23,2°C) et une moyenne de 32,8°C en Juin 2005, entre (40,68°C et 20,15°C) et une moyenne de 31,16°C en Juin 2010, entre (42,98°C et 23,29°C) et une moyenne de 35°C en Juin 2015, entre (40,61°C et 20,2°C) et une moyenne de 32,02°C en Juin 2019 (Figures 13, 14 et 15), (pour voir la carte de LST de la wilaya de Constantine voir annexe 1).

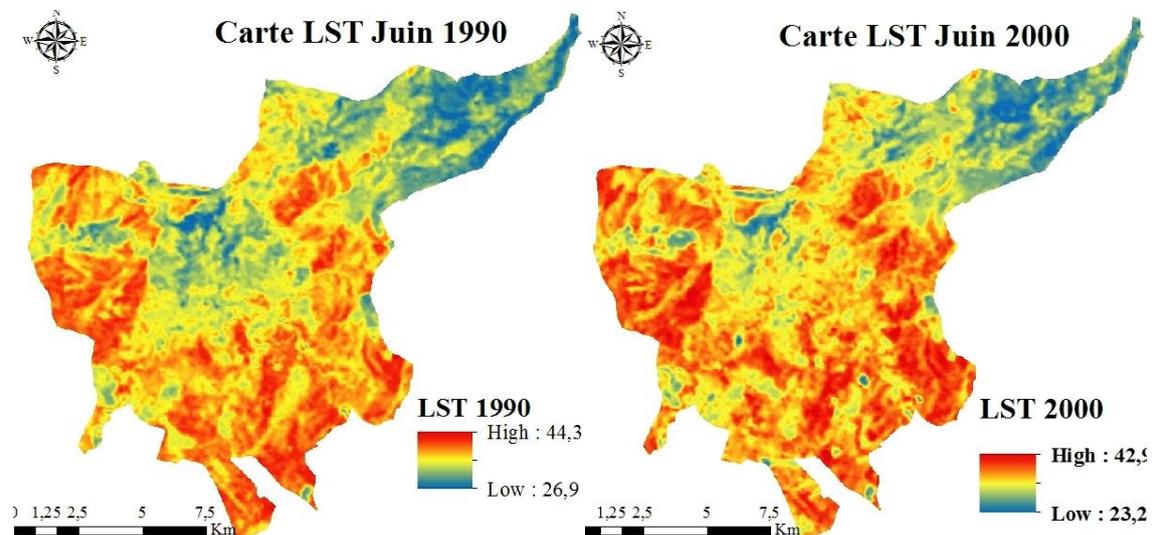


Figure 13 : Carte de LST de Juin 1990 et 2000 respectivement (Auteur, 2019)

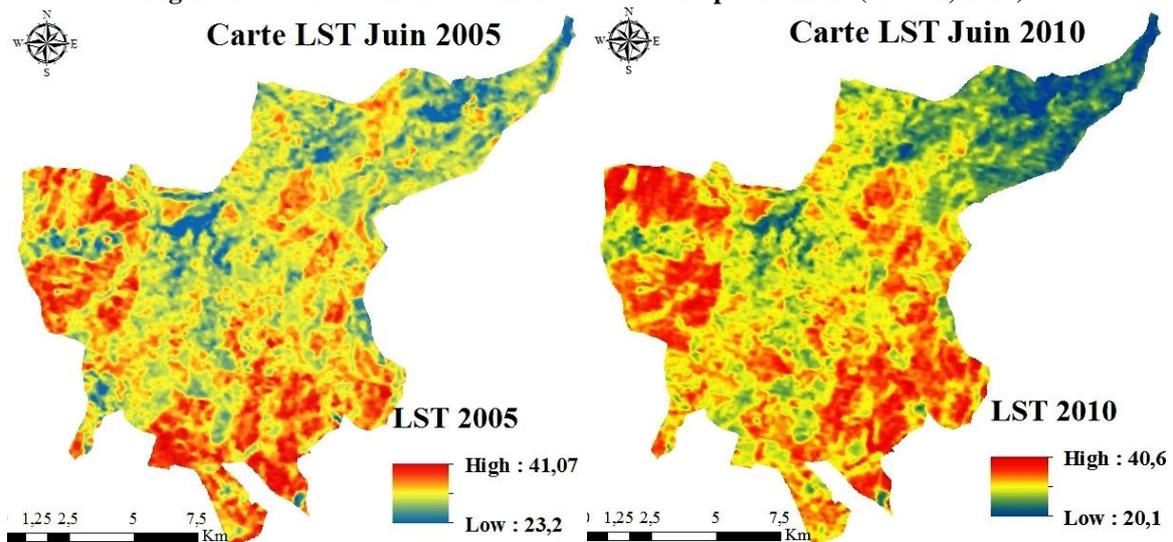


Figure 14: Carte de LST de Juin 2005 et 2010 respectivement (Auteur, 2019)

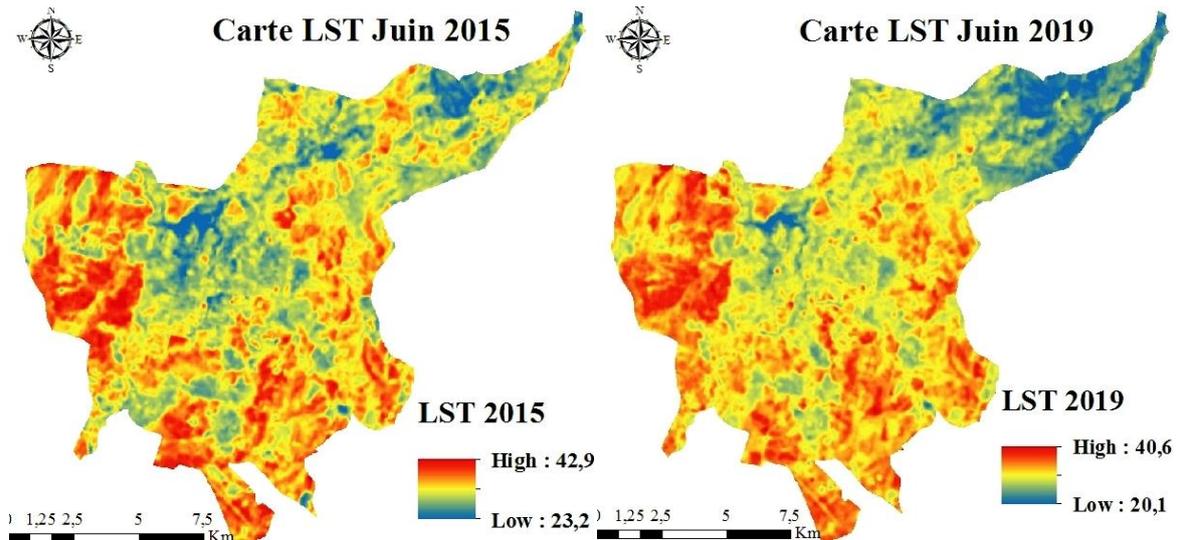
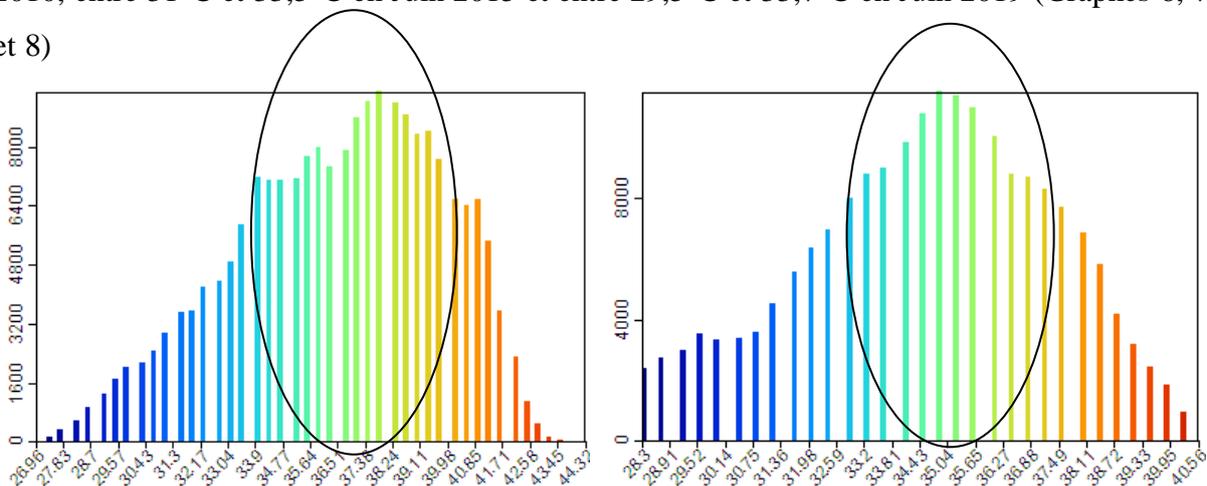


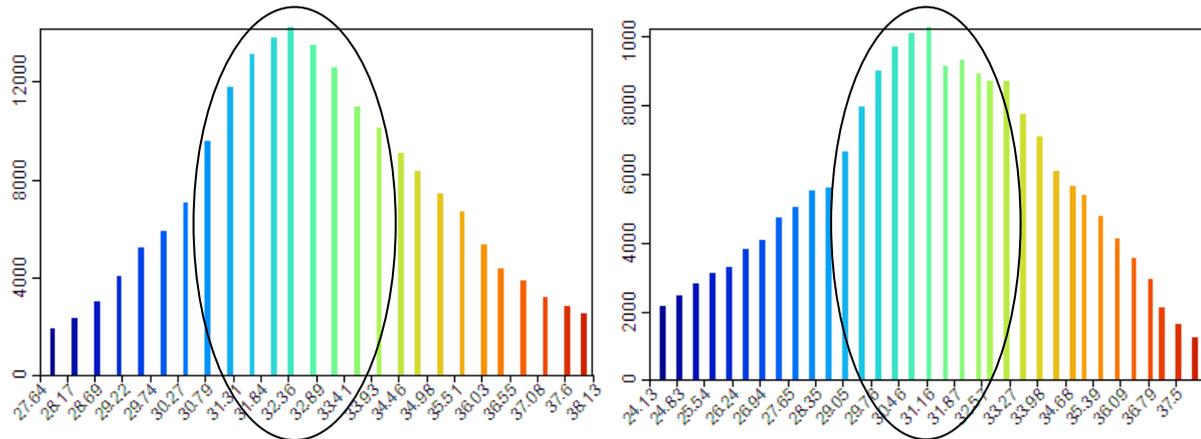
Figure 15: Carte de LST de Juin 2015 et 2019 respectivement (Auteur, 2019) WGS84/UTMzone32N

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les terres nues à cause de la réflexion la plus élevée tandis que les valeurs basses sont enregistrées dans les forêts à végétation dense. La zone urbaine a des valeurs moyennes, mais plus élevées que celles des forêts et de la couverture végétale dense (Graphes 6, 7 et 8)

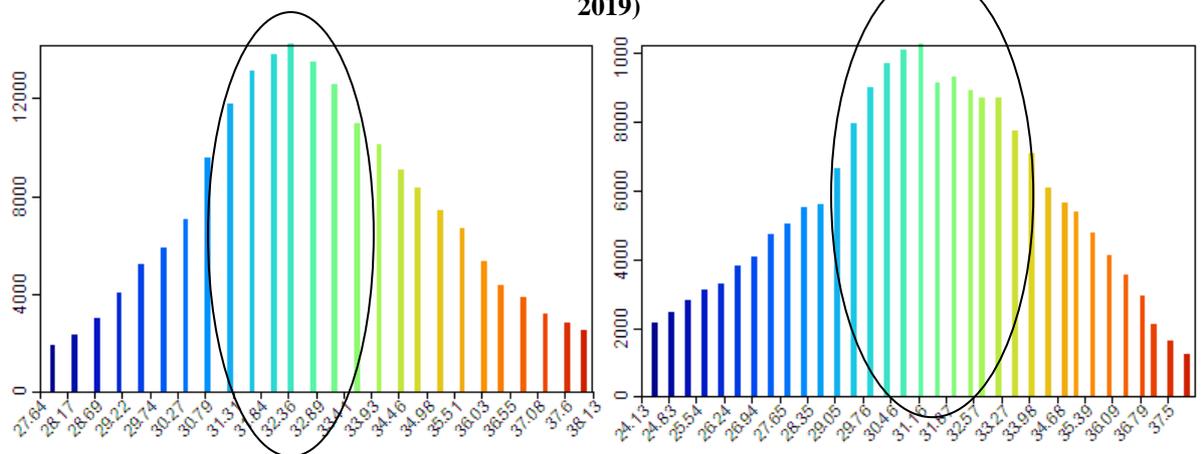
Généralement les valeurs dominantes de LST varient entre 33°C et 39°C en Juin 1990, entre 33°C et 36°C en Juin 2000, entre 31°C et 33°C en Juin 2005, entre 29°C et 33°C en Juin 2010, entre 31°C et 33,5°C en Juin 2015 et entre 29,5°C et 33,7°C en Juin 2019 (Graphes 6, 7 et 8)



Graph 6: variation de valeurs de LST de Juin 1990 et 2000 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019)



Graph 7: variation de valeurs de LST de Juin 2005 et 2010 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019)



Graph 8: variation de valeurs de LST de Juin 2015 et 2019 respectivement via SAGA 7.4.0 (Auteur, 2019)

II-6-Corrélation NDVI/LST

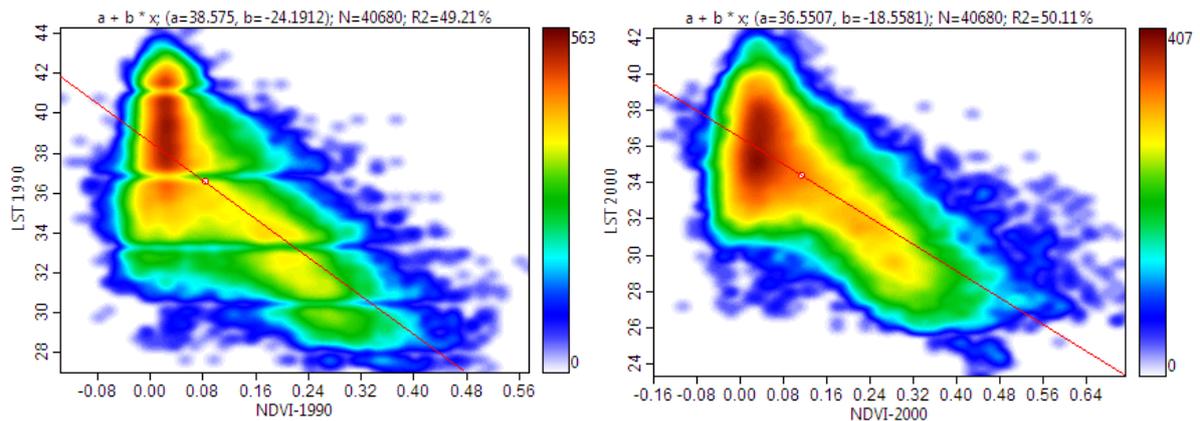
Selon Mackey (2012), le NDVI est un bon indicateur pour calculer l'impact de la couverture verte sur la température de surface du sol. Il a révélé que la végétation pourrait sensiblement réduire la température si le NDVI dépasse 0,35. Des études antérieures menées sur l'impact de l'espace vert sur la température de surface du sol ont montré qu'il existe une relation négative entre l'indice NDVI et le LST.

La relation entre NDVI et LST est traitée par le logiciel de statistique SAGA 7.4.0, les cartes de l'indice NDVI et LST sont enregistrés sous Format .TIF et importé dans le logiciel. Un nombre de point N=100000 est choisi pour être corrélée.

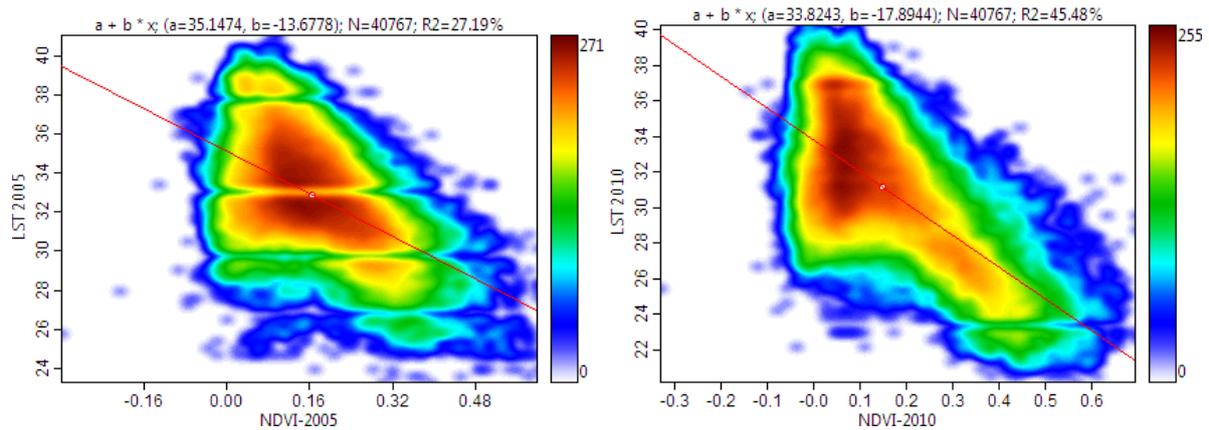
Les résultats enregistrés (graphe) montrent qu'une régression linéaire a été établie entre NDVI et LST. Les graphes montrent une relation négative entre NDVI et LST, autrement dit, lorsque les valeurs de NDVI augmentent, la température de surface du sol diminue et vis versa. Le modèle de régression a été appliqué comme formule de conversion avec un coefficient:

$-R^2 = 0,492$ et $N=40680$ en juin 1990 ; $-R^2 = 0,501$ et $N=40680$ en Juin 2000 ;
 $-R^2 = 0,271$ et $N=40767$ en Juin 2005 ; $-R^2 = 0,454$ et $N=40767$ en Juin 2010 ;
 $-R^2 = 0,146$ et $N=40680$ en Juin 2015 et $R^2 = 0,316$ et $N=40680$ en Juin 2019.

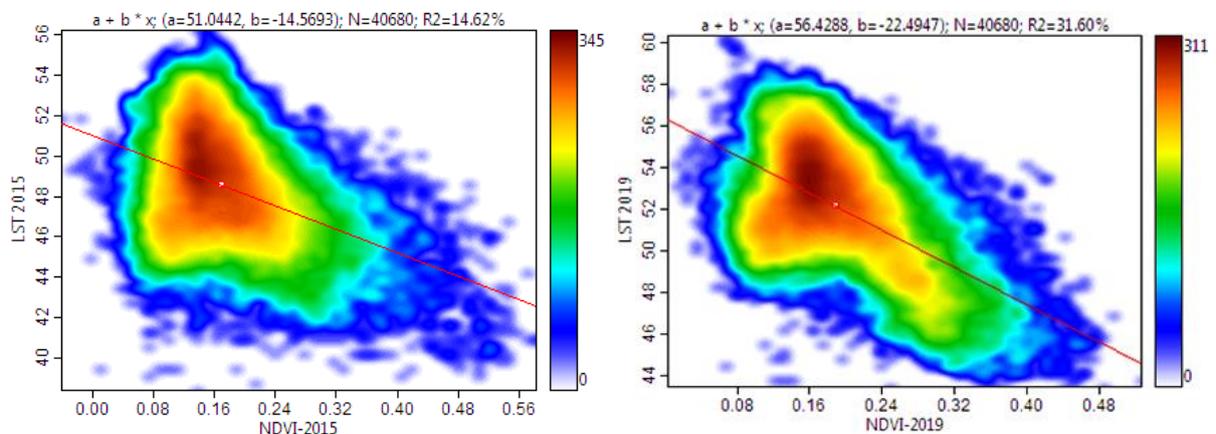
La plus forte corrélation a été enregistrée en juin 2000 dont les valeurs de NDVI sont les plus élevées, tandis que la plus faible corrélation a été enregistrée en Juin 2015 (Graphes 9, 10 et 11).



Graph 9: corrélation NDVI/LST Juin 1990 et 2000 respectivement via SAGA (Auteur, 2019)



Graph 10: corrélation NDVI/LST Juin 2005 et 2010 respectivement via SAGA (Auteur, 2019)



Graph 11: corrélation NDVI/LST Juin 2015 et 2019 respectivement via SAGA (Auteur, 2019)

II-7-Estimation de l'ilot de refroidissement de l'espace vert (GCI) et L'ilot de refroidissement urbain (UCI)

II-7-1-calcul de l'intensité de (GCI)

La méthode consiste à extraire les différentes températures de surface du sol de la zone urbaine, les terres agricoles et les terres non exploitées, chaque classe de végétation, et LST moyenne de notre cas d'étude à partir des cartes de LST de chaque année, les résultats sont présentés dans le tableau 5:

Tableau 5: LST moyenne de chaque classe de végétation

LST	Juin 1990	Juin 2000	Juin 2005	Juin 2010	Juin 2015	Juin 2019
LST moyenne de Cas d'étude	36°C	34.4°C	32.8°C	31.1°C	33°C	32°C
LST moyenne des terres agricole/nues	39°C	38.2°C	36.5°C	36.9°C	37.1°C	36.8°C
LST moyenne de la zone urbaine	33.9°C	33.5°C	32.6°C	31.6°C	32.8°C	31.7°C
LST moyenne de l'espace vert urbain	30.5°C	29.3°C	28.2°C	27.4°C	27.9°C	27.1°C
LST de forêt D >1000h	28.3°C	26.8°C	25.4°C	22.3°C	22.9°C	22.1°C
LST de forêt D >500h	31°C	29.5°C	26.6°C	27.4°C	27°C	27.2°C
LST de forêt D >200h	30°C	28.7°C	27.5°C	26.3°C	27.9°C	26.5°C
LST de forêt D >100h	30.2°C	28.5°C	26.2°C	25.2°C	26.4°C	25.4°C
LST de forêt D >50h	27.5°C	26.2°C	24.1°C	23.6°C	23.6°C	23.2°C
LST de forêt D <50h	29.5°C	28.7°C	26.2°C	24.9°C	26°C	24.3°C

Sachant que :

- Les terres agricoles et nues sont les terres non exploités ;
- L'espace vert urbain présente les taches verte urbaine y compris les jardins, les parcs, les squares, les arbres d'alignement.
- Forêt avec densité D>1000h: forest of Djbel El Ouahch (3280h);
- Forêt avec densité D>500h: représente la forêt de Hadji Baba (641h) ;
- Forêt avec densité D>200h: représente la forêt d'El Meridj (202h) ;
- Forêt avec densité D>100h: représente la forêt de Djebess (120h) ;
- Forêt avec densité D>50h: représente la forêt de Oued-Zied (50h) ;
- Forêt avec densité D<50h: représente la forêt d'El Mansourah (32h).

En utilisant les formules présentées auparavant dans la méthodologie de travail pour calculer les ilots de refroidissement, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 6: valeur de GCI et UCI durant la période d'étude

	Juin 1990		Juin 2000		Juin 2005		Juin 2010		Juin 2015		Juin 2019	
	GCI	UCI										
Terres agricoles	-5,1	3	-4,7	3,8	-3,9	3,7	-5,3	5,8	-4,3	4,1	-5,1	4,8
espace vert urbain	3,4	-5,5	4,2	-5,1	4,4	-4,6	4,2	-3,7	4,9	-5,1	4,6	-4,9
Forêt D >1000h	5,6	-7,7	6,7	-7,6	7,2	-7,4	9,3	-8,8	9,9	-10	9,6	-9,9
Forêt D >500h	2,9	-5	4	-4,9	6	-6,2	4,2	-3,7	5,8	-6	4,5	-4,9
Forêt D >200h	3,9	-6	4,8	-5,7	5,1	-5,3	5,3	-4,8	4,9	-5,1	5,2	-5,5
Forêt D >100h	3,7	-5,8	5	-5,9	6,4	-6,6	6,4	-5,9	6,4	-6,3	6,3	-6,6
Forêt D >50h	6,4	-8,5	7,3	-8,2	8,5	-8,7	8	-7,5	8,9	-9,4	8,5	-8,8
Forêt D <50h	4,4	-6,5	4,8	-5,7	6,4	-6,6	6,7	-6,2	6,8	-7	7,4	-7,7

L'analyse de tableau 6 montre que :

-Les espaces verts urbain possèdent un îlot de refroidissement qui varie entre 3,4°C et 4,9°C durant la période d'étude, ainsi il possède un îlot de refroidissement urbain qui varie entre -3,7°C et -5,5°C durant la période d'étude.

-La forêt de Djbel El Ouahch avec une densité qui dépasse 1000h possède un îlot de refroidissement de l'espace vert qui varie entre 5,6°C et 9,9°C durant la période d'étude, ainsi qu'il possède un îlot de refroidissement urbain qui varie entre -7,4°C et -10°C durant la période d'étude.

-La forêt de Hadji Baba avec une densité qui dépasse 500h possède un îlot de refroidissement de l'espace vert qui varie entre 2,9°C et 6°C durant la période d'étude, ainsi qu'il possède un îlot de refroidissement urbain qui se varie entre -3,7°C et -6,2°C durant la période d'étude.

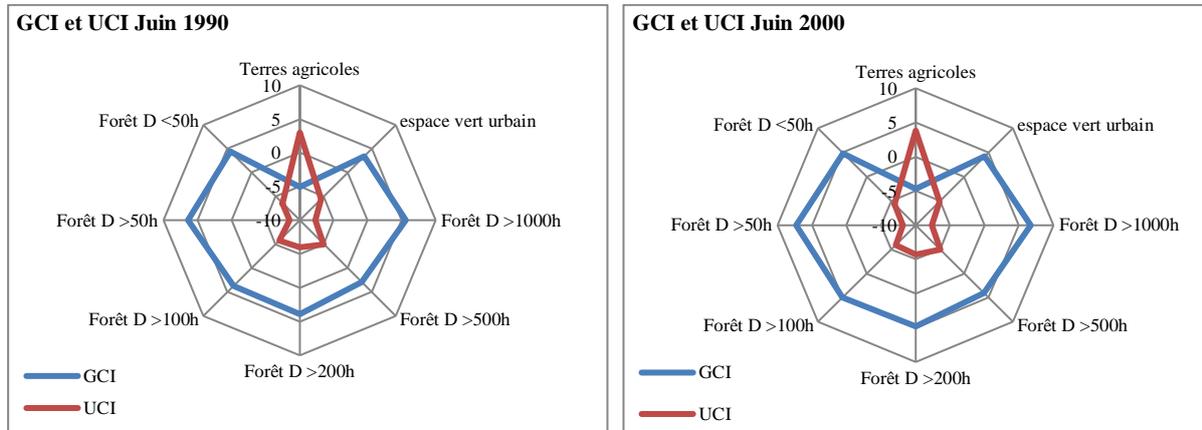
-La forêt de El Meridj avec une densité qui dépasse 200h possède un îlot de refroidissement de l'espace vert qui varie entre 3,9°C et 5,3°C durant la période d'étude, ainsi qu'il possède un îlot de refroidissement urbain qui se varie entre -4,8°C et -6°C durant la période d'étude.

-La forêt de Djebess avec une densité qui dépasse 100h possède un îlot de refroidissement de l'espace vert qui varie entre 3,7°C et 6,4°C durant la période d'étude, ainsi qu'il possède un îlot de refroidissement urbain qui se varie entre -5,8°C et -6,6°C durant la période d'étude.

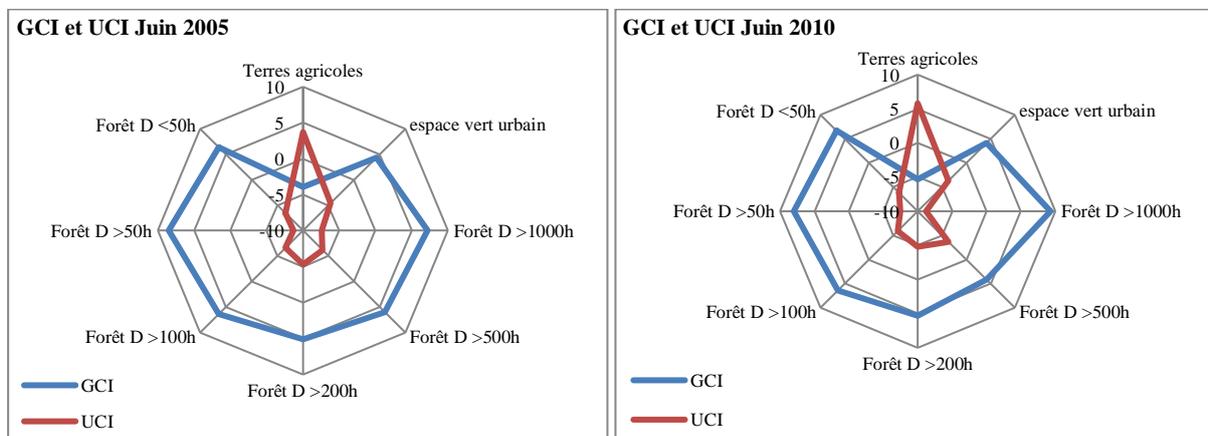
-La forêt de Oued Ziad avec une densité qui dépasse 50h possède un îlot de refroidissement de l'espace vert qui varie entre 6,4°C et 8,9°C durant la période d'étude, ainsi qu'il possède un îlot de refroidissement urbain qui se varie entre -7,5°C et -9,4°C durant la période d'étude.

-La forêt de Mensourah avec une densité moins que 50h possède un îlot de refroidissement de l'espace vert qui varie entre 4,4°C et 7,4°C durant la période d'étude, ainsi qu'il possède un

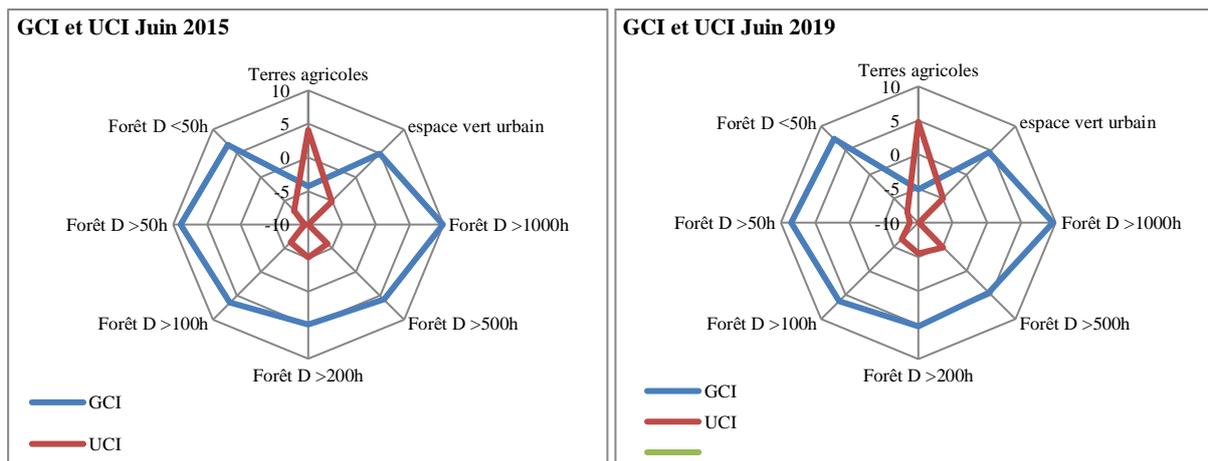
ilot de refroidissement urbain qui se varie entre $-5,7^{\circ}\text{C}$ et $-7,7^{\circ}\text{C}$ durant la période d'étude (Graphes 12, 13 et 14).



Graphes 12: Ilot de refroidissement de l'espace vert et urbain Juin 1990 et 2000 respectivement



Graphes 13: Ilot de refroidissement de l'espace vert et urbain Juin 2005 et 2010 respectivement



Graphes 14: Ilot de refroidissement de l'espace vert et urbain Juin 2005 et 2010 respectivement

II-7-2-Discussion :

Les résultats montrent que les terres agricoles et non agricoles, qui ne sont exploitées sont les terres les plus chaudes dans notre cas d'étude et qui avaient les températures les plus élevées durant la période d'étude. Cela est exprimé par les ilots de refroidissement de l'espace vert et

urbain (ils ne possèdent aucun îlot de refroidissement), donc on peut classer cette catégorie de végétation (terres agricoles exploitées pour la culture à sec et à irrigué comme le blé...etc, qui ont un indice de NDVI plus faible durant la saison sèche) comme des espaces qui ont aucune influence sur la zone urbaine.

-Les résultats montrent aussi que les espaces verts les plus influents sont la forêt de Djbel El Ouahch et la Forêt de Oued Ziad avec des îlots de refroidissement les plus élevés durant la période d'étude.

A-Relation de l'îlot de refroidissement et l'altitude

En prenant en compte la topographie de la ville de Constantine et l'altitude de chaque forêt, on remarque que la forêt de Djbel el Ouahch à une altitude qui dépasse 1000m, cette altitude cause une augmentation de la température et de précipitation par rapport à la zone urbaine (voir le chapitre 4 de la première partie dont le quel on a fait une correction de température pour la station de Djbel El Ouahch, le coefficient de correction de température est $2,42^{\circ}\text{C}$ et le coefficient de correction de précipitation est 138,4mm), donc si on prend on considération l'altitude de cette forêt, en appliquant le coefficient de correction des température les îlots de refroidissement s'augmentent par $2,42^{\circ}\text{C}$. Alors que, durant la saison froide, cette forêt est exposée au risque de gel qui peut endommager les arbres (Carte de localisation des forêts et leurs altitudes voir annexe 1).

-La forêt de Djebbas dans le mont de Chattaba et la forêt d'El Mridj se localisent sur une altitude plus de 800m, ce qui engendre aussi une augmentation des îlots de refroidissement.

-Tandis que, la forêt de Oued Ziad se localise sur une altitude plus basse (380m), cette forêt possède l'indice NDVI et les îlots de refroidissement les plus élevés et les températures les plus basses durant la période d'étude malgré sa densité. Si on applique le coefficient de correction de température et de précipitation, les températures se diminuent par $2,19^{\circ}\text{C}$ et les précipitations par 125,6mm. Mais la situation de cette forêt au bord de Oued Ziad favorise l'augmentation de l'indice NDVI et les îlots de refroidissement par rapport aux autres forêts.

B-Relation îlot de refroidissement/Type de végétation

La ville de Constantine est une région très riche en espèces végétales qui varie entre les arbres conifères, les arbres caduques, les plantes à tige, les plantes ornementales et l'herbe. Selon les résultats enregistrés du LST et du GCI, l'herbe, les buissons et les arbres ont des effets de refroidissement très différents sur l'environnement thermique urbain même s'ils ont la même surface. Même les différents types d'arbres qui consomment une grande quantité d'eau ont un bon effet causé par l'effet de la transpiration par rapport aux autres types d'arbres (Pin d'Alep

ou *Pinus halepensis*, *Eucalyptus*, *Cupressus* et *Quercus suber*) qui sont situés en zone urbaine. Donc la distribution verticale de la végétation doit être considérée pour obtenir une relation plus précise entre les caractéristiques de la végétation et l'environnement thermique urbain.

C- Relation îlot de refroidissement/densité de végétation

Les résultats de cette recherche indiquent que le LST et les îlots de refroidissement correspondent étroitement à la distribution des caractéristiques de l'usage du sol. Nous confirmons que la végétation forestière (à haute densité) a eu les effets de refroidissement les plus importants par rapport au LST moyen de la végétation dans la zone urbaine (la plus faible densité). Cela implique que l'effet de refroidissement de la végétation ne fonctionne que lorsque la couverture atteint un certain degré ($NDVI > 0,35$). Ils indiquent également qu'un îlot de refroidissement est le résultat agrégé des zones plus froides environnantes, et les effets de refroidissement cumulatifs des espaces verts environnants créent la zone de réduction de température maximale dans l'îlot de refroidissement.

II-8-Estimation de l'impact de changement de la composition et la configuration spatiale de l'espace vert sur le microclimat :

Les cartes d'occupation du sol ont été les données de base pour calculer les indices de structures spatiales (métriques). Le logiciel FRAGSTAT 4.2 nous a permis de calculer ces métriques. Cela a conduit à la quantification de la structure du paysage à l'échelle globale du paysage et à l'échelle de chaque classe. Pour y parvenir, les cartes d'occupation du sol ont été converties en fichier ASCII, ce qui a amené à sélectionner et de calculer ceux qui sont adaptés à la présente étude. Le calcul de ces métriques a donné une idée sur la présence et l'abondance des patches (composition du paysage) et la distribution et arrangement spatial des patches (configuration paysagère). Le tableau 7 présente les métriques utilisées.

Tableau 7: les métriques du paysage utilisées dans cette étude (Auteur, 2020)

métriques du paysage	Abréviation	niveau d'application	Description	Unités	Range
Shape index	SI	Patch	La mesure la plus simple de la complexité globale de la forme	-	$SI > 0$, aucune limite
Patch area	PA	Patch	La zone du patch	hectares	$PA > 0$, aucune limite
Class area	CA	Classe/paysage	CA est égal à la somme des superficies (m^2) de tous les patches du type de patch correspondant divisée par 10 000 (à convertir en hectares)	hectares	$CA > 0$, aucune limite
Patch density	PD	Classe/paysage	Le nombre de patches pour 100 ha	N/100 ha	$PD > 0$
Percent of landscape	PLAND	Classe/paysage	La proportion de la superficie totale occupée par un type de patch particulier; une mesure de la composition du paysage et de la dominance des types de patches	%	$0 < PLAND < 100$
Number of patch	NP	Classe/	Nombre de patches du type de patch correspondant	-	$NP \geq 1$, aucune limite

	paysage				
Largest patch index	LPI	Classe/ paysage	LPI est égal à la superficie (m ²) de plus grand patch du type de patch correspondant divisée par la superficie totale du paysage (m ²), multipliée par 100 (pour convertir en pourcentage)	%	0 < LPI < 100
Landscap e shape index	LSI	Classe/ paysage	La longueur totale du bord impliquant la classe correspondante divisée par la longueur minimale du bord de classe pour une classe agrégée au maximum.	-	LSI ≥ 1, no aucune limite
Mean patch size	MPS	Classe	La zone occupée par un type de patch particulier divisée par le nombre de patches de ce type	Hectares	MPS > 0 aucune limite
Aggregati on index	AI	Classe/ paysage	Le nombre de contiguïtés similaires impliquant la classe correspondante, divisé par le nombre maximal possible de contiguïtés similaires impliquant la classe correspondante, qui est atteint lorsque la classe est agrégée au maximum en un seul patch compact; multiplié par 100 (pour convertir en pourcentage).	%	0 ≤ AI ≤ 100
Mean patch shape index	Shape MN	Classe	Valeur moyenne de l'indice de forme	-	Shape mn ≥ 1, aucune limite
patch Richness	PR	paysage	Le nombre de types de patches dans le paysage; une mesure de la diversité des types de patches	-	PR ≥ 1, aucune limite
Shannon' s diversity index	SHDI	paysage	SHDI est égal à la somme, pour tous les types de patches, de l'abondance proportionnelle de chaque type de patch multipliée par cette proportion.	-	SHDI ≥ 1, aucune limite

II-8-1-extraction de l'espace vert

Cette étape consiste à extraire la classe de la végétation seulement (l'espace vert) à travers LA suppression des autres classes et la reclassification de la carte de l'usage du sol (Figure 16).

II-8-2-Création de la grille de classification

Afin d'attribuer une identité aux patches da la carte reclassée de l'espace vert, il est indispensable de créer une grille de classification (Fishnet). Pour cela nous avons proposé de créer une grille d'une cellule de 500mX 500m pour avoir un nombre assez important de cellules afin de faire la corrélation entre les métriques de patches et la température de surface du sol. La carte de l'espace vert a été convertie au polygone (format vecteur), et superposée avec la grille de classification (Figure 16), de cette manière chaque patch va prendre l'identité de la cellule dans laquelle il s'insert.

La même grille a été utilisée pour faire les statistiques zonales de la carte de température de surface du sol LST.

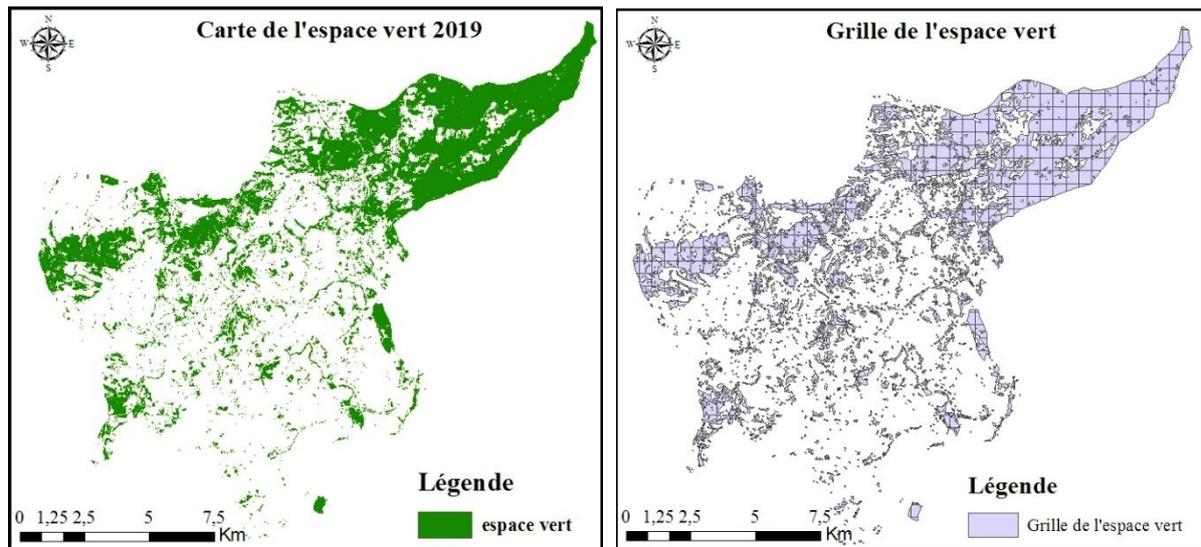


Figure 16: carte de l'espace vert reclassée et superposé avec la grille de classification (Auteur, 2020)

II-8-3-Conversion des vecteurs en Raster

Après avoir faire la superposition de la carte de l'espace vert (format vecteur) avec la grille de classification, nous avons convertie le fichier en format raster en donnant priorité à l'identité de cellules de la grille de classification (Figure 17).

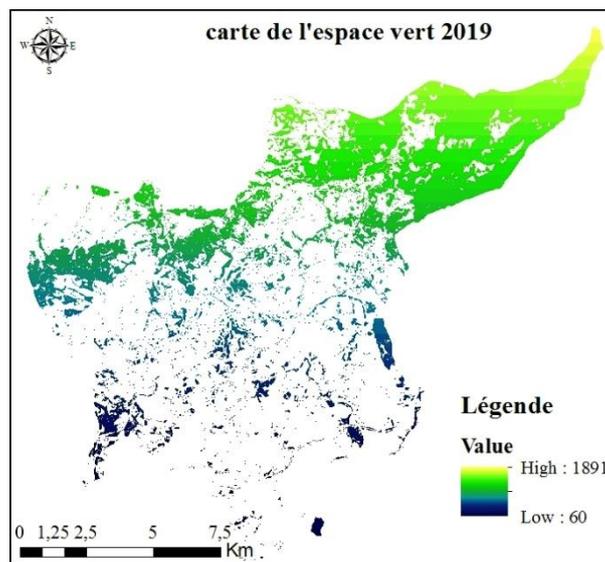


Figure 17: carte de l'espace vert format Raster (Auteur, 2020)

II-8-4-Conversion de Raster en fichier ASCII

L'étape suivante est de convertir le fichier Raster de l'espace vert superposé avec la grille de classification à un fichier de format ASCII (.txt), qui nous a servit comme un fichier input (base de données) utilisée dans le logiciel FRAGSTAT pour analyser la composition paysagère (Figure 18), un autre fichier est nécessaire, celui qui présente la description des classes que contient le fichier Raster.

Chapitre 3 : Evaluation de l'impact de l'espace vert sur le climat urbain de la ville de Constantine à travers la télédétection

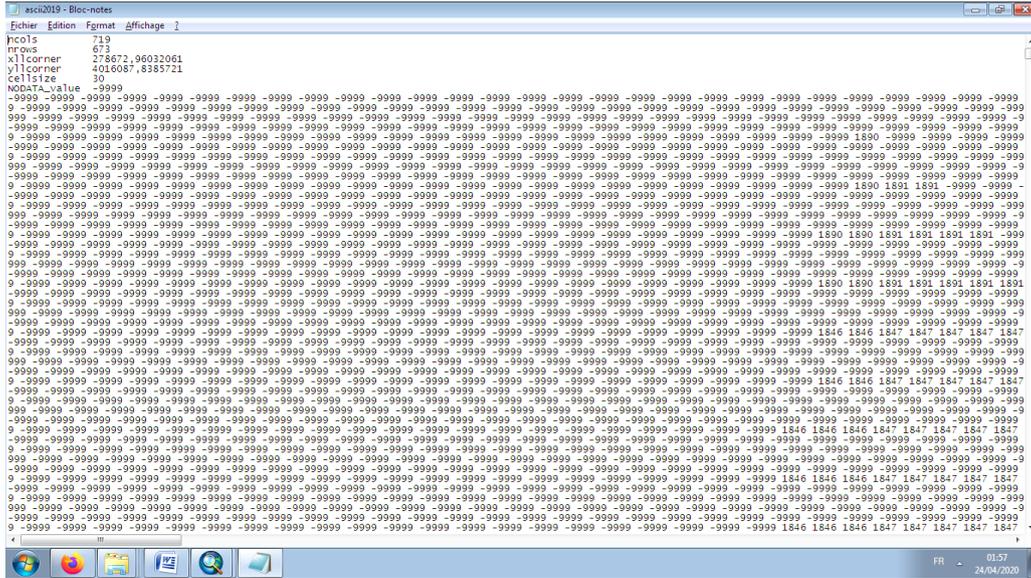


Figure 18: Fichier de format ASCII de l'espace vert Juin 2019 (Auteur, 2020)

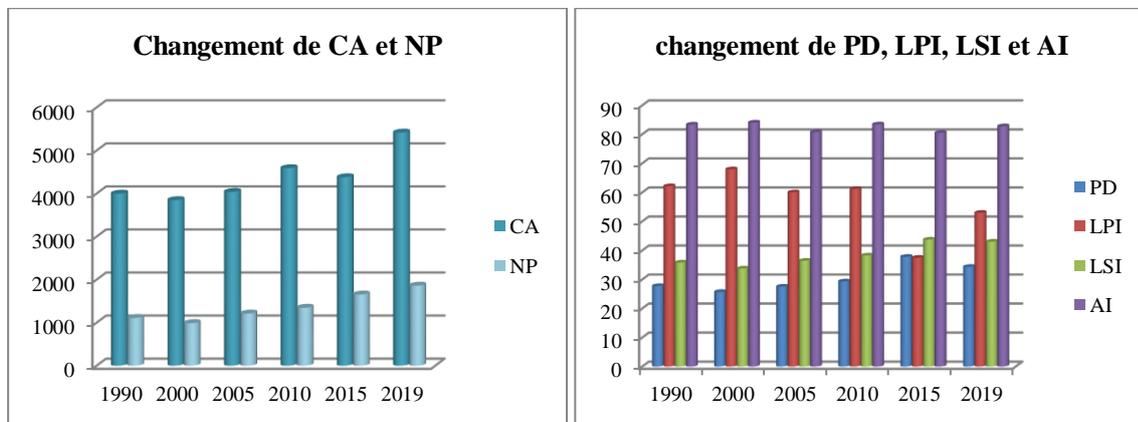
II-8-5-Résultats

II-8-5-1-Résultats des indices (métriques) de l'espace vert à l'échelle du paysage

Les métriques de la composition paysagère verte à l'échelle du paysage indiquent des processus du paysage à partir de la comparaison du nombre, la richesse et la diversité des patches verts de la ville de Constantine (Tableau 8).

Tableau 8: métrique de la composition paysagère verte à l'échelle du paysage de la ville de Constantine (Auteur, 2020)

	CA	NP	PD	LPI	LSI	PR	AI	SHDI
1990	3995,8200	1108,0000	27,7290	62,1244	35,8365	1,0000	83,3650	-0,0000
2000	3845,6100	988,0000	25,6916	67,9515	33,7802	1,0000	84,0424	-0,0000
2005	4035,0900	1211,0000	27,5252	60,0024	36,4435	1,0000	80,7911	-0,0000
2010	4586,2200	1345,0000	29,3270	61,1386	38,2478	1,0000	83,4069	-0,0000
2015	4376,7900	1654,0000	37,7903	37,4720	43,7376	1,0000	80,4896	-0,0000
2019	5413,8600	1859,0000	34,3378	52,9690	43,0367	1,0000	82,7737	-0,0000



Graphe 15: changement des métriques paysagères des l'espace vert de la ville de Constantine durant la période d'étude (Auteur, 2020)

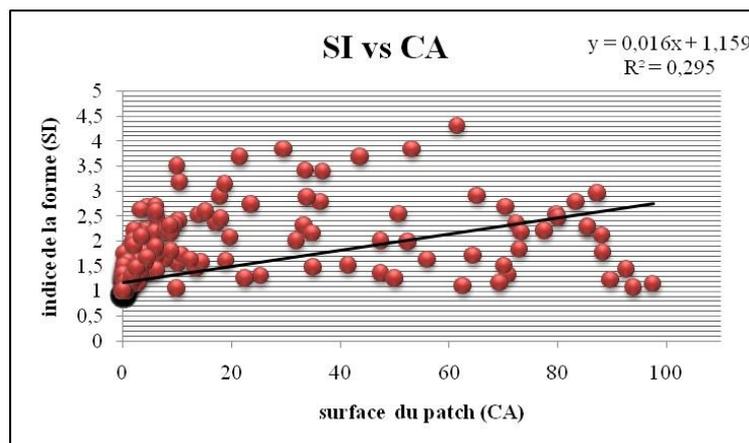
De l'analyse du tableau 8, il ressort que la surface totale du paysage (CA), le nombre de taches (NP), la densité de taches (PD) et l'indice de forme du paysage (LSI) se sont augmenté de 1990 à 2019, malgré la constance de la richesse (PR) qui est toujours représentée par une seule classe (1) et l'indice de diversité de Shannon représenté par une valeur nulle (0). Cela montre une complication de la structure du paysage à travers l'augmentation de l'hétérogénéité, un paysage qui prend à s'enrichir et diversifier d'une année à une autre. La réduction de l'indice LPI de 1990 à 2019 indique que le paysage s'est fragmentait et le nombre des patches s'est augmentait (Graphe 15).

II-8-5-2- Résultats des indices (métriques) de l'espace vert à l'échelle du patch

L'étude des indices de l'espace vert à l'échelle de patch montre que la surface des patches (CA) se varie entre (0,09h et 97,56h) avec une moyenne de 2,02h, des surface très variés a cause de la variété de types de l'espace vert (forêts, parcs, jardins, squares et arbres d'alignement...etc.), cette variété de surface implique une variété d'indice de la forme (SI), les valeurs enregistrées de SI se varient entre 1,000 pour des formes très simples non compliquées et 4,170 pour les formes très compliquées, ce qui engendre un paysage varié.

Les résultats montrent aussi que les patches de grandes surfaces possèdent l'indice de la forme SI le plus élevé et vice versa.

Le graphe 16 montre la relation entre la surface du patch et l'indice de la forme, une relation positive est établie entre les deux indices, les surface les plus grandes des patches vertes dans notre cas d'étude possèdent généralement les formes les plus complexes.



Graphe 16 : Relation entre surface du patch et indice de la forme (Auteur, 2020).

II-8-5-3- Résultats des indices (métriques) de l'espace vert à l'échelle de la classe :

Les résultats de l'étude des indices de l'espace vert à l'échelle de classes sont présentés dans l'annexe 2, les résultats obtenus affirment que:

-Les valeurs de la surface occupée par chaque classe (CA) varient entre 0,09h et 97,56h avec une moyenne de 23,34h, des surfaces très variées à cause de la variété du paysage et des types de l'espace vert qui composent ce paysage.

-Les valeurs de pourcentage du paysage à l'échelle de la classe (PLAND) varient entre 0,002 qui correspond à la valeur minimale de CA et 0,224 qui correspond à la valeur maximale de CA.

-Les valeurs de Nombre des patchs (NP) varient entre 1 et 49 patchs par classe, avec une moyenne de 11,54 patchs par classe, une distribution non homogène de patchs verts, engendre un paysage hétérogène et fragmenté.

-Les valeurs de la densité des patchs par classe (PD) varient entre 0,0023 qui correspond à un seul patch par classe, et 0,1125 qui correspond à la valeur maximale de nombre des patchs 49, avec une moyenne de 0,025

-Les valeurs de pourcentage total du paysage (LPI) varient entre 0,0002 et 0,224 avec une moyenne de 0,004, donc le paysage vert de la ville de Constantine est dominé par quelques taches vertes qui représentent les forêts à grande surface.

-Les valeurs de l'indice de forme du paysage (LSI) varient entre 1 et 7,34 avec une moyenne de 3,46. Alors que les valeurs de l'indice moyen de la forme des patchs (SHAPE_MN) varient entre 1 et 2,52 et une moyenne de 1,228, ces valeurs expriment les formes compliquées des taches vertes qui composent le paysage vert de notre cas d'étude.

-Les valeurs de l'indice d'agrégation AI varient entre 0 et 100, et une moyenne de 68,83, ces valeurs montrent que le paysage vert se compose généralement des patchs agrégés et adjacents voire un paysage vert fragmenté.

II-8-6-Corrélation entre les indices (métriques) de l'espace vert et la température de surface du sol (LST)

Certaines études ont confirmé la relation entre les caractéristiques spatiales de l'usage du sol et la LST (Zhou et al. 2011; Weng et al. 2007; Liu et Weng 2009) entre autres. Ces études ont indiqué que les métriques du paysage conservent un potentiel important dans l'exploration du profil spatial de la LST. Cependant, la plupart de ces études ont examiné les effets des caractéristiques spatiales de l'usage du sol, en particulier la couverture végétale et les zones bâties (Cao et al. 2010; Zhang et al. 2009; Weng et al. 2007), sur la LST.

On l'occurrence, nous avons choisi les indices du paysage vert les plus convenables à notre objectif pour étudier l'impact de la configuration spatiale de la couverture végétale de la ville

de Constantine sur son climat urbaine notamment la température de surface du sol, les résultats sont comme suit :

II-8-6-1-Mesures liées à la zone

-Les résultats enregistrés indiquent que la relation entre la surface occupée pour chaque classe CA et LST est une relation négative significative. Le graphique a montré une relation linéaire avec $R^2 = 0,369$ et $P = 0,000122$ (Tableau 9). La relation entre CA et la distribution du LST est forte. De même pour le pourcentage de paysage vert **PLAND**, une relation négative significative a été établie avec le LST avec $R^2 = 0,369$ et $P = 0,000122$ (tableau 13). Cela indique que l'augmentation de la surface et du pourcentage de patches verts a généré la diminution de la température de la surface du sol (LST) (Graphe 17).

-Une forte relation négative a été établie entre la taille moyenne des patches **MPS** et LST avec $R^2 = 0,139$ et $P = 0,000289$ (Tableau 9). L'augmentation des valeurs de MPS signifiait un paysage vert moins fragmenté et homogène qui aide à abaisser la température de surface du sol LST (Graphe 17).

-Nous avons constaté qu'une forte relation négative a été établie entre le pourcentage totale de paysage **LPI** et LST avec $R^2 = 0,382$ et $P = 0,000115$ (Tableau 9). L'augmentation des valeurs de LPI a provoqué la diminution des valeurs de LST, par conséquent, la dominance d'une grande tache verte a contribué à réduire la LST (Graphe 17).

II-8-6-2-Fragmentation et agrégation

-Nous avons constaté que la relation entre le nombre de patches **NP** et LST était positive. Une relation logarithmique significative a été établie avec $R^2 = 0,155$ et $P = 0,000490$ (tableau 9). De même pour la densité des patches **PD** avec LST, ils avaient une relation positive très forte et significative avec $R^2 = 0,155$ et $P = 0,000490$ (Tableau 9). Ces résultats ont montré que la fragmentation du paysage vert en plusieurs patches verts a provoqué l'augmentation du LST (Graphe 17).

- Pour l'indice d'agrégation **AI**, il y avait une relation négative significative entre AI et LST avec $R^2 = 0,225$ et $P = 0,000202$ (Tableau 9). Les valeurs élevées de l'IA ont provoqué une baisse de température, ce qui signifie que des patches verts adjacents, agrégés et homogènes sont recommandés pour réduire la température du LST (Graphe 17).

II-8-6-3-Complexité des formes

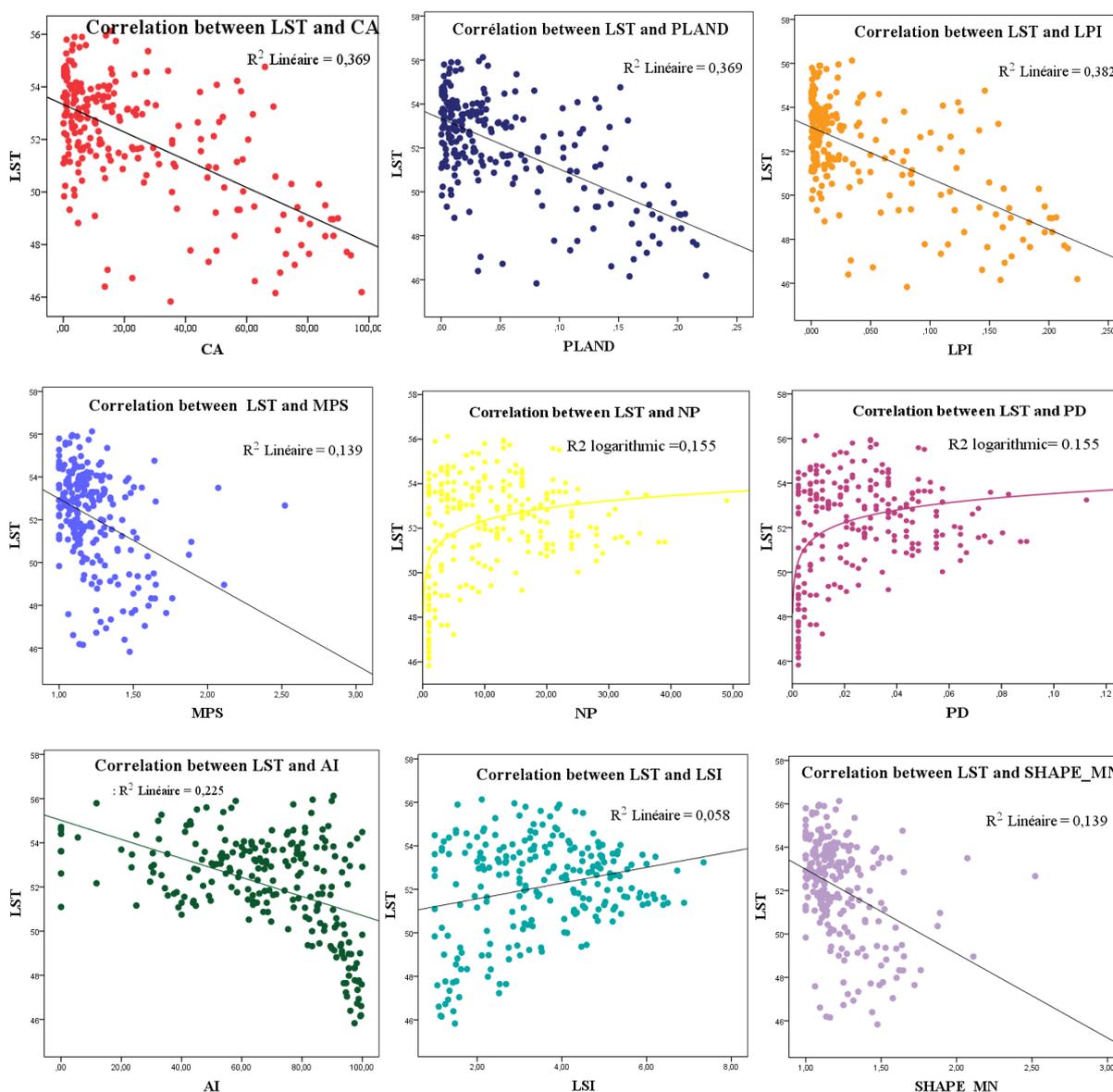
- Une forte relation positive avait été établie entre **LSI** et LST, $R^2 = 0,058$ et $P = 0,000229$ (Tableau 9). Les valeurs élevées de LSI et la complication du paysage vert ont provoqué

l'augmentation de la température de surface du sol. Ainsi, un paysage bien structuré et simple est préférable pour atténuer la température (Graphe 17).

Nous avons constaté qu'une relation négative significative a été établie entre l'indice moyen de forme des patches (SHAPE_MN) et LST. Une relation linéaire faible avec $R^2 = 0,139$ et $P=0,000290$ (Tableau 9) ainsi que l'augmentation des valeurs de cet indice ont provoqué la réduction de la LST (Graphe 17).

Tableau 9 : valeur de coefficient de Pearson R et les valeurs de P

N=228	CA	PLAND	MPS	LPI	PD	NP	AI	SHAPE	LSI
coefficientR	-0,607	-0,607	-0,373	-0,617	0,393	0,393	-0,474	-0,372	0,241
valeur P	0,000122	0,000122	0,000289	0,000115	0,000490	0,000490	0,000202	0,000290	0,000229



Graphe 17 : Corrélacion entre les métriques paysagères et la température de surface du sol LST

II-8-7-Discussion :

Les métriques de fragmentation et d'agrégation (PD, NP et AI) ont montré que les patches verts moins fragmentés (PD et NP inférieurs) et plus agrégés (AI supérieur) généraient des valeurs inférieures de LST.

Toutes les métriques paysagères étaient significativement corrélées avec le LST à différents degrés. Dans l'ensemble, toutes les mesures liées à la zone (CA, PLAND, MPS et LPI) étaient toutes négativement corrélées avec le LST, ce qui suggère qu'une couverture relativement plus verte avec des plus grandes taches apporte un effet de refroidissement plus élevé.

Les métriques de complexité de l'indice de forme (SHAPE_AM et LSI) étaient positivement corrélées avec LST, suggérant que la couverture verte dans notre zone d'étude avec des formes et des patches plus simples avaient un effet de refroidissement plus efficace.

Les métriques de fragmentation et d'agrégation (PD, NP et AI) ont indiqué que le paysage vert moins fragmenté (PD et NP inférieurs) et le paysage vert plus agrégé (AI supérieur) génèrent moins de LST.

-Conclusion

La ville de Constantine est composée d'une variété de types des espaces verts (forêts, parcs, jardins, squares, arbres d'alignement...etc.), ce que donne à cette ville le caractère d'un paysage vert très varié. Dans ce chapitre nous avons essayé d'estimer l'impact de la couverture végétale dans cette ville sur le climat urbain et la température de surface du sol LST.

La télédétection nous a offert un moyen judicieux pour évaluer l'impact de l'espace vert sur la température de surface du sol à travers l'estimation des indices NDVI, LST, GCI, UCI. Une analyse de corrélation bi-variée et des nuages de points ont été utilisés pour déterminer la relation entre le LST et les espaces verts. Les résultats enregistrés ont montré qu'il existe une relation négative entre NDVI et LST, l'augmentation des valeurs NDVI entraîne une diminution des valeurs LST. De plus, les résultats obtenus indiquent que le LST et l'effet de refroidissement des espaces verts correspondaient étroitement à la distribution des caractéristiques d'utilisation du sol. Les espaces verts denses avec les valeurs les plus élevées de NDVI possèdent l'effet de refroidissement le plus élevé. Ainsi, notre étude a confirmé que le type et la densité de la végétation ainsi que la taille et la forme des espaces verts étaient tous des facteurs importants dans la détermination de l'effet de refroidissement.

D'autre part, nous avons estimé l'îlot de refroidissement des espaces verts composants de la couverture végétale de cette ville à savoir les forêts, les forêts urbain et les espaces verts

urbains, et nous avons constaté que les espaces verte ayant la densité et les valeurs de NDVI les plus élevés possèdent l'îlot de refroidissement le plus élevé. Ainsi, notre étude confirme que le type et la densité de la végétation, la taille et la forme des espaces verts, sont tous des facteurs importants pour déterminer l'effet de refroidissement qui est un moyen efficace d'atténuer l'effet ICU, de réduire les effets du stress thermique, et fournir un cadre extérieur confortable pour les citoyens.

L'analyse des métriques paysagères à l'aide de logiciel FRAGSTAT révèle qu'un paysage vert simple, homogène et agrégé est plus efficace, les grandes taches vertes dominantes ont l'impact sur LST le plus élevés, et la fragmentation des taches vertes avec des formes compliquées engendre l'augmentation de LST.

Au terme de cette étude, il convient de noter que le couvert végétal de la ville de Constantine est un couvert à restructurer notamment au sein de la zone urbaine, à travers le choix du type, de la taille et des formes de ce couvert, sans oublier de donner une importance aux forêts environnantes pour les rendre plus efficaces dans l'atténuation de l'ICU.

Chapitre n°4

**Evaluation de confort thermique
dans les espaces extérieurs de la ville
de Constantine**

-Introduction

Le confort thermique est défini comme «cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique» (ISO 7730). Le confort thermique dans l'environnement extérieur est principalement lié à la thermo-physiologie, c'est-à-dire à la physiologie et à l'équilibre thermique du corps humain. Ce domaine d'étude relie les concepteurs urbains et paysagistes à la biométéorologie (plus l'accent sur les piétons) et à la climatologie (plus l'accent sur le climat). Depuis les années 1980, les études sur le confort thermique en milieu extérieur se sont multipliées en raison de l'attention accrue portée aux piétons dans les canyons, les places et les espaces verts. Cela a conduit à un grand nombre de recherches portant sur les paramètres de conception basés sur le confort thermique des piétons. Des recherches ont consacré pour étudier l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique et d'autres recherches ont été portées sur l'impact de l'espace vert et les espaces ombragés sur le confort des usagers à l'extérieur.

Après avoir étudié et analysé la couverture végétale de la ville de Constantine, quantifier son effet sur la température de surface du sol ainsi que son effet de refroidissement, et dans le but de confirmer ou bien infirmer les hypothèses annoncées auparavant, le présent chapitre sera consacré pour étudier l'impact de l'espace vert sur le confort thermique extérieur des usagers de quelques espaces publics à Constantine en se basant sur la prise de mesures in situ, la simulation et l'investigation sur terrain. Les résultats obtenus dévoilent la réalité sur l'efficacité ou l'inefficacité de l'espace vert existant.

I- La méthodologie de travail

I-1-le corpus d'étude

Le principe de cette partie est de faire une étude comparative entre des espaces publics urbains de différents types et avec une couverture végétale qui se diffère. Les espaces retenus sont des espaces à caractère significatif qui se situent au centre ville avec une variation en matière de fréquentation et d'usage. Nous avons choisi huit espaces publics (Jardins, parc, places publiques et rues canyons) à savoir : le jardin de Bachir Bennacer, la place Ahmed Bey et le parc de Bardo au centre ville, le jardin de Bayrouth à Sidi Mebrouk, la rue de Belouazdad et Ben Meliek au plein centre ville, le Jardin de Zouaghi et la place de Zouaghi.

I-1-1-Le jardin Bachir Bennacer

Un espace public urbain revient à l'époque coloniale, il se situe en plein centre ville sur une voie principale qui relie la vieille ville et El Coudiat, un espace de repos et de loisir par

excellence. Un jardin qui comporte plusieurs types d'arbre, pelouse, des passages piétons en pavé, et une fontaine qui ne fonctionne pas actuellement (Figure 1 et 2).

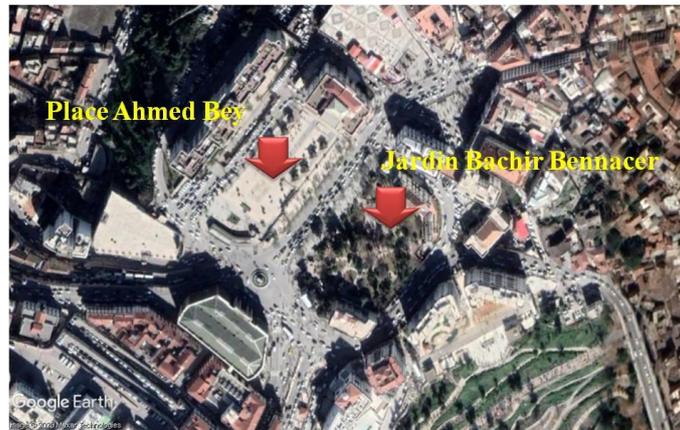


Figure 1 : situation géographique du jardin Bennacer et la place Ahmed Bey



Figure 2: jardin Bachir Bennacer (Auteur, 2019)

I-1-2- La Place Ahmed Bey

Un espace public qui se situe en plein centre ville juste à coté au jardin de Bachir Bennacer, elle est entourée par des hôtels et quelques équipements administratifs en occupant une situation stratégique, elle contient quelques kiosques fermés. Et elle est dépourvue de tous types de végétation, la couverture du sol est une couverture minérale (Figure 3).



Figure 3: Place Ahmed Bey (Auteur, 2019)

I-1-3- le parc de Bardo

Un parc urbain récemment construit qui occupe une situation stratégique au centre ville. Un espace vert qui peut contribuer par excellence dans le changement de climat urbain de la ville

de Constantine spécialement en le construisant aux bords de Oued Rhimel. sa surface importante lui donne le caractère des poumons de la ville (Figure 4 et 5).



Figure 4 : vue aeriene sur le parc de Bardo



Figure 5 : parc de Bardo (Auteur, 2019)

I-1-4- Rue canyon avec arbres d’alignement et sans arbres d’alignement

Le boulevard Belouezdad à saint jean est une rue canyon se situe dans un tissu colonial, elle est orientée sud-est Nord-Ouest et entourée de deux coté par des logements d’une hauteur de RDC+3. Elle reçoit un grand trafic routier durant la journée. Cette rue est connue par ces locaux commerciaux, le type de végétation qui y existe est seulement les arbres d’alignement (Figure 6 et 7).

La rue Ben Meliek à Saint jean aussi, une rue canyon dépourvue de tout type de végétation, notre choix est pour but de comparer les deux rues que se situent dans le même endroit et qui possèdent presque la même morphologie et la même orientation (Figure 6 et 7).



Figure 6 : Situation des deux rues



Figure 7: La rue Belouezdad et la rue Ben Meliek respectivement (Auteur, 2019)

I-1-5-Le jardin public de Bayrouth

Ce jardin a été créé dans la période coloniale à Sidi Mabrouk, il se localise dans un tissu urbain en damier colonial à caractère résidentiel. Il possède une forme carré, clôturé et entouré par quatre voies mécaniques. Le jardin comporte une variété en matière d'espace vert (arbre de plusieurs espèces, pelouse (Figure 8 et 9)).



Figure 8 : Vue aérienne sur le jardin de Bayrouth



Figure 9: Jardin Beyrouth (Auteur, 2019)

I-1-6-Jardin Public et place publique à Zoughi

Le premier jardin celui qui s'étale le long des logements Bortolazzo de la cité des frères Ferrade, il est équipé de quelques espaces verts, de bancs et d'une aire de jeux doté d'un terrain de sable pour la protection des enfants et d'un espace pour la pratique du sport.

Le deuxième site est une place publique récemment créée et qui s'étale entre deux voies mécaniques, elle adopte une richesse floristique avec différentes espèces. Elle est équipée d'une grande fontaine, quelques arbres, pelouse, des équipements d'éclairage public et des bancs, et un traitement minéral du sol. (Figure 10 et 11)



Figure 10: Situation de jardin public de Zouaghi (Auteur, 2019)



Figure 11: place publique à Zouaghi (Auteur, 2019)

I-2-La prise de mesure

Une campagne de mesures in situ a été entamée durant 03 jours du 20 au 22 juillet 2019 en saison chaude et dans des conditions extrêmes, afin de nous permettre de montrer la différence des microclimats dans quelques espaces publics urbains choisis pour l'étude comparative, certains par leur végétal assez dense et varié, arbres d'alignements, pelouses (Jardin Bennacer, Parc de Bardo, Jardin de Bayrouth et la rue Belouezdad), les autres sans aucune existence du végétal où la surface minérale est prédominante (place Ahmed Bay, Place de Zouaghi et la rue Ben Meliek).

I-3-Les mesures météorologiques

Les paramètres mesurés dans cette étape sont ceux qui peuvent influencer la sensation thermique des usagers dans l'environnement extérieur à savoir: la température de l'air (T_a), l'humidité relative (HR), la vitesse de l'air (V_a). Les mesures ont été effectuées à l'aide de l'instrument de mesure Testo 480, qui est un instrument fiable pour mesurer les paramètres liés au climat tel que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse des vents, la pression atmosphérique et le CO_2 (Voir annexe 2 pour plus d'information sur l'instrument). Le capteur a été maintenu à 1,50 m de hauteur par rapport au sol pour avoir les mêmes sensations que l'utilisateur.

I-4-Choix de logiciel de simulation

Il existe une forte demande dans le domaine des sciences appliquées telles que l'architecture, l'agriculture, la médecine, etc., pour des méthodes et des moyens de calcul climatologiques et biométéorologiques facilement compréhensibles. Plusieurs méthodes et logiciels de simulation utilisés pour étudier le confort des usagers dans les espaces extérieurs sont présentés dans (la partie 1, chapitre 3).

Le modèle de rayonnement et de bioclimat humain RayMan (Matzarakis et al, 2007) répond à cette demande. Malgré sa simplicité, RayMan fournit de bons résultats de simulation pour les

densités de flux de rayonnement et les indices d'évaluation thermo-physiologiquement significatifs (Tableau 1). L'utilisation des résultats dérivés de RayMan dans les sciences appliquées présente de nombreux avantages (Matzarakis et al, 2007). RayMan offre la possibilité d'importer des ensembles de données à long terme de paramètres météorologiques et de calculer des indices thermiques avec ou sans tenir compte de la morphologie urbaine.

Pour la dimension spatiale du micro climat, le modèle Skyhelios a été développé. Il peut être considéré comme le développement ultérieur de RayMan axé sur la dimension spatiale. Skyhelios utilise des processeurs graphiques qui peuvent être intégrés dans des modèles de simulation et de calcul de facteur de vue du ciel ou flux de rayonnement. Il peut être utilisé pour modéliser les conditions climatiques ou les paramètres climatiques pertinents à l'échelle micro en ce qui concerne les morphologies complexes (Matzarakis & Ludwigs, 2014).

Tableau 1: logiciels de simulation utilisés pour calculer les indices du confort thermique extérieur en fonction de modèle calculés (PMV, PET, UTCI, SET *, ETU et PT) et TMR. (Coccolo et al, 2016).

Logiciel	PMV	PET	UTCI	SET*	ETU	PT	TMR
ENVI-met et BioMet	√	√	√				√
RayMan	√	√	√	√		√	√
OTC model		√	√		√		
SOLWEIG		√	√				√
UTCI calculateur			√				

I-5-L'enquête sur terrain

Une enquête sur terrain a été lancée en parallèle avec la prise de mesures pour collecter la perception thermique des usagers des espaces publics analysés. Cette enquête sera réalisée à l'aide d'un questionnaire ; qui est une technique directe d'investigation scientifique utilisée auprès d'individus. Elle permet de les interroger de façon directive et de faire un prélèvement quantitatif en vue de trouver des relations mathématiques et de faire des comparaisons chiffrées, cette technique se divise en deux types : **Le questionnaire auto-administré**: est un formulaire de questions à remplir par la population enquêtée. Il est distribué à chaque élément de l'échantillon, c'est le type utilisé dans cette étude ; **Le questionnaire interview** : est un formulaire de questions posées par le chercheur qui note les réponses fournies par les répondants. L'instrument qu'on va utiliser ici est le formulaire de question.

I-5-1-Préparation du formulaire de questions

le formulaire de question nous permettra de relever les modes et les périodes d'utilisation de des espaces publics analysés, les facteurs qui influencent cette utilisation ainsi que les besoins et les aspirations des usagers, ce formulaire de questions est constitué d'un nombre de questions posées selon les indicateurs tirés de l'analyse conceptuelle, ces questions sont

essentiellement des questions fermées uniques, fermées échelles ou à choix multiple à une seule ou plusieurs réponses permises. Et afin d'élargir l'éventail des possibilités de réponses, un nombre restreint de questions ouvertes à réponses courtes a été aussi inséré (Annexe 3).

I-5-2-L'échantillonnage

Vu que notre travail sera fait sur des espaces publics, la sélection de la population questionnée sera suivant un échantillonnage aléatoire ; grâce à la diversité des gens qui fréquentent ces espaces, des groupes de population qui ne sont pas fixes, ne sont pas permanents, et qui ne sont pas limités et car le but recherché est d'approfondir la connaissance du changement de pratique d'un public face aux changements de paramètres climatiques.

I-5-3-Taille de l'échantillon sélectionné

Pour la taille de l'échantillon nous avons sélectionné un nombre total atteint les 150 individus, ce nombre sera réparti également (30 questionnaires par espace) sur 5 espaces publics (Sauf le parc de Bardo qui est encore hors service et les deux rues), cet échantillon nous semble représentatif et suffisants du fait que notre objectif à atteindre est certes l'étude de confort thermique des usagers des espaces publics, dans cette mesure la recherche d'une représentation des différentes catégories sociales est plus importante que la taille de l'échantillon. En outre pour acquérir plus d'information, un nombre de formulaire sera posé verbalement sur les usagers dans chaque espace afin de mieux cerner les problèmes qui confrontent les usagers et qu'on n'arrivera pas à cerner par le formulaire de question seulement. Avant le commencement de la collecte de données, un nombre du formulaire de questions sera distribué pour vérifier sa faisabilité (Annexe 3).

I-5-4-Logiciel de traitement des résultats

Le logiciel choisi pour traiter les données collectées est SPSS 26. C'est un logiciel utilisé pour l'analyse statistique. C'est aussi le nom de la société qui le revend. La première version de SPSS a été mise en vente en 1968 et fait partie des programmes utilisés pour l'analyse statistique en sciences sociales. Actuellement ce logiciel est utilisé dans tous les domaines scientifiques.

II-Evaluation de confort des usagers dans les espaces extérieurs à Constantine

II-1-variation des paramètres climatiques mesurés

II-1-1-variation de la température de l'air

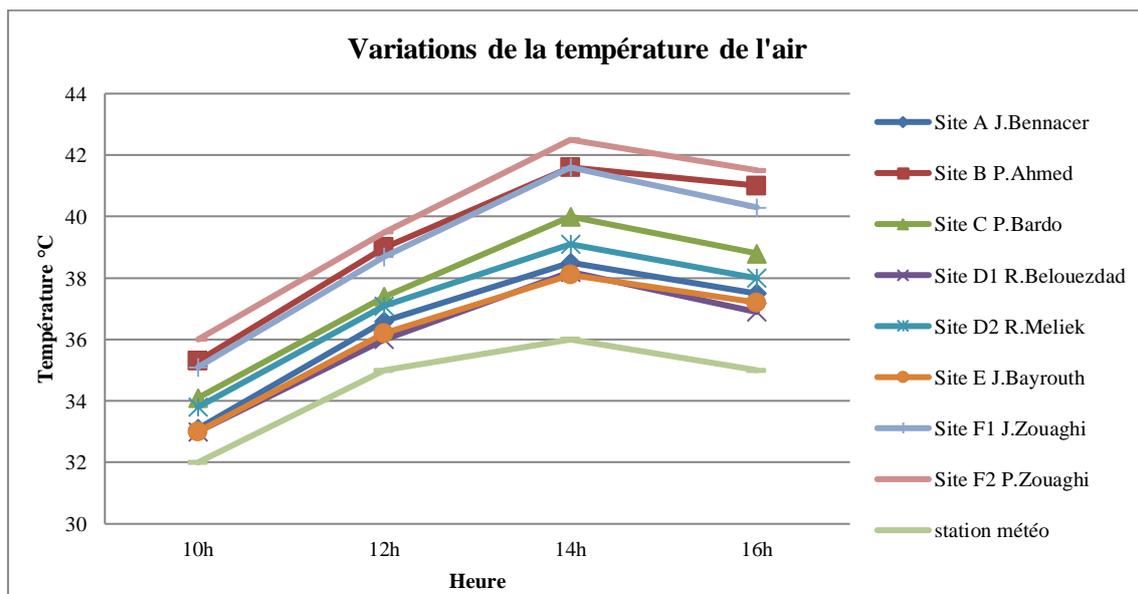
Le Tableau 2 résume les variations de la température de l'aire mesurée dans 8 sites urbains ainsi celle mesurée par la station météorologique de Ain El Bey.

Tableau 2: variation de la température de l'air dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique

Date	Bennac °C	Ahmed °C	Bardo °C	Rue 1 °C	Rue 2 °C	Bayrou °C	J.zoua °C	P.Zoua °C	station météo	
jour 1	10h	33,3	35,6	34,5	33,2	34,9	33,2	35,4	36	33
	12h	36,9	39,4	37,9	36,1	37,5	36,7	39,2	39,8	36
	14h	38,8	42	40,2	38,3	39,5	38,6	42,2	43	38
	16h	37,8	41,1	39	37,2	38,3	37,9	41,3	42,2	37
jour 2	10h	33,1	35,3	34,1	33	33,8	33	35,1	36	32
	12h	36,6	39	37,4	36	37,1	36,2	38,7	39,5	35
	14h	38,5	41,6	40	38,2	39,1	38,1	41,6	42,5	36
	16h	37,5	41	38,8	36,9	38	37,2	40,3	41,5	35
jour 3	10h	32,2	34,2	33,1	32,2	32,8	32	34	35	30
	12h	35,5	38	36,3	35,1	36	35,1	37,5	38,2	32
	14h	37,4	40,5	39,1	37,1	38,1	37,1	40,4	41,2	35
	16h	36,5	39,5	38,1	36,2	37,2	36,3	39,6	40,5	35

L'analyse comparative des valeurs de température de l'air enregistrées dans les stations de mesure d'une part et les valeurs enregistrées au niveau de la station météorologique d'Ain El Bey d'une autre part révèle que les basses valeurs de température sont enregistrées au niveau des espaces publics végétalisés et notamment ceux qui comportent une végétation dense tandis que les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des places publiques qui sont dépourvues de la végétation (Graphe 1).

Les basses températures ont été enregistrées à 10h du matin au niveau de jardin de Bachir Bennacer (la moyenne 32,8°C), au jardin de Bayrouth (la moyenne 32,7°C) et au niveau de la rue Beouezdad (la moyenne 32,8°C), toutes les valeurs enregistrées des basses températures sont supérieures de celle de la station météorologique de Ain El Bey.



Graphe 1 : variation de la température de l'air dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique (Auteur, 2019)

Les pics des températures sont enregistrées à 14h après midi, les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de la places Ahmed Bey (la moyenne 41,3°C) la place de Zouaghi (la moyenne 41,3°C) et au niveau de la rue de Ben Meliek (la moyenne 41,3°C).

Au niveau de Parc de bardo, les valeurs enregistrées sont moyenne par rapport aux autres sites analysés. Les températures moyennes enregistrées dans les stations de mesures restent toujours supérieures à celle enregistrées au niveau de la station météorologique d'Ain El Bey.

II-1-2- variation de l'humidité relative

Le Tableau 3 résume les variations de la température de l'aire mesurée dans 8 sites urbains ainsi celle mesurée par la station météorologique de Ain El Bey.

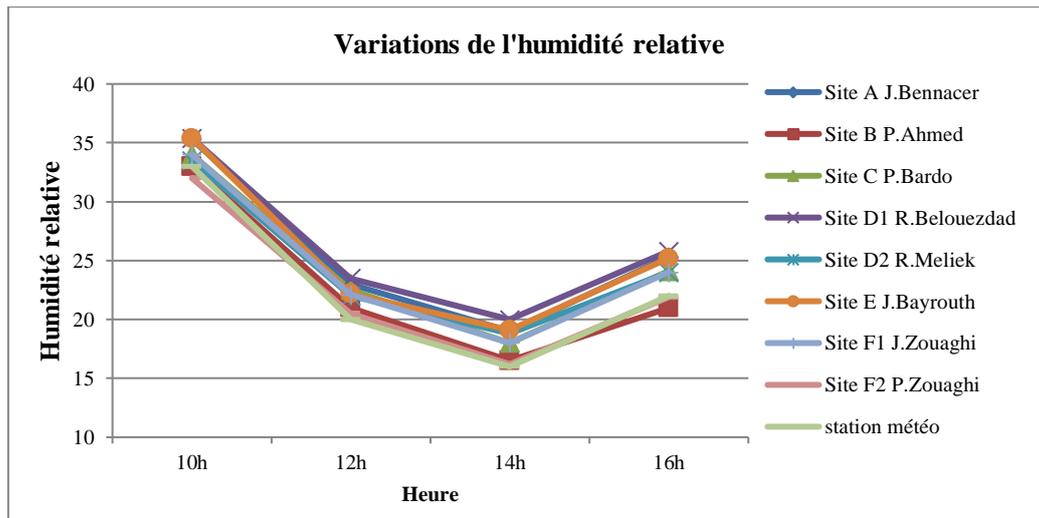
Tableau 3: variation de l'humidité relative dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique

Date	Bennac %	Ahmed %	Bardo %	Rue 1 %	Rue 2 %	Bayrou %	J.zoua %	P.Zoua %	station météo	
jour 1	10h	29,3	26,3	28	29	26,5	29,4	27,8	26,2	26
	12h	27	23	25	27,3	23,3	27,2	24,8	22,5	22
	14h	25,8	22,5	23,3	26	22,8	26	23	21,5	21
	16h	26,9	23,8	26	27	24	27	25,8	23,8	24
jour 2	10h	35,3	33	34	35,4	33,5	35,4	34	32	33
	12h	23	21	22,5	23,5	22	22,2	22,1	20,5	20
	14h	19	16,5	18	20	18,8	19,1	18	16,2	16
	16h	25,3	21	24,1	25,8	24	25,2	24	21,9	22
jour 3	10h	40,1	38,5	39	40,3	39	40,2	39,2	38,3	38
	12h	35	33,5	34	36	34,2	35,2	34,1	33,1	33
	14h	25,4	24	25	25,9	25	25,6	25,2	24	23
	16h	21	19,8	20	21,5	20	21,2	20,3	19,5	19

L'analyse comparative des valeurs de l'humidité relative enregistrées dans les stations analysées d'une part et les valeurs enregistrées au niveau de la station météorologique d'Ain El Bey d'autre part montre que les taux de l'humidité relative enregistrés au niveau de toutes les stations de mesure sont supérieurs à celui de la station d'Ain El Bey (Graphe 2).

Les valeurs minimales de l'humidité relative sont enregistrées après midi à 14h dans tous les sites étudiés. Les valeurs les plus basses sont enregistrées au niveau de la places d'Ahmed Bey (la moyenne), à la places publique de Zouaghi et au niveau de la rue de Ben Meliek tandis que les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de jardin de Bachir Bennacer (la moyenne), au jardin de Bayrouth et au niveau de la rue de Belouezdad.

Les valeurs moyennes par rapport aux précédentes sont enregistrées au niveau de parc de Bardo.



Graph 2 : variation de l'humidité relative dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique (Auteur, 2019)

II-1-3-variation de la vitesse de l'air

Le Tableau 4 résume les variations de la vitesse des vents mesurée dans 8 sites urbains ainsi celle mesurée par la station météorologique de Ain El Bey.

Tableau 4: variation de la vitesse de l'air dans les sites étudiés par rapport à la station météorologique

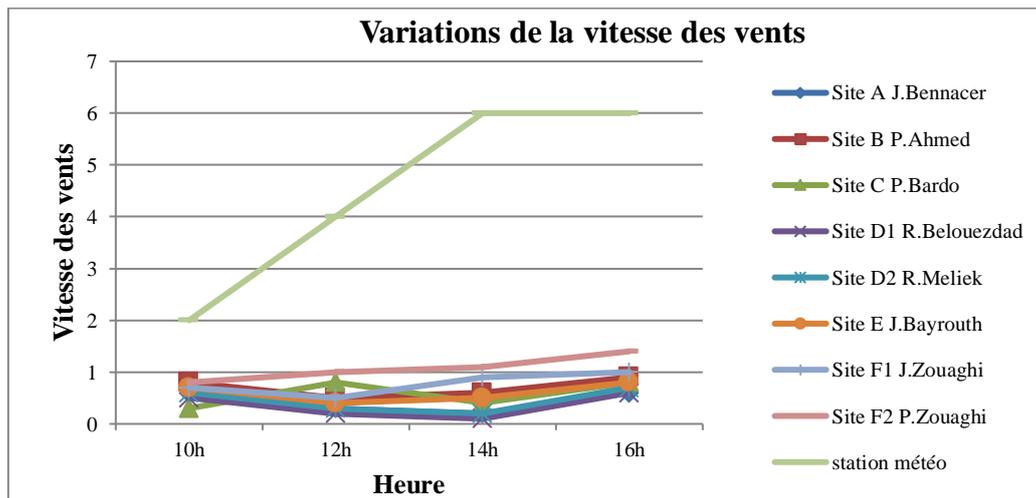
Date	Bennac (m/s)	Ahmed (m/s)	Bardo (m/s)	Rue 1 (m/s)	Rue 2 (m/s)	Bayrou (m/s)	J.zoua (m/s)	P.Zoua (m/s)	station météo	
jour 1	10h	0,6	0,8	0,7	0,5	0,5	0,7	0,6	0,8	2
	12h	0,2	0,4	0,8	0,1	0,1	0,3	0,5	1	5
	14h	0,3	0,5	0,5	0,1	0,1	0,4	0,8	1,2	5
	16h	0,7	1	0,7	0,5	0,5	0,8	1	1,5	6
jour 2	10h	0,6	0,8	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	2
	12h	0,3	0,5	0,8	0,2	0,3	0,4	0,5	1	4
	14h	0,2	0,6	0,4	0,1	0,2	0,5	0,9	1,1	6
	16h	0,6	0,9	0,8	0,6	0,7	0,8	1	1,4	6
jour 3	10h	0,7	0,9	0,4	0,6	0,5	0,7	0,6	0,8	3
	12h	0,3	0,5	0,8	0,2	0,1	0,3	0,5	1	3
	14h	0,3	0,5	0,5	0,2	0,1	0,4	0,8	1,2	5
	16h	0,8	1,1	0,7	0,6	0,5	0,8	1	1,5	5

La campagne de mesures s'est déroulée pendant des journées non ventées, les valeurs obtenues dans tous les sites étudiés restent toujours inférieures que celles enregistrées au niveau de la station d'Ain El Bey.

Les valeurs les plus basses sont obtenues au niveau des deux jardins (le jardin de Bayrouth et le jardin de Bennacer), l'existence de végétal joue un rôle de ralentisseur des vents. La morphologie des deux rues canyons de Belouezdad et Ben Meliek et leur orientation aident à les protéger des vents, mais l'existence des arbres d'alignement au niveau de la première rue a fait la différence en baissent la vitesse de l'air. Pour le site de la place d'Ahmed Bey, nous avons enregistrées des valeurs un peu élevées que celles des deux jardins, aussi la spécificité

morphologique (elle se situe dans un tissu urbain dense) et topographique font qu'elle soit protégée des vents. Le parc de Bardo possède aussi des valeurs un peu basses grâce à sa morphologie, son site et sa topographie.

La place de Zouaghi possède les valeurs les plus élevées à cause de sa situation dans un site ouvert et exposé au vent sa morphologie et son aménagement, alors que l'existence de la végétation dans le jardin de Zouaghi a baissé la vitesse des vents (Graphe 3).



Graph 3 : variations de la vitesse de l'air dans les stations de mesure par rapport à la station météorologique de Ain El Bey (Auteur, 2019)

-Discussion

L'impact de la végétation sur le microclimat est observé sur tous les paramètres climatiques mesurés ; les résultats enregistrés de la température de l'air montrent que les valeurs journalières les plus faibles sont obtenues aux points plus proches de la végétation. Les valeurs enregistrées les plus élevées de taux d'humidité relative sont obtenues aux points aussi les plus proches de la végétation. Les valeurs faibles de la vitesse de l'air sont obtenues dans les sites dont la couverture végétale est plus dense, dans la comparaison des sites étudiés.

L'impact de la végétation sur le microclimat est observé clairement dans le jardin Bennacer, le jardin de Bayrouth causé par les grands arbres, les arbres d'alignement, de la pelouse, plantes grimpantes. Quant à la rue de Belouazded en la comparant avec la rue de Ben Meliek, la végétation dans la première rue (les arbres d'alignement) a créé un effet modérateur de l'îlot de chaleur urbain. Dans les deux places (Ahmed Bey et Zouaghi) qui sont presque dépourvues de la végétation, nous avons enregistrées les valeurs les plus élevées de la température et de la vitesse de l'air ainsi que les valeurs les plus basses de l'humidité de relative. Le manque de la végétation à créé des risques d'échauffement causés par les surfaces minérales.

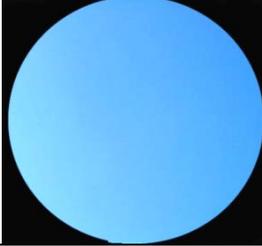
II-2- Processus de modélisation

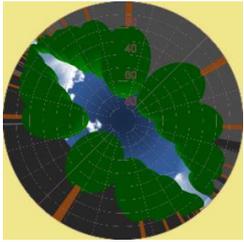
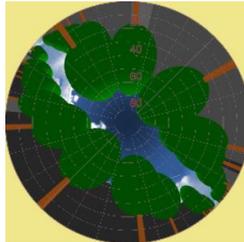
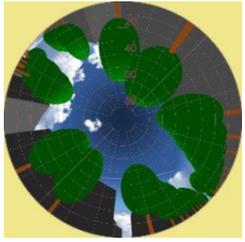
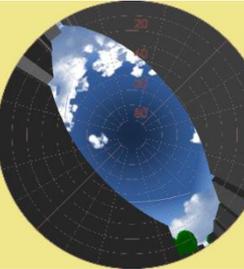
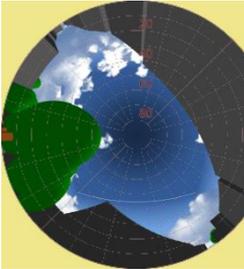
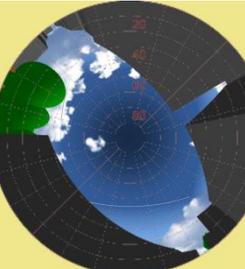
Comme nous avons expliqué précédemment, le logiciel choisi pour faire la simulation et le calcul des indices de confort est le modèle RayMan (T_{mrt}, PMV, PET, UTCI, SET*, PT) ainsi que le modèle Skyhelios pour le calcul rapide des facteurs climatiques à micro-échelle (SVF, PET, radiations solaire, chemin de soleil, vitesse des vents, direction des vents, PT, UTCI, T_{mrt}...etc.) résolus spatialement. Les paramètres météorologiques mesurés, les images de facteur de vue du ciel (Sky view factor SVF) obtenues au niveau des sites étudiés et qui sont traitées à l'aide de logiciel GIMP pour les rendre en images fish-eye. Ainsi que d'autres données sur le métabolisme et l'activité de la personne interrogée seront utilisés comme des inputs dans RayMan et SkyHelios.

II-3- Analyse de facteur de vue du ciel (SVF)

Les images prises in situ dans les différents espaces publics qui constituent notre corpus d'étude ont été traitées par le logiciel GIMP pour les rendre en image Fisheye, dans le but est de calculer le facteur d'ouverture de ciel (Tableau 5).

Tableau 5: Vues de ciel dans les espaces étudiés (images fisheye) (Auteur, 2020)

	espaces	A	B	C
jardin Bennacer		SVF=0.245 	SVF=0.125 	SVF=0.105 
place Ahmed Bey		SVF=1 	SVF=1 	SVF=1 
parc de Bardo		SVF=0.119 	SVF=0.110 	SVF=1 

la rue Belouezdad		SVF=0,150 	SVF=0,134 	SVF=0,229 
la rue Ben meliek		SVF=0,350 	SVF=0,340 	SVF=0,330 
jardin bayrouth		SVF=0,261 	SVF=0,495 	SVF=0,133 
place Zouaghi		SVF=1 	SVF=1 	SVF=1 
Jardin Zouaghi		SVF=1 	SVF=0,492 	SVF=0,345 

L'analyse de facteur de vue du ciel (SVF) montre que plusieurs valeurs ont été enregistrées au niveau de chaque espace étudié. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de la place Ahmed Bey et la place de Zouaghi qui sont totalement dépourvue de végétation et d'autres types d'aménagement qui peuvent générer de l'ombre aux usagers, et ainsi dans quelques points dans les autres espaces. Les valeurs basses sont enregistrées au niveau de jardin de Bennacer, la rue de Belouezdad et le jardin de Bayrouth à grâce à la densité de végétation.

II-4-Estimation des indices de confort

Les indices choisis pour l'étude sont basés sur le bilan énergétique de l'être humain, montrant l'interrelation entre les activités métaboliques, les vêtements et les paramètres climatiques (température de l'air, température moyenne de rayonnement, vitesse du vent, irradiation solaire et humidité relative) sur la perception thermique du piéton. Le tableau 6 présente les valeurs de chaque indice, la perception et le niveau de stress thermique.

Tableau 6: valeurs des indices de confort thermique et la perception thermique liée à chaque valeur (traité par l'auteur, 2020).

PMV	PET	SET* (°C)	UTCI (°C)	perception thermique	Niveau de stress physique
Moins de -4	Moins de 4	Moins de 10	Entre -40 et -27	Très Froid	stress dû au froid extrême
Entre -3 et -4	Entre 4 et 8	10,0-14,5	Entre -27 et -13	Froid	Fort stress dû au froid
Entre -2 et -3	Entre 8 et 13	14,5-17,5	Entre -13 et 0	Frais	Stress froid modéré
Entre -1 et -2	Entre 13 et 18	17,5-22,2	Entre 0 et 09	Légèrement frais	Léger stress dû au froid
Entre -1 et +1	Entre 18 et 23	22,2-25,6	Entre 09 et 26	Confortable	Pas de stress thermique
Entre +1 et +2	Entre 23 et 29	25,6-30,0	Entre 26 et 32	Légèrement chaud	Léger stress thermique
Entre +2 et +3	Entre 29 et 35	30,0-34,5	Entre 32 et 38	chaud	Stress thermique modéré
Entre +3 et +4	Entre 35 et 41	34,5-37,5	Entre 38 et 46	Très chaud	Fort stress thermique
Plus de +4	Plus de 41	Plus de 37,5	Plus de 46	Extrêmement chaud	Stress thermique extrême

La modélisation des sites étudiés sur Rayman et Skyhelios donne les résultats suivants :



Figure 12: modélisation de jardin Bennacer et place Ahmed Bey respectivement (Auteur, 2020).

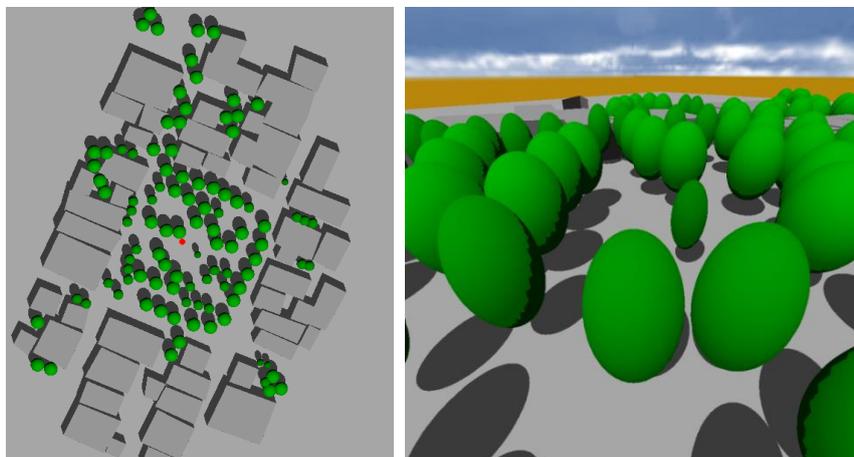


Figure 13: modélisation de jardin Bayrouth (Auteur, 2020).

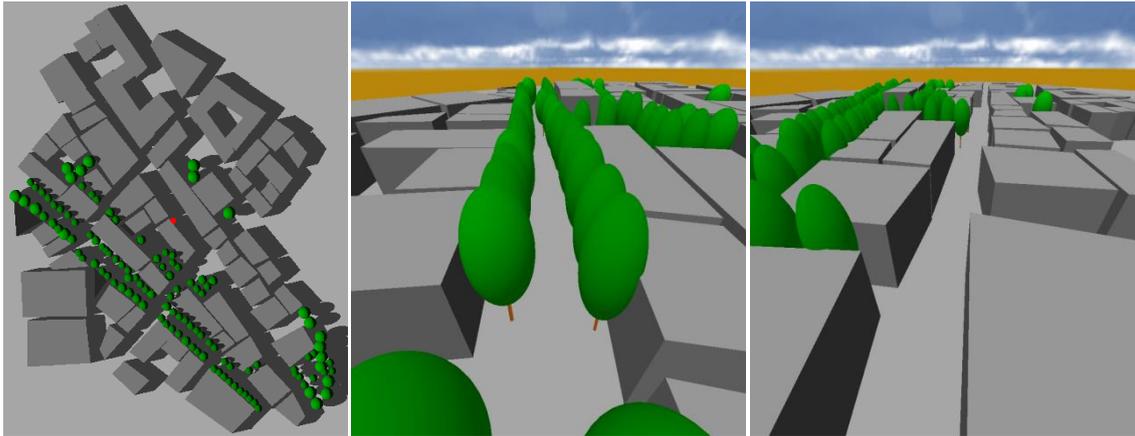


Figure 14: modélisation de la rue Belouezdad et Ben Meliek respectivement (Auteur, 2020).

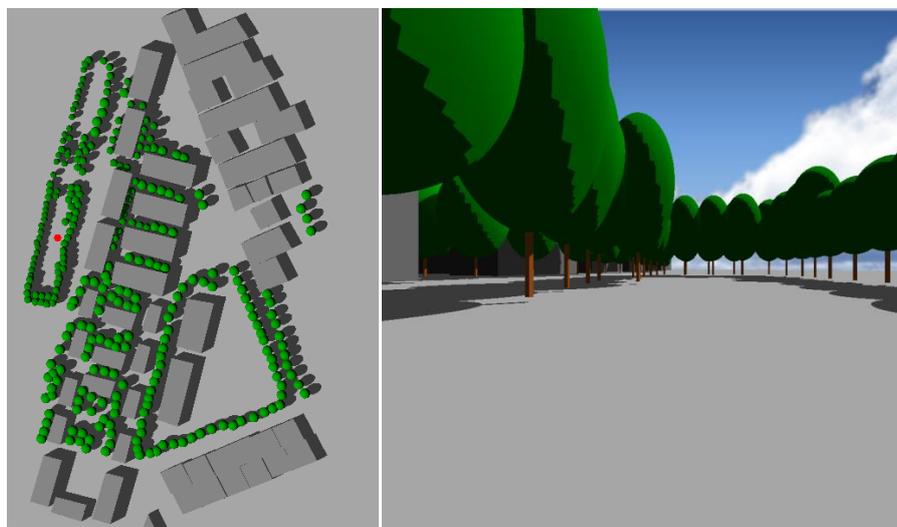


Figure 15: modélisation de jardin de Zouaghi (Auteur, 2020).

II-4-1-Température moyenne radiante (T_{mrt})

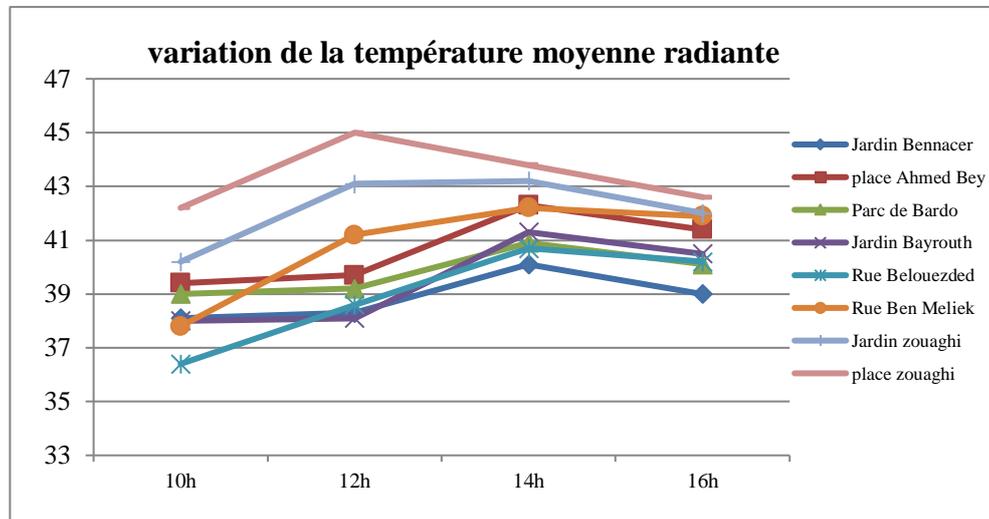
La température moyenne radiante est une mesure importante du stress thermique sur l'organisme du corps humain, en raison de l'effet du rayonnement de toute la sphère environnante. Elle a une forte influence sur les indices de confort thermique comme le PET ou le PMV.

Tableau 7 : valeurs de la température moyenne radiante dans les espaces étudiés (Auteur, 2020).

T_{mrt} (C°)	Bennacer	Ahmed	Bardo	Bayrouth	Belouezded	Ben Meliek	J.zouaghi	p.zouaghi
10h	38,1	39,4	39	38	36,4	37,8	40,2	42,2
12h	38,3	39,7	39,2	38,1	38,6	41,2	43,1	45
14h	40,1	42,3	40,9	41,3	40,7	42,2	43,2	43,8
16h	39	41,4	40,1	40,5	40,2	41,9	42	42,6

Les valeurs de la température moyenne radiante selon le tableau 7 varient entre 36,4°C et 45°C. Les valeurs maximales ont été enregistrées à 14h après midi (entre 40,1°C et 43,8°C) et à 16h de soir (entre 39°C et 42,6°C) dans chaque espace étudié. Nous avons remarqué que

les valeurs minimales ont été enregistrées au niveau de deux rue Belouezdad et la rue Ben Meliek à 10h du matin. Au niveau de jardin de Bennacer et Bayrouth, les valeurs sont moyennes par rapport aux autres. Tandis que les espaces qui ont marquées des valeurs très élevées sont le jardin et la place de Zouaghi (Graphe 4).



Graph 4 : variation de la T_{mrt} dans le corpus d'étude durant les heures de mesure (Auteur, 2020).

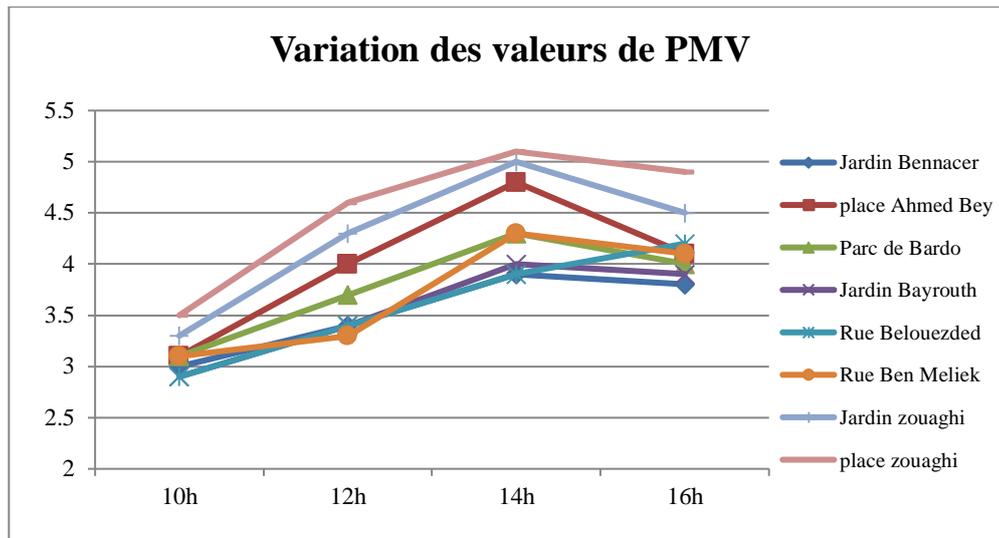
II-4-2- Le vote moyen prévisible (PMV)

Le tableau 8 suivant présente les valeurs de l'indice PET dans le corpus d'étude :

Tableau 8: valeurs de vote moyen prévisible PMV dans les espaces étudiés (Auteur, 2020).

PMV	Bennacer	Ahmed	Bardo	Bayrouth	Belouezded	Ben Meliek	J.zouaghi	p.zouaghi
10h	3	3,1	3,1	2,9	2,9	3,1	3,3	3,5
12h	3,4	4	3,7	3,4	3,4	3,3	4,3	4,6
14h	3,9	4,8	4,3	4	3,9	4,3	5	5,1
16h	3,8	4,1	4	3,9	4,2	4,1	4,5	4,9

Le tableau 8 résume les valeurs du vote moyen prévisible dans le corpus d'étude. Bennacer, de Bayrouth et à la rue de Belouezdad). A 12h, nous avons enregistré un stress thermique fort (PMV entre 3 et 4) et une sensation de très chaud au niveau de la majorité des espaces vert, alors qu'un stress thermique très fort a été signalé au niveau des places publiques. Les résultats obtenus des PMV à 14h et 16h montrent que le stress thermique est extrême dans la majorité des espaces sauf le jardin de Bennacer et de Bayrouth ainsi que la rue de Belouezdad (Graphe 5).



Graphe 5: variation de PMV dans le corpus d'étude durant les heures de mesure (Auteur, 2020).

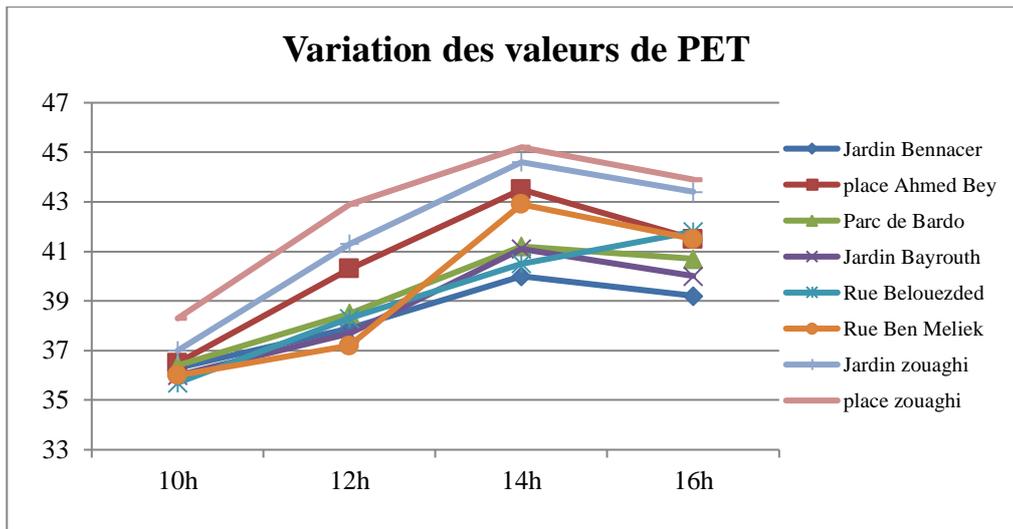
II-4-3- La température physiologique équivalente (PET)

Le tableau 9 présente les valeurs de l'indice PET dans le corpus d'étude :

Tableau 9: valeurs de la température physiologique équivalente PET dans les espaces étudiés (Auteur, 2020).

PET (°C)	Bennacer	Ahmed	Bardo	Bayrouth	Belouezded	Ben Meliek	J.zouaghi	p.zouaghi
10h	36,3	36,5	36,4	36	35,7	36	37	38,3
12h	37,9	40,3	38,5	37,7	38,3	37,2	41,3	42,9
14h	40	43,5	41,2	41,1	40,5	42,9	44,6	45,2
16h	39,2	41,5	40,7	40	41,8	41,5	43,4	43,9

La succession des résultats dans le Tableau 9 prédisent que les valeurs de l'indice PET enregistrées varient entre 35,7°C et 45,2°C. Un stress thermique fort et une sensation thermique de très chaud ($PET < 41^{\circ}C$) ont été enregistrés à 10h et à 12h dans la majorité des espaces étudiés. Tandis qu'un stress thermique extrême et une sensation thermique d'un climat extrêmement chaud ont été enregistré à 14h et à 16h dans la majorité des espaces sauf le jardin de Bennacer et le jardin de Bayrouth dont le stress était toujours fort. Les valeurs maximales ont été obtenues à la place et au jardin de Zouaghi. Et les valeurs minimales a été obtenues au jardin de Bennacer, de Bayrouth et à la rue Belouezdad (Graphe 6).



Graphe 6: variation de PET dans le corpus d'étude durant les heures de mesure (Auteur, 2020).

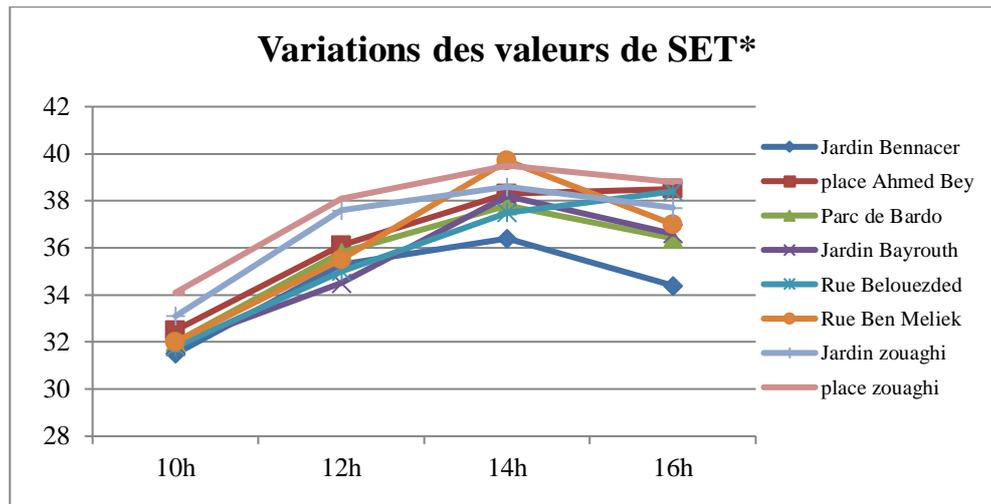
II-4-4-La température standard effective (SET*)

Le tableau 10 présente les valeurs de l'indice SET dans le corpus d'étude :

Tableau 10: valeurs de la température standard effective SET dans les espaces étudiés (Auteur, 2020).

SET(°C)	Bennacer	Ahmed	Bardo	Bayrouth	Belouezded	Ben Meliek	J.zouaghi	p.zouaghi
10h	31,5	32,5	32	31,9	31,8	32	33,1	34,1
12h	35,3	36,1	35,8	34,5	35	35,5	37,6	38,1
14h	36,4	38,3	37,8	38,2	37,5	39,7	38,6	39,5
16h	34,4	38,5	36,4	36,6	38,4	37	37,7	38,8

L'interprétation des résultats du tableau 10 énonce que les valeurs de l'indice SET* varient entre 31,5°C et 39,5°C. Les valeurs maximales ont été obtenues à 14h et 16h, alors que les valeurs minimales ont été obtenues à 10h du matin. Au jardin de Bennacer, nous avons remarqué que le stress thermique passe de modéré au fort durant la période de mesure dont le SET n'a pas dépassé 36,4°C. à la place de Ahmed Bey, le parc de Bardo, le jardin de Bayrouth, et les deux rues Belouezdad et Ben Meliek, le stress thermique passe de stress modéré au stress extrême passant par un stress fort dont le SET atteint 38,5°C. Alors qu'à la place de Zouaghi et le jardin de Zouaghi, le stress passe directement de stress thermique modéré au stress thermique extrême dont le SET atteint 39,5°C (Graphe 7).



Graph 7: variation de SET* dans le corpus d'étude durant les heures de mesure (Auteur, 2020).

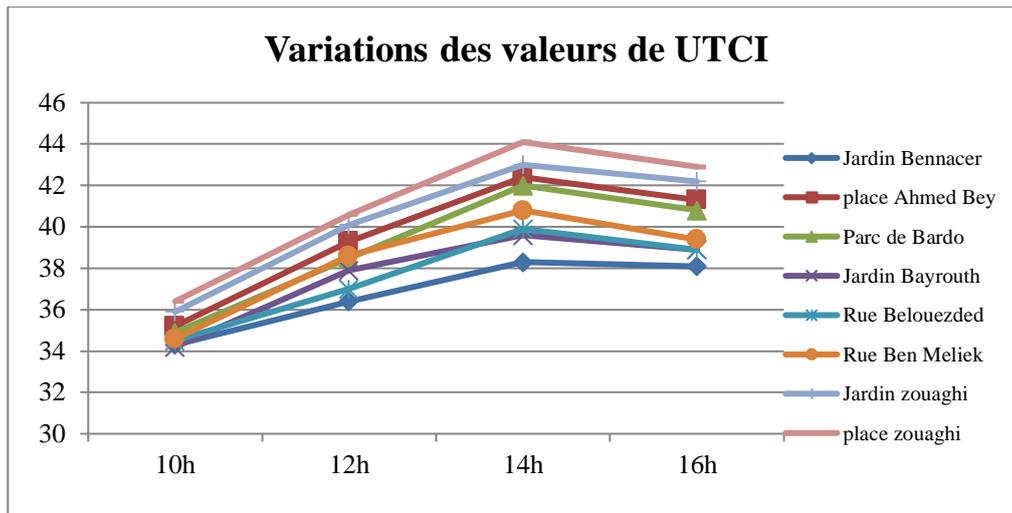
II-4-5-Indice thermique universel de climat (UTCI)

Le tableau 11 présente les valeurs de l'indice UTCI dans le corpus d'étude durant la période de mesure :

Tableau 11: valeurs de l'indice thermique universel de climat UTCI dans les espaces étudiés (Auteur, 2020).

UTCI	Bennacer	Ahmed	Bardo	Bayrouth	Belouezded	Ben Meliek	J.zouaghi	p.zouaghi
10h	34,3	35,2	34,9	34,2	34,5	34,6	35,9	36,4
12h	36,4	39,3	38,5	37,9	37	38,6	40,1	40,6
14h	38,3	42,4	42	39,6	39,9	40,8	43	44,1
16h	38,1	41,3	40,8	38,9	38,9	39,4	42,2	42,9

Les résultats présentés dans le Tableau 11 affirment que les valeurs de l'indice UTCI varient entre 34,2°C et 44,1°C. Par contre aux indices précédents, selon les résultats de l'indice UTCI nous avons remarqué que le stress thermique varie entre modéré et fort seulement, malgré les températures sont très élevées notamment après midi, l'analyse de cet indice montre que le stress dans les espaces étudiés ne dépasse pas le stress fort. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées dans la période matinale, alors que les valeurs les plus élevées ont été enregistrées à 14h et à 16h (Graph 8).



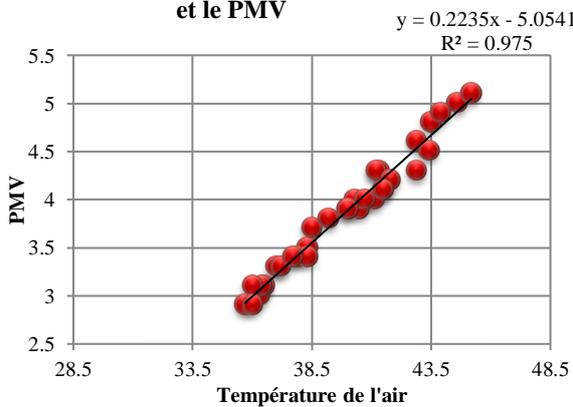
Graph 8 : variation de l'UTCI dans le corpus d'étude durant les heures de mesure (Auteur, 2020).

II-5-Corrélation entre les paramètres climatiques et les indices de confort thermique

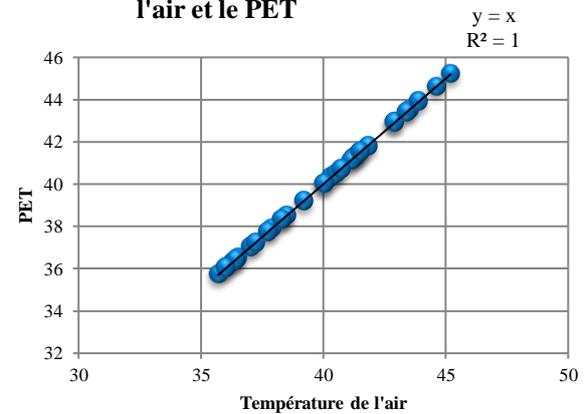
Cette étape vise à étudier la relation entre les données climatique mesurées et les indice de confort ainsi que la corrélation entre les indices eux-mêmes

II-5-1-Corrélation entre la température de l'air et les indices de confort thermique

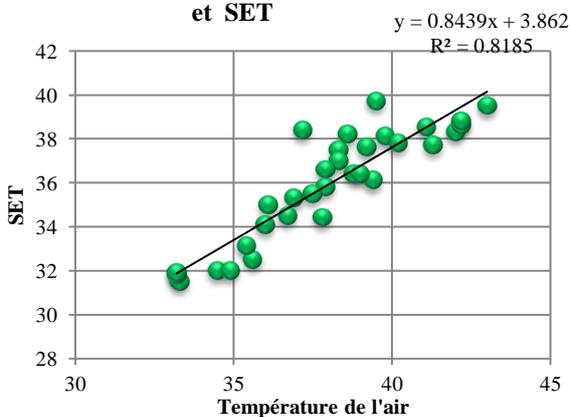
Corrélation entre la température de l'air et le PMV



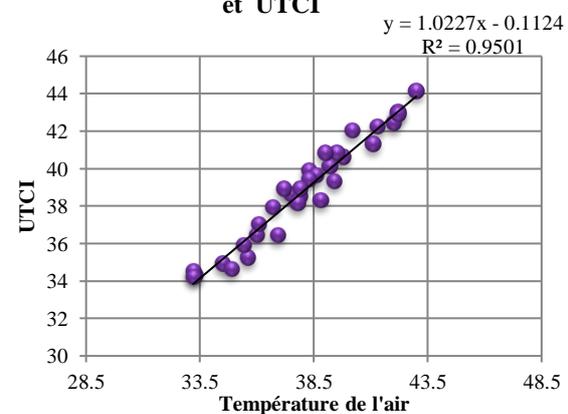
Corrélation entre la température de l'air et le PET



Corrélation entre la température de l'air et SET



Corrélation entre la température de l'air et UTCI

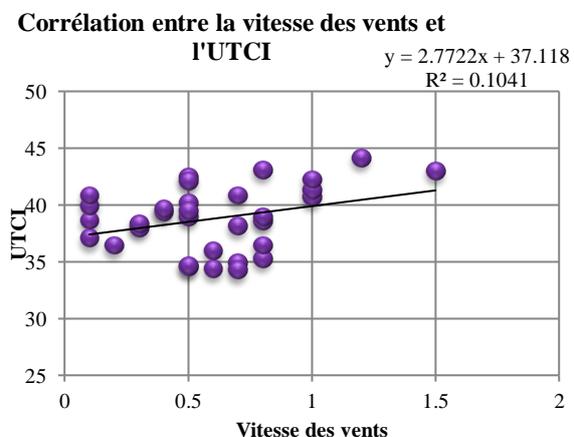
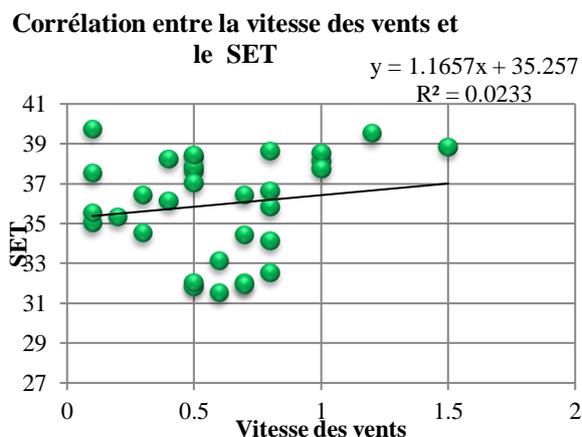
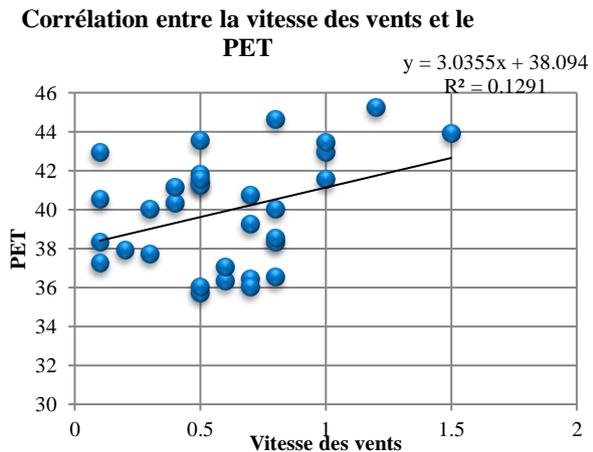
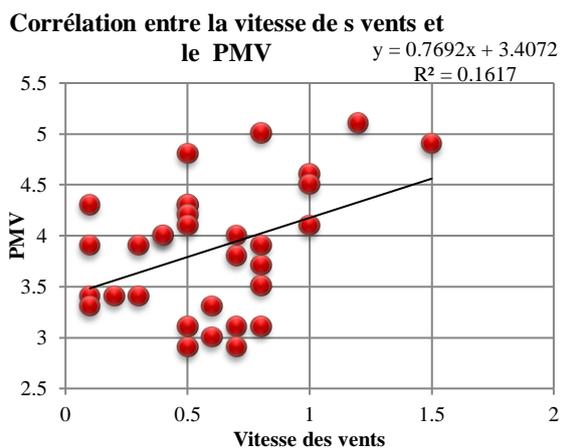


Graph 9 : Corrélation entre la température de l'air et le PMV, PET, SET et UTCI respectivement

Une relation positive très forte a été établie entre la température de l'air et les différents indices de confort thermique extérieur, nous avons obtenu une progression linéaire avec un coefficient de Pearson $R^2=0,975$ pour le PMV, $R^2= 1$ pour le PET, $R^2=0,818$ pour le SET et $R^2= 0,950$ pour l'UTCI. L'interprétation de ces résultats énonce que l'augmentation de la température de l'air engendre une augmentation des valeurs de PMV, PET, SET et UTCI et vice versa (Graphe 9).

II-5-2-Corrélation entre la vitesse des vents et les indices de confort thermique

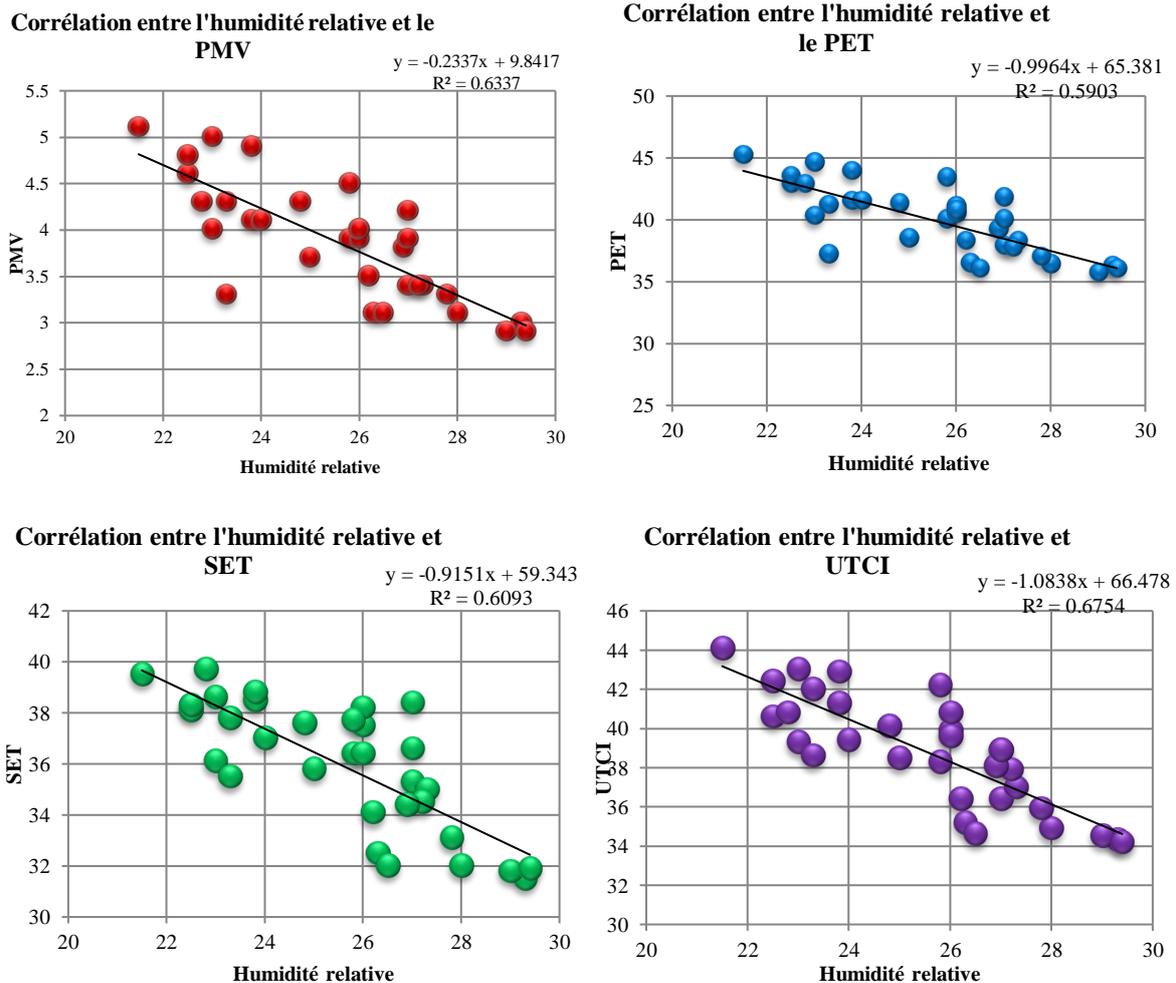
Une relation linéaire très faible a été établie entre la vitesse des vents et les indices de confort. Nous avons obtenu une progression linéaire avec un coefficient de Pearson $R^2=0,161$ pour le PMV, $R^2= 0,129$ pour le PET, $R^2=0,023$ pour le SET et $R^2= 0,104$ pour l'UTCI. L'interprétation de ces résultats énonce que la vitesse des vents a un impact très faible sur les indice de confort, et son augmentation peut causer une faible augmentation des valeurs de ces indices.



Graphe 10 : Corrélation entre la vitesse des vents et le PMV, PET, SET et UTCI respectivement

II-5-3-Corrélation entre l'humidité relative et les indices de confort thermique

Une relation négative très forte a été établie entre l'humidité relative et les différents indices de confort thermique extérieur, nous avons obtenu une régression linéaire avec un coefficient de Pearson $R^2 = -0,633$ pour le PMV, $R^2 = -0,590$ pour le PET, $R^2 = -0,609$ pour le SET et $R^2 = -0,675$ pour l'UTCI. L'interprétation de ces résultats énonce que l'augmentation de l'humidité relative engendre une diminution des valeurs de PMV, PET, SET et UTCI et vice versa (Graphe 11).

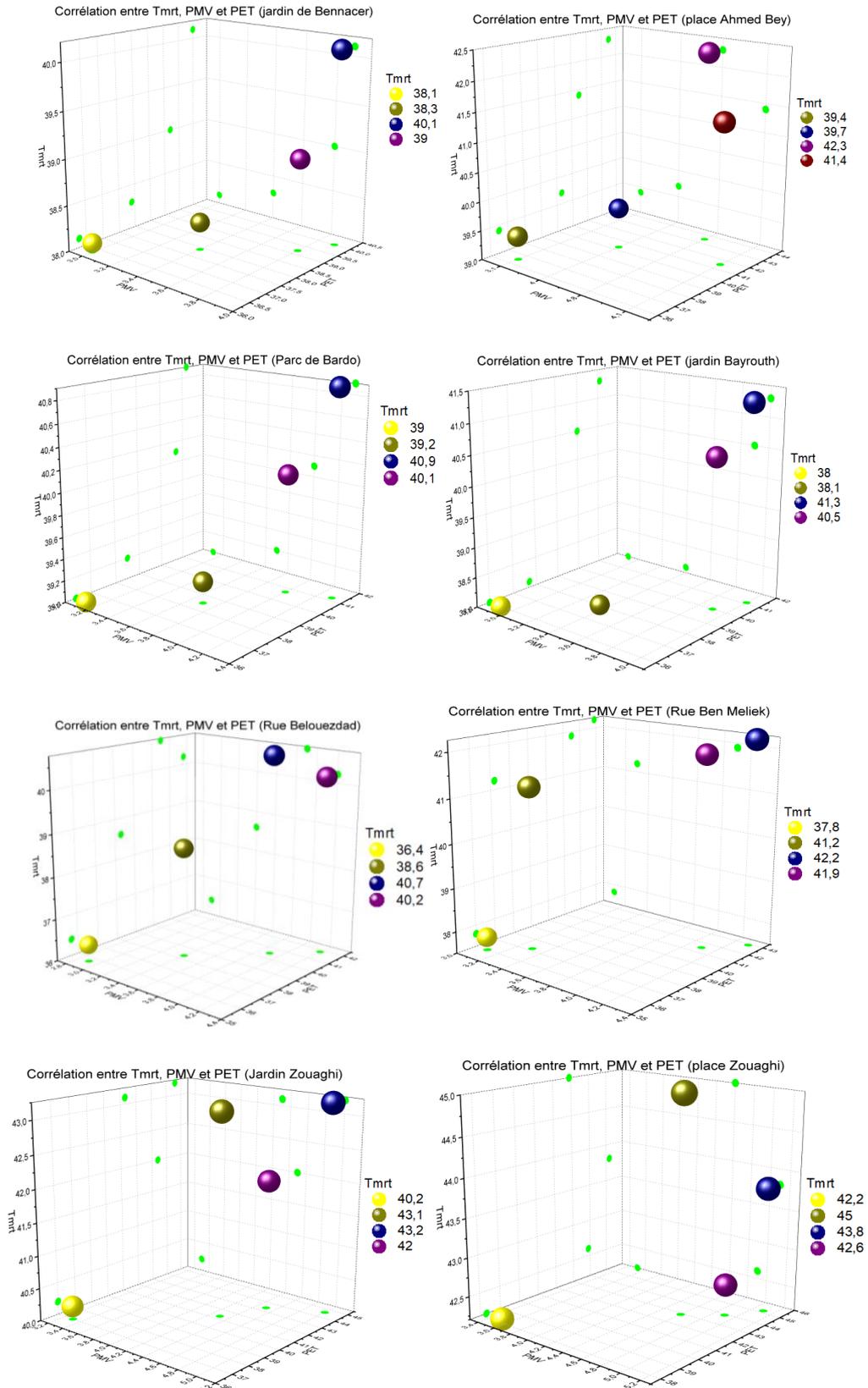


Graphe 11 : Corrélation entre l'humidité relative et le PMV, PET, SET et UTCI respectivement (Auteur, 2020).

II-5-4-Corrélation entre la température moyenne radiante et les indices de confort thermique

L'interprétation des résultats de la corrélation entre la température moyenne radiante et les indices de confort (dans ce cas le PMV et le PET) affirment qu'une relation positive forte a été établie entre ces indices, l'augmentation de la température moyenne radiante résulte l'augmentation des valeurs des autres indices et vice versa (Graphe 12)

Chapitre 4 : Evaluation de confort thermique dans les espaces extérieurs de la ville de Constantine



Graphe 12 : Corrélation entre la température moyenne radiante et les indices de confort dans les espaces publics analysés (Auteur, 2020).

III-Analyse et interprétation de données collectées par le questionnaire

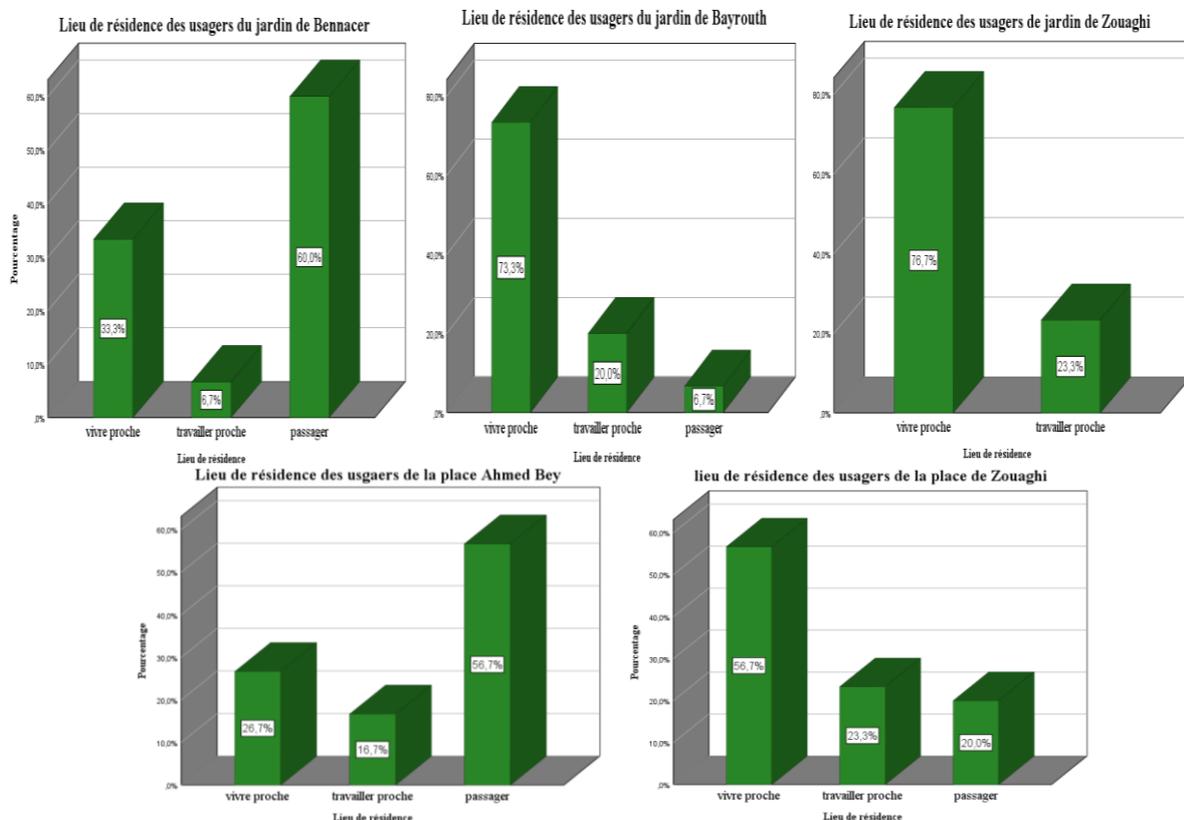
La perception thermique est examinée à travers le questionnaire qui a eu lieu à la fin de la mesure entre 10h et 12h. Le questionnaire couvre les questions liées aux vêtements, aux activités métaboliques liées à la posture, au motif de la fréquentation, à l'intensité et à la durée de fréquence. Ainsi qu'à l'évaluation de l'environnement thermique au moment de la mesure. On a demandé aux usagers de rapporter leurs sensations de l'environnement thermique en utilisant l'échelle ASHRAE à 7 points. Cette sensation thermique exprime l'appréciation du confort général en allant du très inconfortable (Très froid) au très inconfortable (très chaud) avec confortable au milieu (Annexe 4).

III-1-L'analyse Uni-variée

III-1-1-informations générales des utilisateurs interrogés

L'étude de graphes obtenus par l'analyse des données collectées par le biais de questionnaire (Voir annexe 4) montre qu'une population très variée fréquente les espace publics sélectionnés. Des femmes et des hommes de différentes catégories d'âge, poids et tailles, utilisent l'espace public chaque jour d'une manière différente, ce qui montre que ces espaces sont ouverts pour tout le monde et à tout moment.

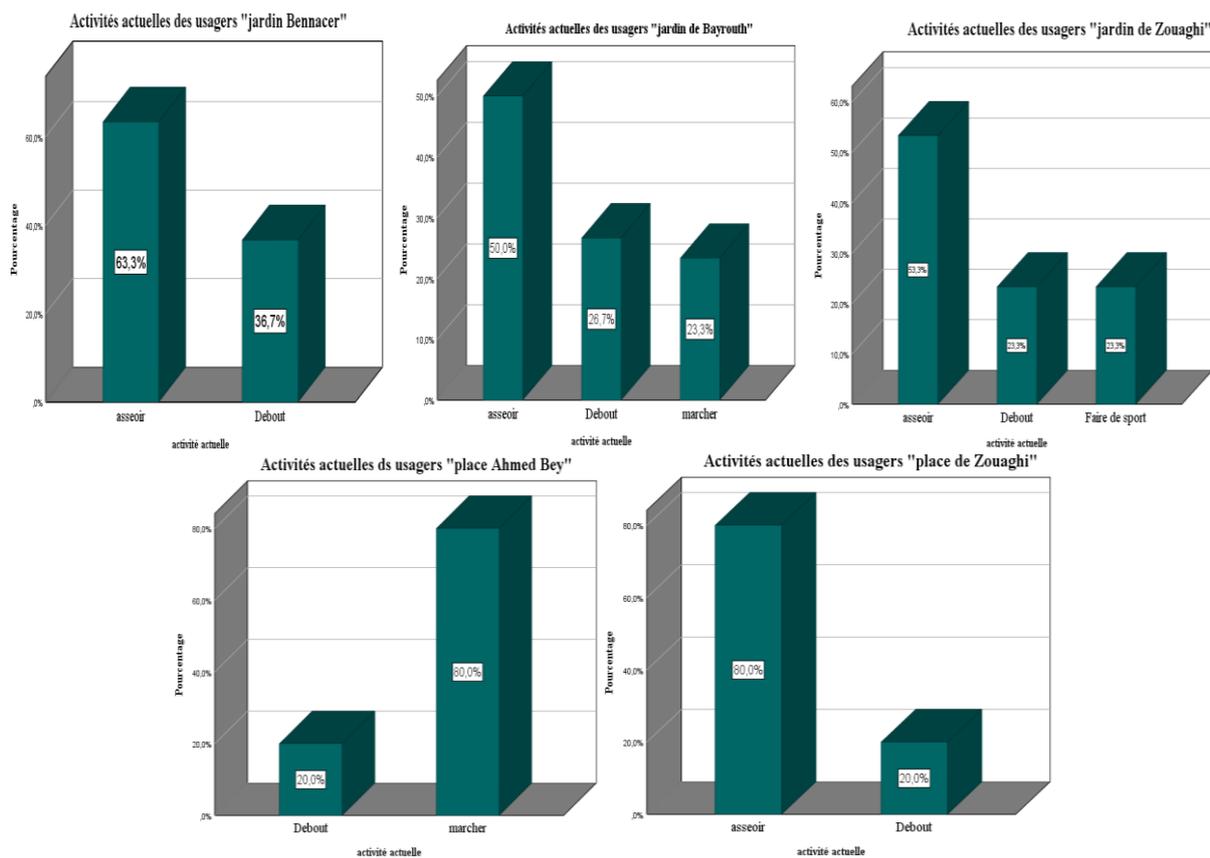
III-1-2-Lieu de résidence par rapport à l'espace public



Graph 13: Lieu de résidence des usagers du jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

- L'analyse de Graphe 13 montre que la majorité (60%) des usagers qui fréquentent le jardin de Bennacer sont des étrangers et des passagers qui habitent loin, ils utilisent le jardin souvent pour reposer au bien pour rencontrer ses amis, (33,3%) sont des usagers qui habitent proche, alors que 6,7% sont ceux qui travaillent dans des administrations proche de jardin.
- On constate ainsi que (73.3%) des usagers du jardin de Bayrouth habitent proche, (20%) travaille proche de jardin, alors que (6,7%) sont des étrangers.
- (76.37%) des usagers interrogés au jardin de Zouaghi répondent qu'ils habitent dans les cités voisines, alors que 23.73% sont ceux qui travaillent proche de jardin.
- A la place de Ahmed Bey, (56,7%) sont des passagers alors que (26.7) habitent proche.
- Pour la place de Zouaghi (56.7%) des usagers interrogés habitent proche alors que (20%) sont des étrangers.

III-1-3-Activités actuelles des usagers interrogés



Graphe 14: les activités actuelles des usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

De l'analyse de Graphe 14, on constate que :

- (63.3%) des usagers du jardin de Bennacer étaient assis pendant la dernière demi-heure avant le questionnaire, alors que (33.7%) étaient debout.

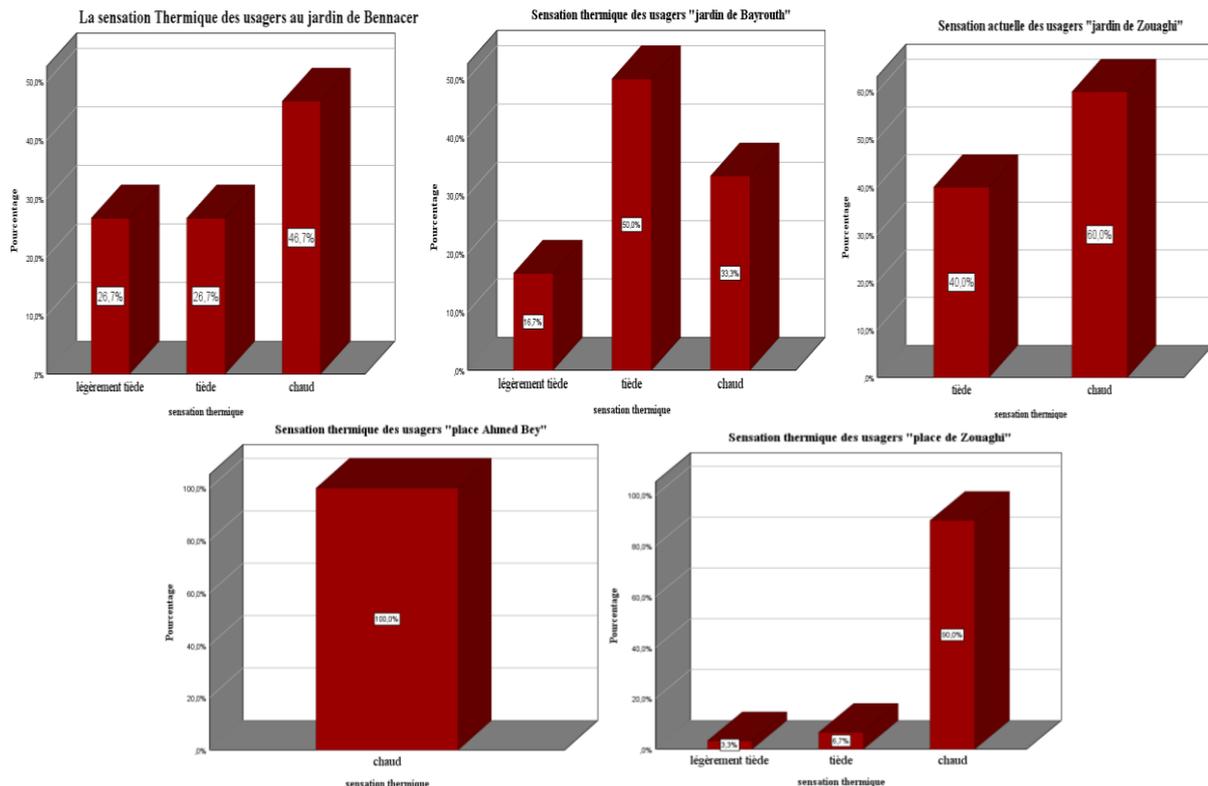
-(50%) des usagers du jardin de Bayrouth étaient assis, (26.7%) étaient debout, alors que (23.3%) étaient en marche.

-(53.3%) des usagers du jardin de Zouaghi étaient assis, (23.3%) étaient debout, alors que (23.3%) étaient en marche.

-(20%) des usagers de la place Ahmed Bey étaient debout, alors que (80%) étaient en marche.

-(80%) des usagers de la place de Zouaghi étaient assis, (20 %) étaient debout.

III-1-4-La sensation thermique des usagers interrogés



Graphe 15: la sensation thermique des usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d’Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

A travers cette question, nous allons analyser la variance de la sensation thermique chez les utilisateurs en différentes positions, pour voir l’influence de l’activité, le poids, la taille et l’habillement sur cette sensation. De l’analyse de Graphe 15, on constate que :

-(46,7%) des usagers du jardin de Bennacer perçoivent l’environnement thermique chaud, (26,7%) le perçoivent tiède et (26,7%) se sentent légèrement tiède.

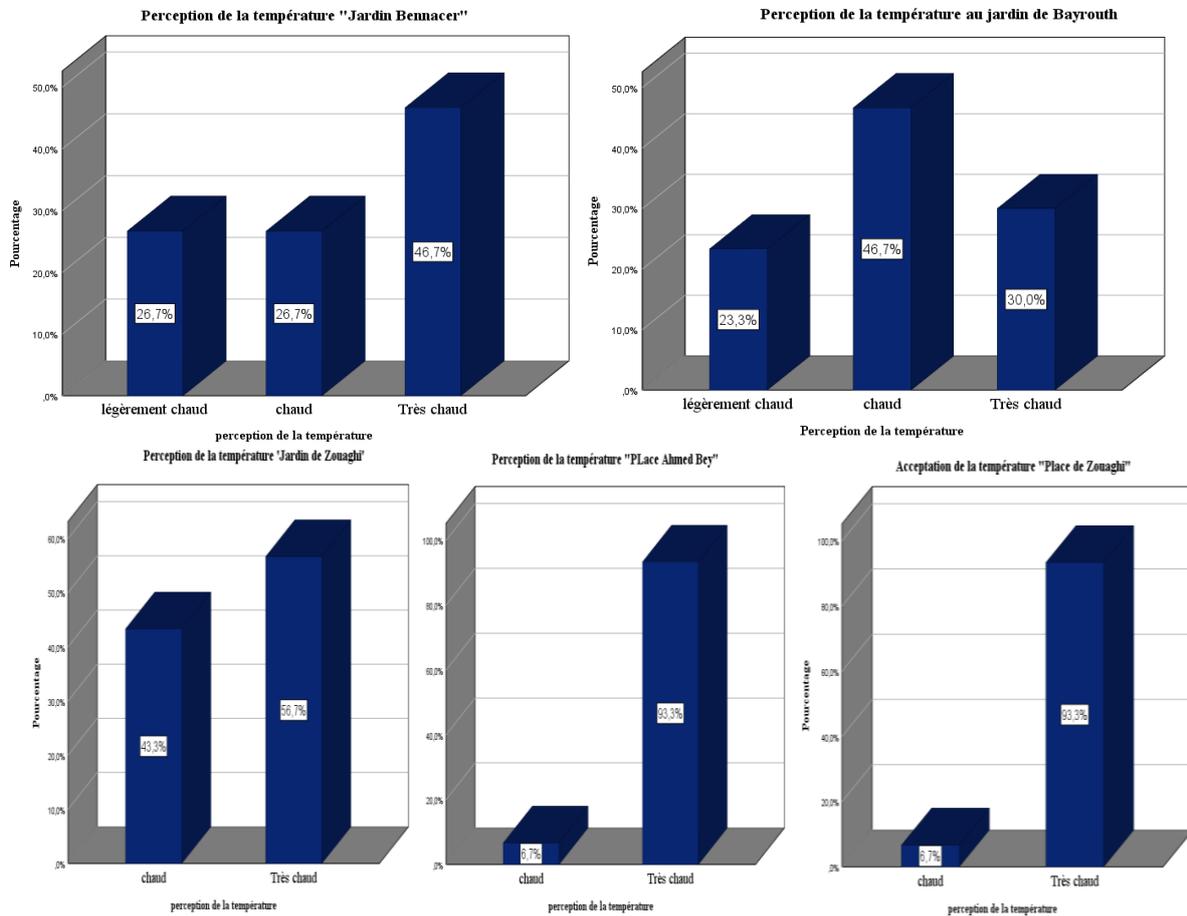
-(33,3%) des usagers du jardin de Bayrouth perçoivent l’environnement thermique chaud, (50%) le perçoivent tiède et (16,7%) le perçoivent légèrement tiède.

-(60%) des usagers du jardin de Zouaghi perçoivent l’environnement thermique chaud, alors que (40%) le perçoivent tiède.

-(100%) des usagers de la place Ahmed Bey perçoivent l’environnement thermique chaud.

-(90%) des usagers de la place de Zouaghi perçoivent l'environnement thermique chaud, alors que (6.7%) le perçoivent tiède, alors que (3.3%) le perçoivent légèrement tiède.

III-5-Perception de la température



Graph 16 : Perception de la température par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

De l'analyse de Graph 16 on constate que :

-(46.7%) des utilisateurs du jardin Bennacer perçoivent la température très chaude, (26.7%) la perçoivent chaude, tandis que (26.7%) la perçoivent légèrement chaude.

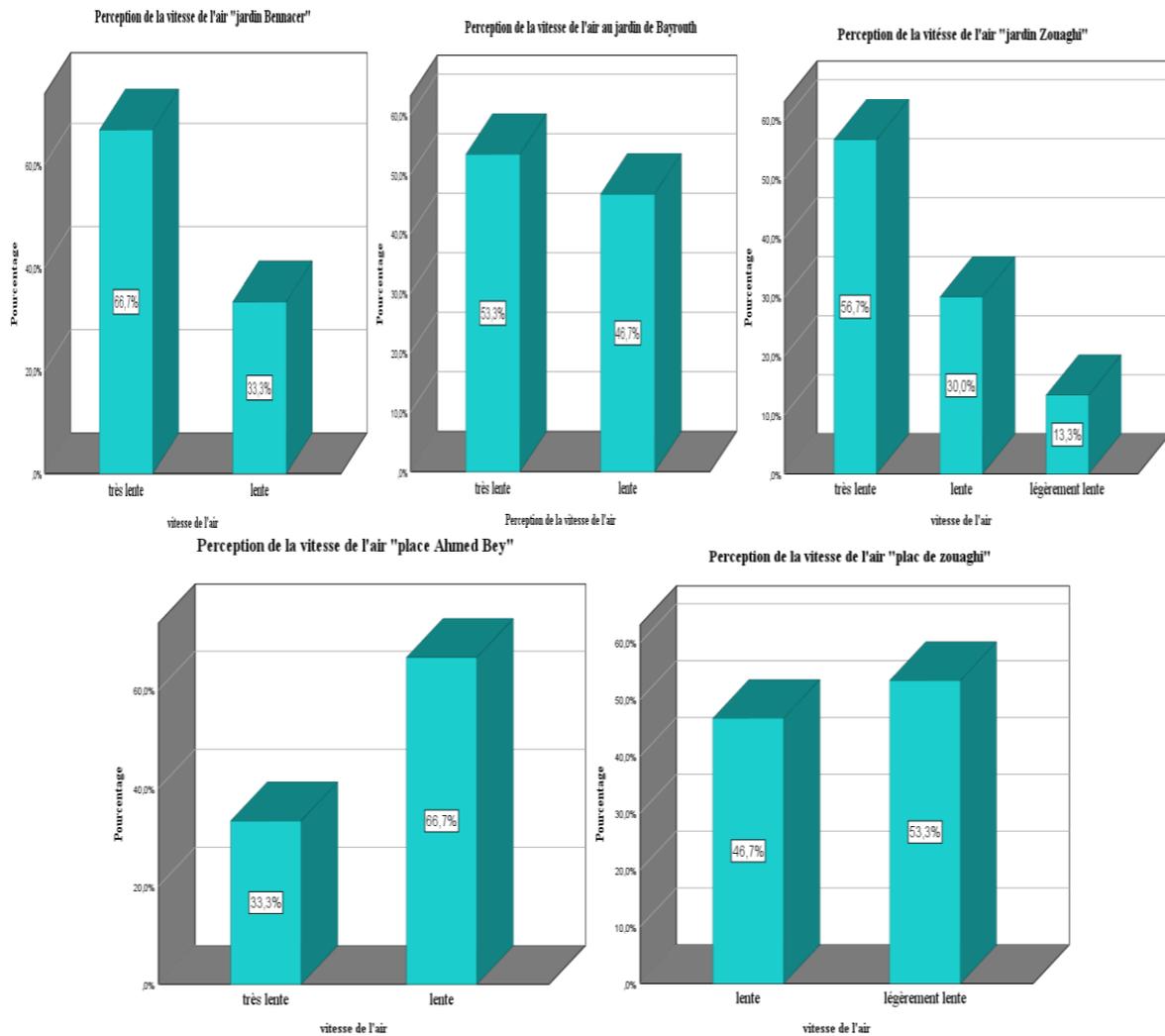
-(30%) des utilisateurs du jardin Bayrouth perçoivent la température très chaude, (46.7%) la perçoivent chaude, tandis que (23.3%) la perçoivent légèrement chaude.

-(56.7%) des utilisateurs du jardin de Zouaghi perçoivent la température très chaude, (43.3%) la perçoivent chaude.

-(93.3%) des utilisateurs de la place Ahmed Bey perçoivent la température très chaude, alors que (6.7%) la perçoivent chaude.

-(93.3%) des utilisateurs de la place de Zouaghi perçoivent la température très chaude, (6.7%) la perçoivent chaude.

III-6-Perception de la vitesse de l'air

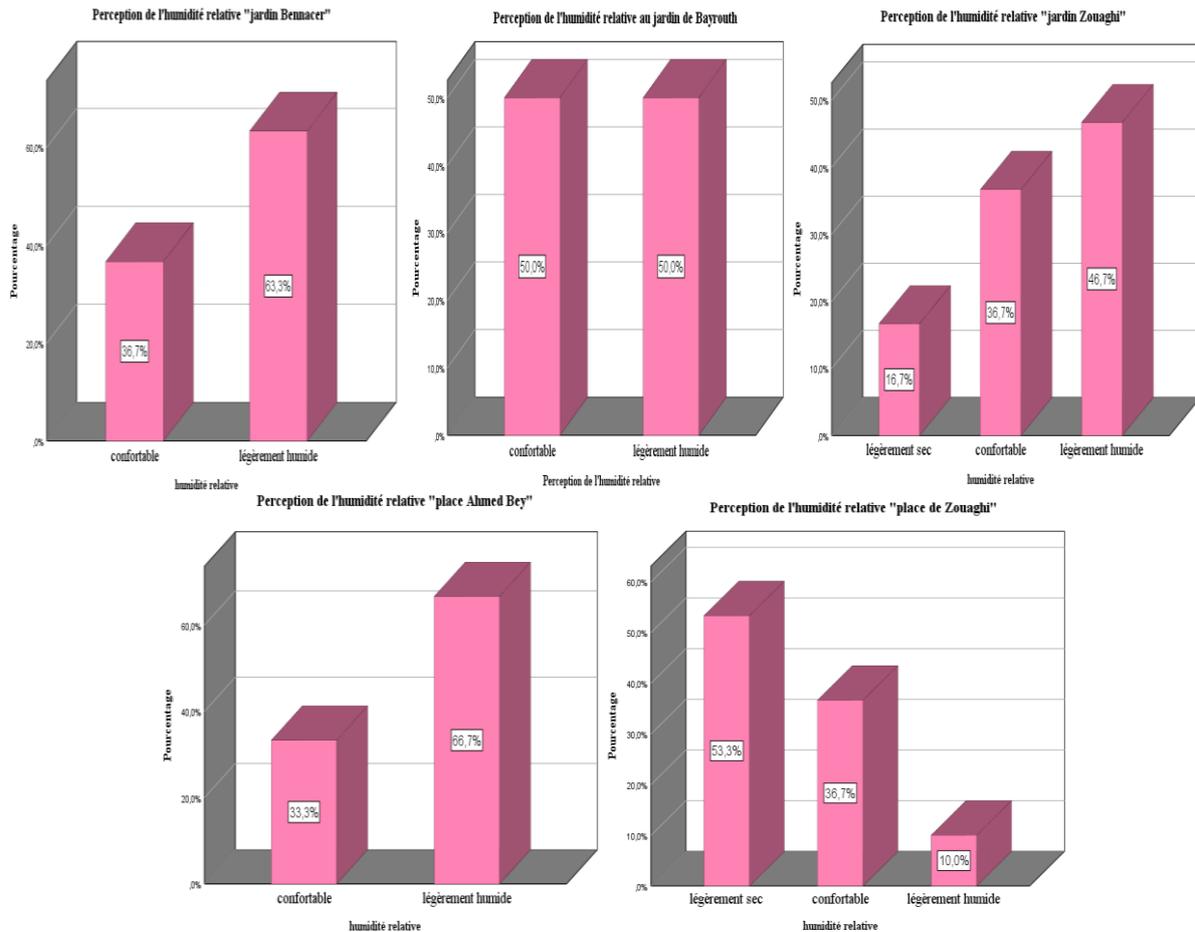


Graph 17: Perception de la vitesse de l'air par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

De l'analyse de Graph 17, on constate que :

- (66.7%) des usagers du jardin de Bennacer perçoivent la vitesse des vents au jardin très lente, alors que (33.3%) la perçoivent lente.
- Au jardin de Bayrouth, (53.3%) des usagers perçoivent la vitesse des vents très lente, quand à ceux qui la perçoivent lente, le pourcentage est (46.7%).
- Au jardin de Zouaghi, les usagers possèdent des avis différents, (13.3%) des usagers perçoivent la vitesse légèrement lente, 30% la perçoivent lente et 56.7% la perçoivent très lente.
- A la place Ahmed Bey, 66,7% répondent que la vitesse est lente.

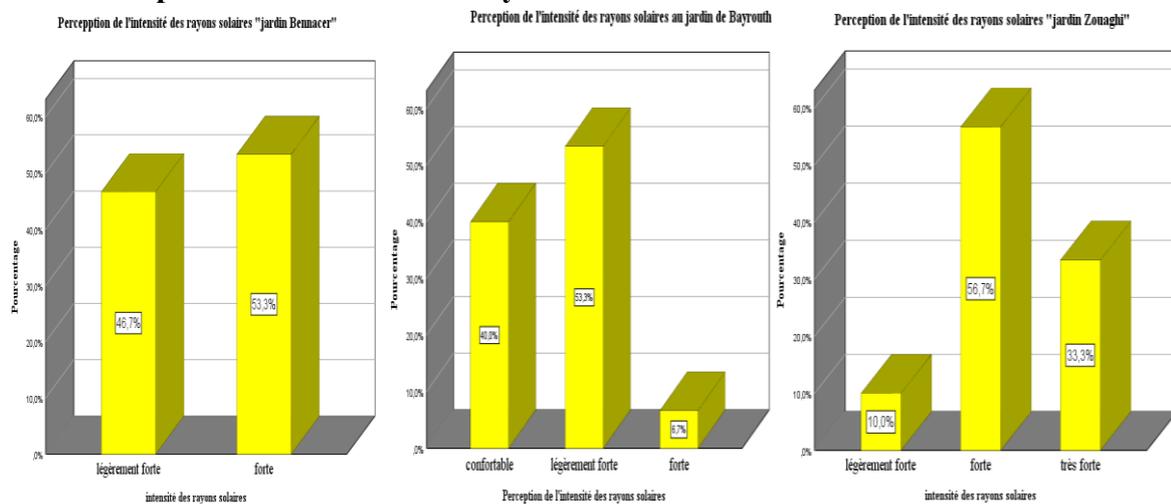
III-7-Perception de l'humidité relative

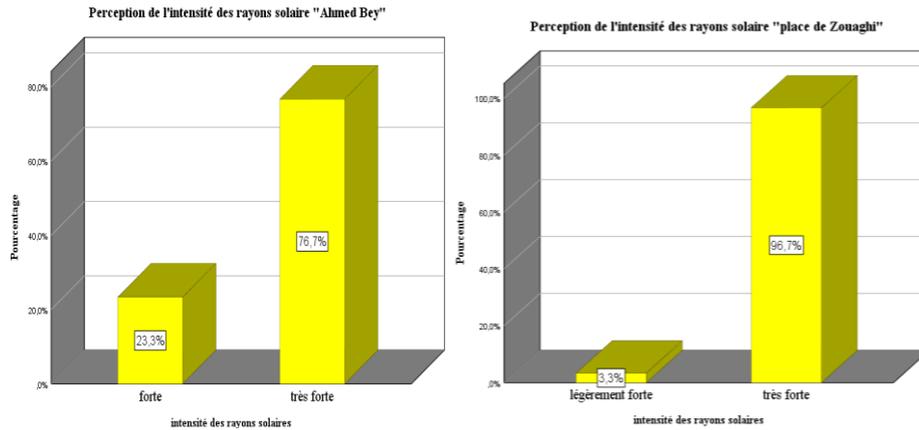


Graphe 18: Perception de l'humidité relative par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

La perception des usagers concernant l'humidité relative dans les différents espaces étudiés varie entre légèrement sec, confortable et légèrement humide, au jardin de Bennacer (53.3%) trouvent le climat légèrement humide, au jardin de Bayrouth les avis sont équitables entre ceux qui le trouve confortable et légèrement humide. Tandis que à la place de Zouaghi (53.3%) trouvent le climat légèrement sec (Graphe 18).

III-8-Perception de l'intensité des rayons solaires

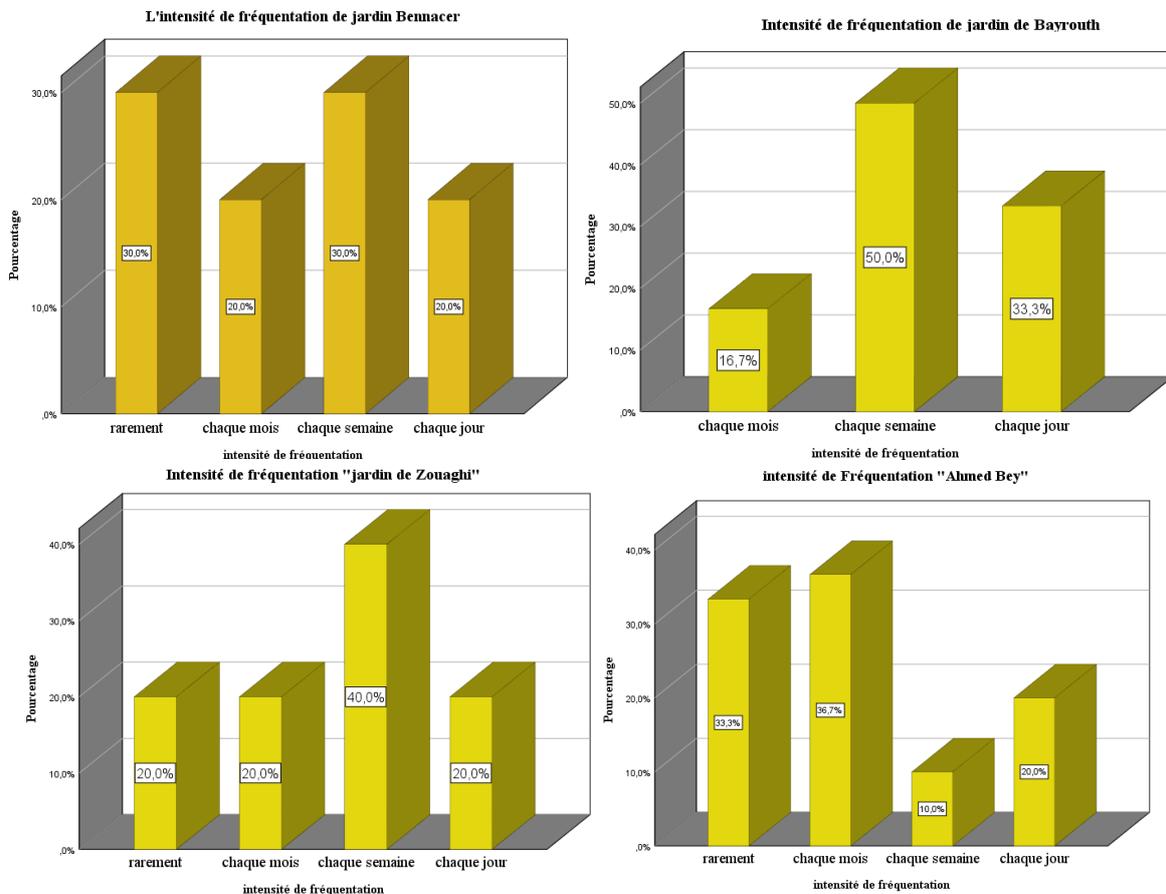




Graph 19: Perception de l'humidité relative par les usagers au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

L'analyse de Graph 19 montre que l'intensité des rayons solaires est un peu forte dans les différents espaces, la différence réside dans la densité de l'espace vert existant qui fait la différence, (46,7%) des usagers au jardin de Bennacer répondent par légèrement forte, (40%) au jardin de Bayrouth, la trouve confortable, alors que (76,7%) à la place Ahmed Bey la trouve très forte.

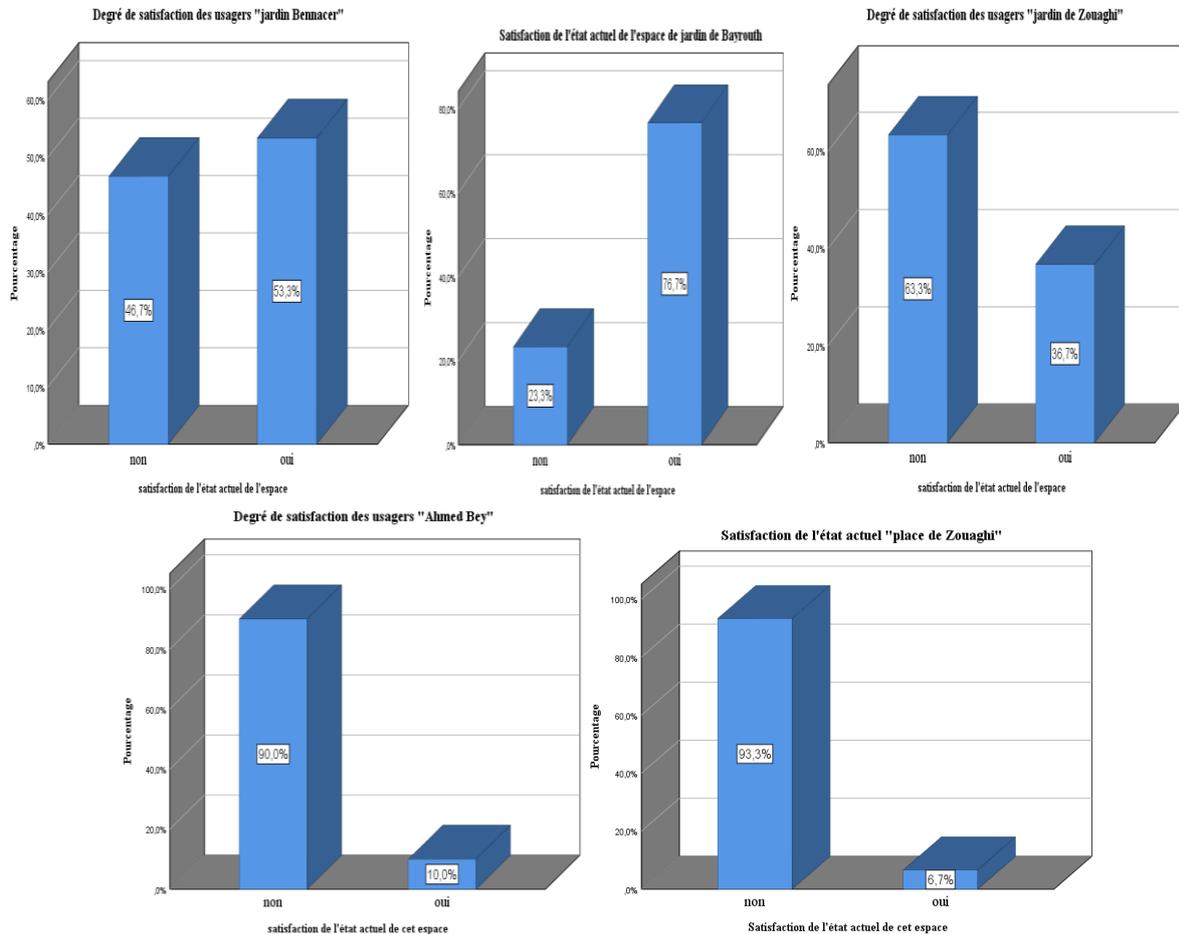
III-9-intensité de fréquentation de l'espace



Graph 20: intensité de fréquentation des espaces (jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

L'analyse de Graphe 20 montre une différence entre les taux de fréquentation, les espaces sont bien accessibles au gens, l'intensité de fréquentation dépend souvent de lieu de résidence de la plupart des usagers. Les espaces publics qui se situent dans des cités résidentielles (jardin de Bayrouth et de Zouaghi) sont mieux utilisés par les habitants.

III-10-Degré de satisfaction des usagers

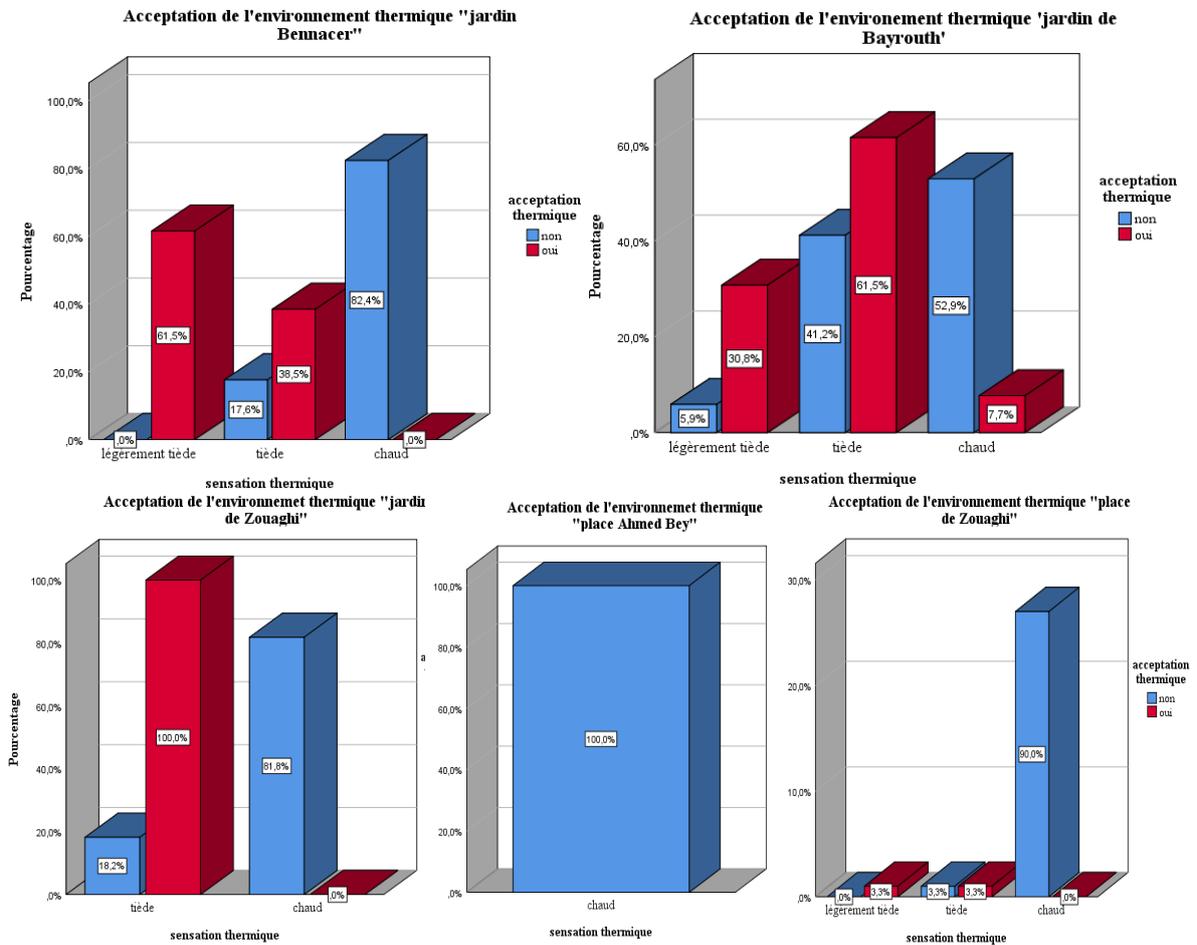


Graphe 21: degré de satisfaction des usagers (jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement) (Auteur, 2020).

La qualité de l'espace fréquenté, sa morphologie, sa situation, le confort (thermique, visuel...etc.) et la sécurité qu'il offre aux usagers sont des critères qui contribuent à améliorer la qualité d'usage de l'espace. Le degré de satisfaction des usagers dépend fortement de ces critères. Dans notre cas d'étude, l'analyse de ce Graphe 21 montre qu'un taux de satisfaction élevé a été enregistré aux deux jardins (Bennacer par 53.3% et Bayrouth par 76.7%) tandis qu'un taux d'insatisfaction élevé a été enregistré au jardin de Zouaghi par (63.3%), à la place Ahmed Bey par (90%) et la place de Zouaghi par (93.3%).

III-2-L'analyse Bi-variée

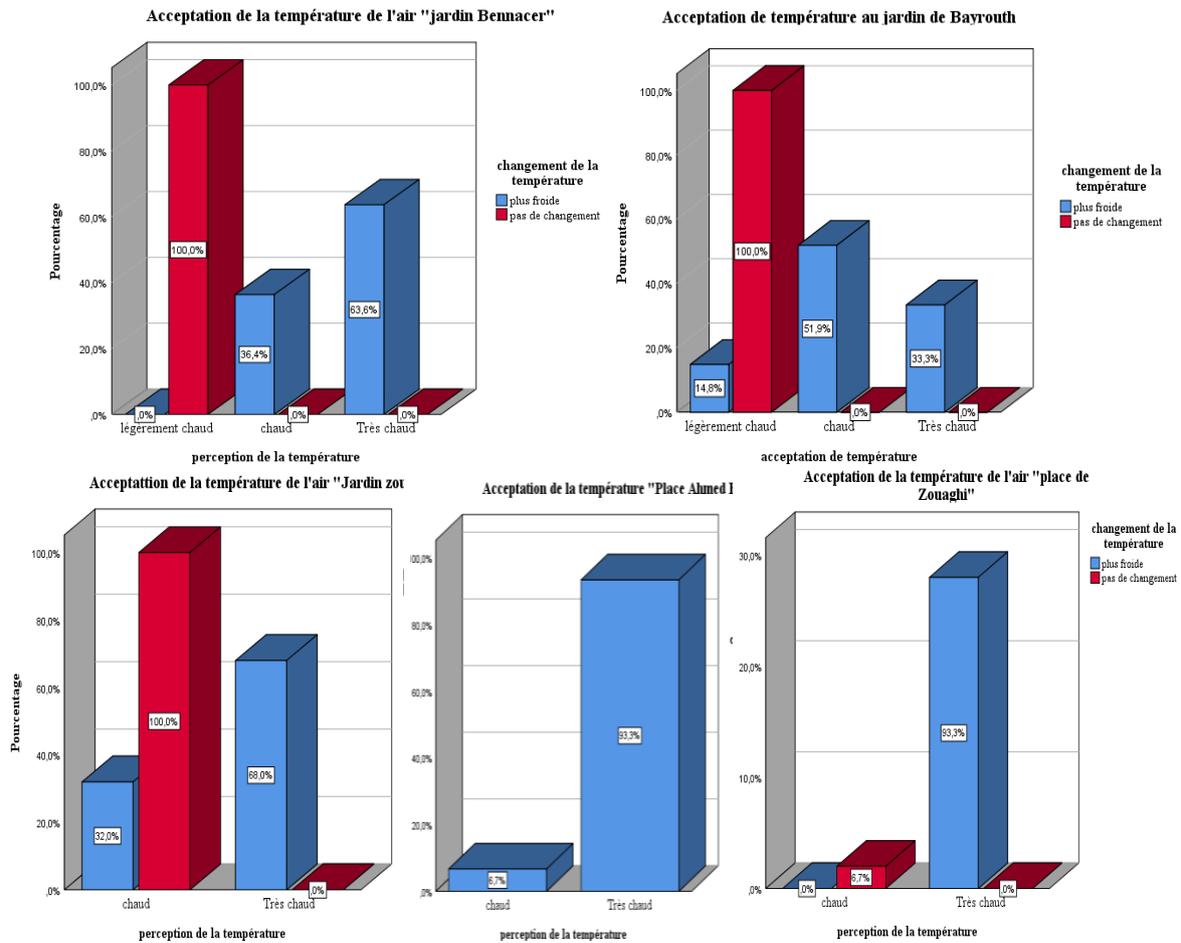
III-2-1-L'acceptation de l'environnement thermique par les usagers



Graphe 22: variables croisées « la sensation thermique et l'acceptation de l'environnement thermique » jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

L'acceptation de l'environnement thermique par les usagers de l'espace extérieur dépend largement de leur sensation thermique. Notre étude montre que plus de 90% des usagers de tous les espaces étudiés qui perçoivent l'environnement thermique chaud préfèrent le changement de cette sensation. Quand aux usagers qu'ils le perçoivent tiède, une différence a été enregistré entre ceux qui répondent par non et préfèrent le changement de la sensation thermique et ceux qu'ils l'acceptent et peuvent résister mieux que les autres. Finalement un taux élevé d'acceptation a été enregistré chez ceux qui perçoivent l'environnement thermique légèrement tiède (Graphe 22).

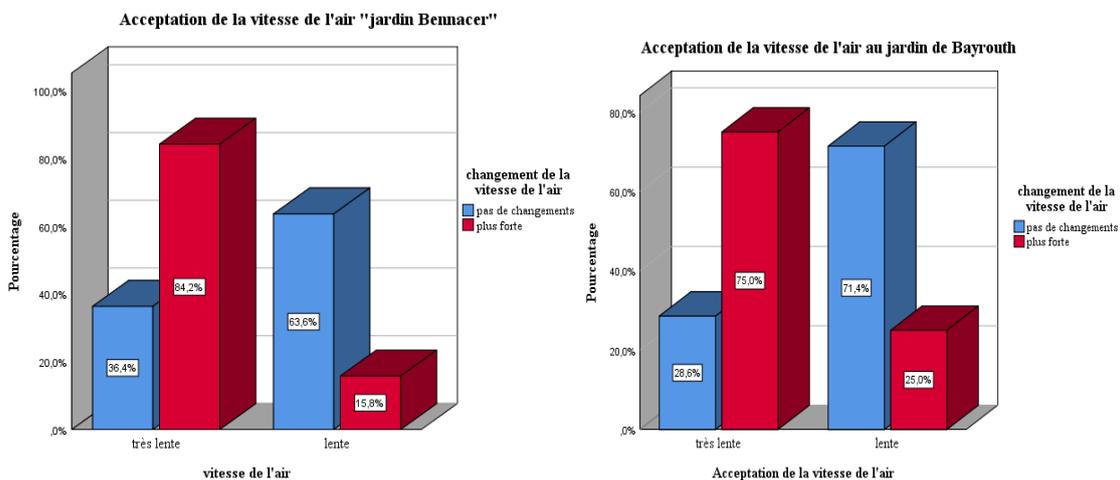
III-2-2- l'acceptation de la température de l'air

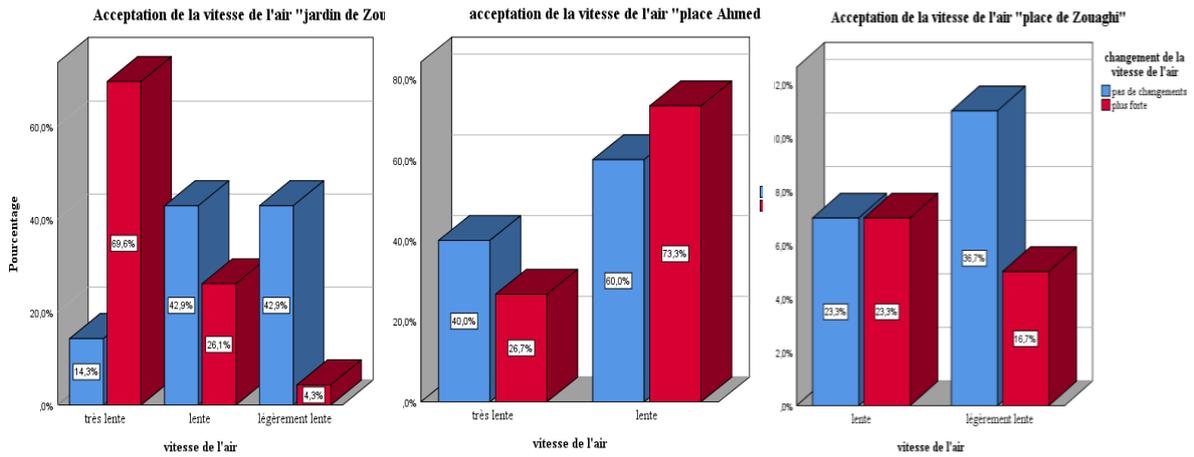


Graphe 23: variables croisées « perception de la température et le changement de la température » jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

Le croisement de ces deux variables (la perception de la température et son changement) montre que 100% des usagers qui fréquentent ces espaces et se sentent très chaud, préfèrent le changement de la température de l'air, alors qu'un taux d'acceptation a été enregistré chez ceux qui se sentent légèrement chaud (Graphe 23).

III-2-3- l'acceptation de la Vitesse de l'air

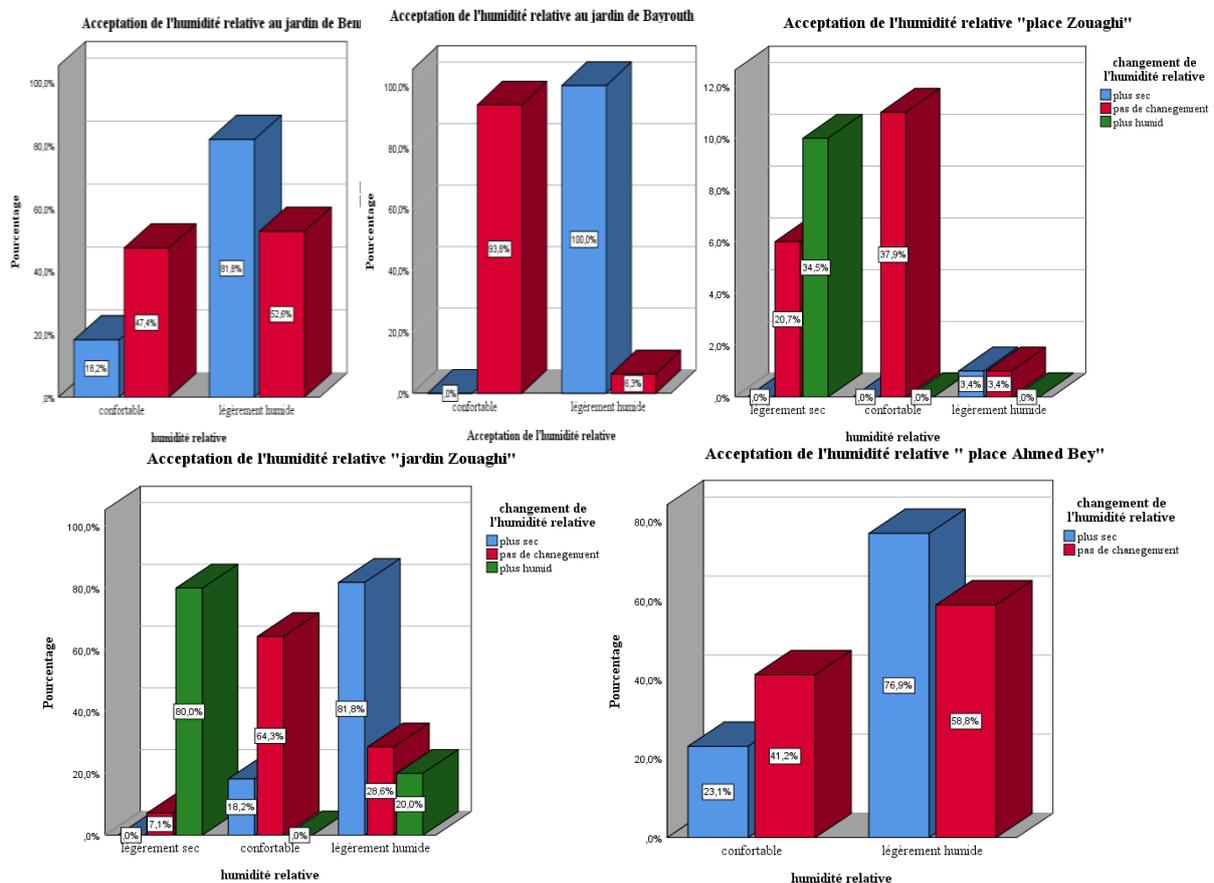




Graph 24: variables croisées « la perception de la vitesse de l'air et l'acceptation de la vitesse de l'air » jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

Les jours de prises de mesures sont des jours non ventés, la majorité des usagers trouvent la vitesse des vents lente ou bien très lente. L'investigation de leurs points de vue concernant l'acceptation de cette vitesse montre qu'un taux important de ceux qui la trouve très lente préfère qu'elle soit plus forte, alors qu'un taux élevé aussi de ceux qui la trouve lente accepte cette vitesse (Graph 24).

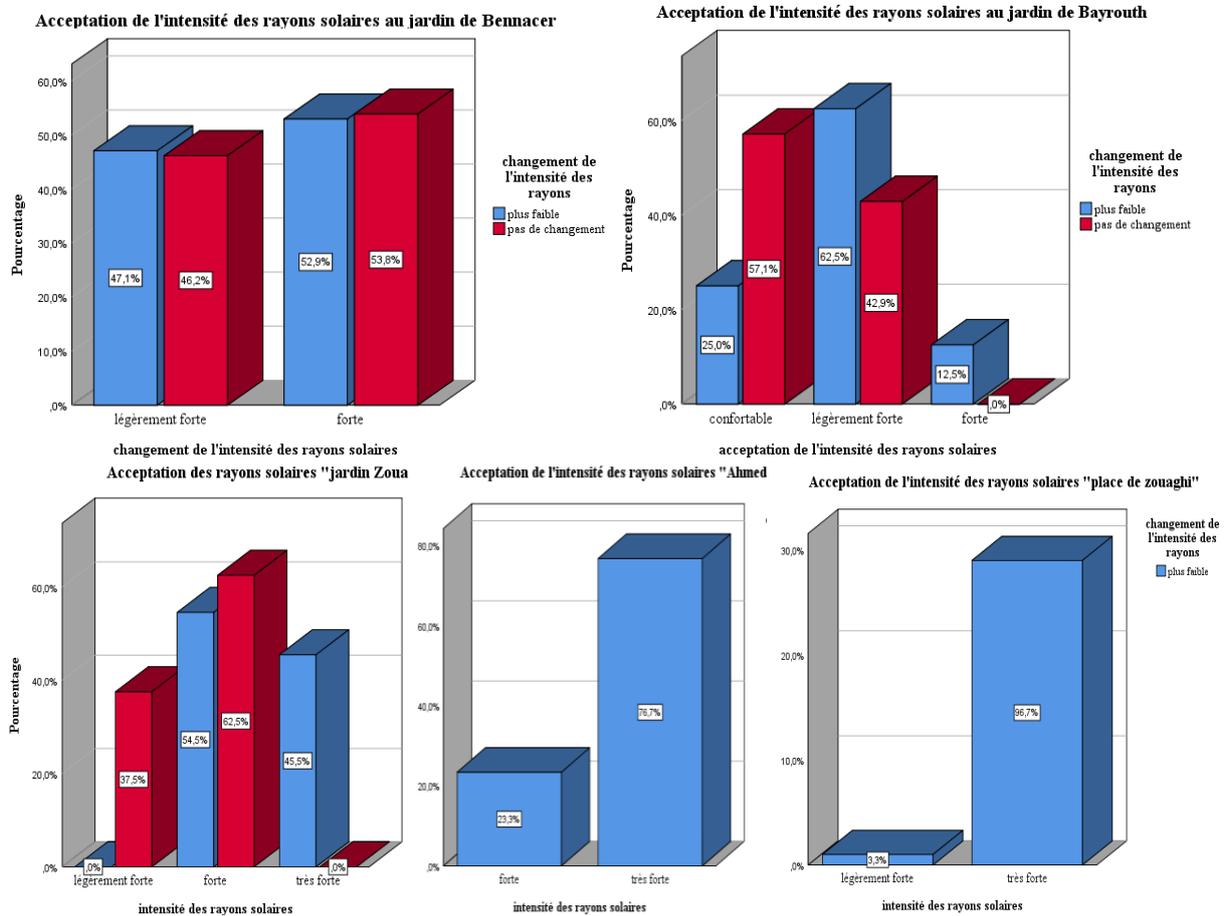
III-2-4- l'acceptation de l'humidité relative



Graph 25: variables croisées « la perception de l'humidité et l'acceptation de l'humidité » au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

L'humidité relative est un paramètre de climat qui peut influencer la sensation thermique des usagers l'analyse de la perception de ce paramètres et son acceptation révèle que la majorité des usagers qui trouvent le climat légèrement humide préfèrent qu'il soit plus sec un taux aussi important de ceux qui se sentent à l'aise et accepte le taux d'humidité (Graphe 25).

III-2-5- l'acceptation de l'intensité des rayons solaires

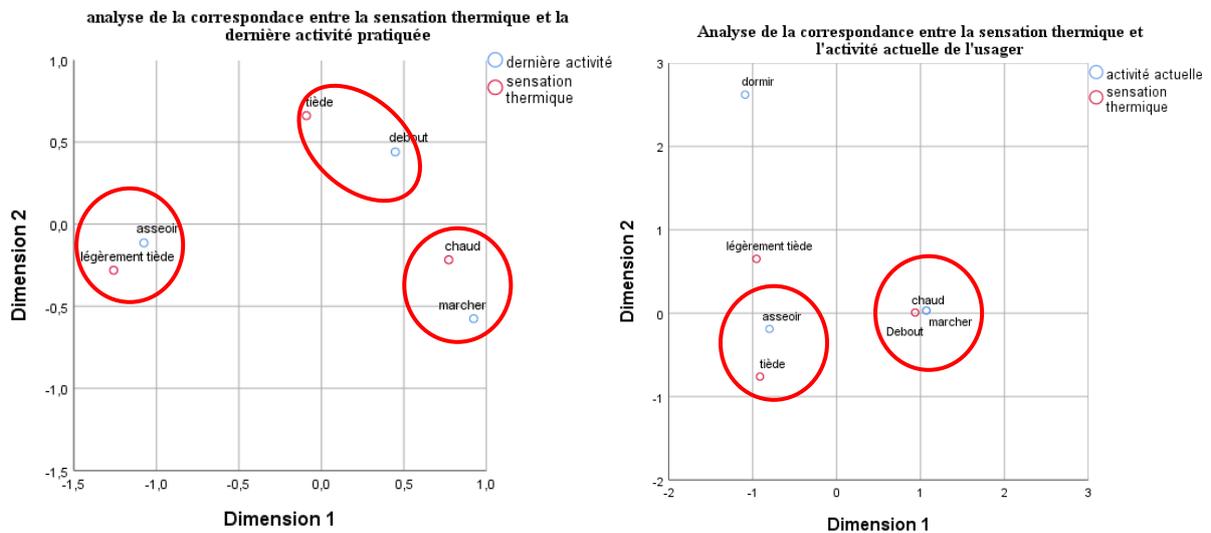


Graphe 26: variables croisées « la perception de l'intensité des rayons solaires et l'acceptation de l'intensité» au jardin Bennacer, Bayrouth, Zouaghi, place d'Ahmed Bey et place de Zouaghi respectivement (Auteur, 2020).

L'analyse de l'intensité des rayons solaires dans notre corpus montre que les espaces sont exposés à une grande intensité des rayons solaire. Le croisement de ces deux variables révèle que 100% des usagers des deux places (Ahmed Bey et Zouaghi) n'acceptent pas cette intensité. Tandis que les usagers des jardins qui trouvent l'intensité légèrement forte présentent deux avis différents, 54% préfèrent que cette intensité soit moins forte (Graphe 26).

III-3-1'analyse des correspondances

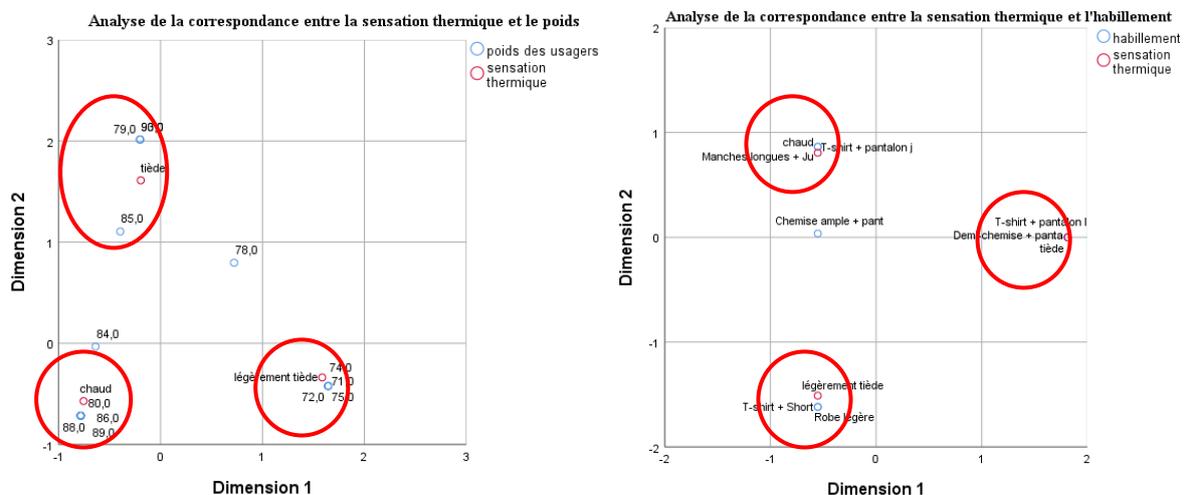
III-3-1-Jardin Bachir Bennacer



Graphe 27: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle au jardin de Bennacer (Auteur, 2020).

-L'analyse de la correspondance entre la sensation thermique et la dernière activité pratiquée par les usagers du jardin de Bennacer montre qu'une forte correspondance a été enregistrée entre ces deux variables, les usagers qui étaient assis pendant la dernière demi-heure se sentent légèrement tiède, ceux qui étaient debout se sentent tiède par contre ceux qui étaient en marche se sentent chaud (Graphe 27).

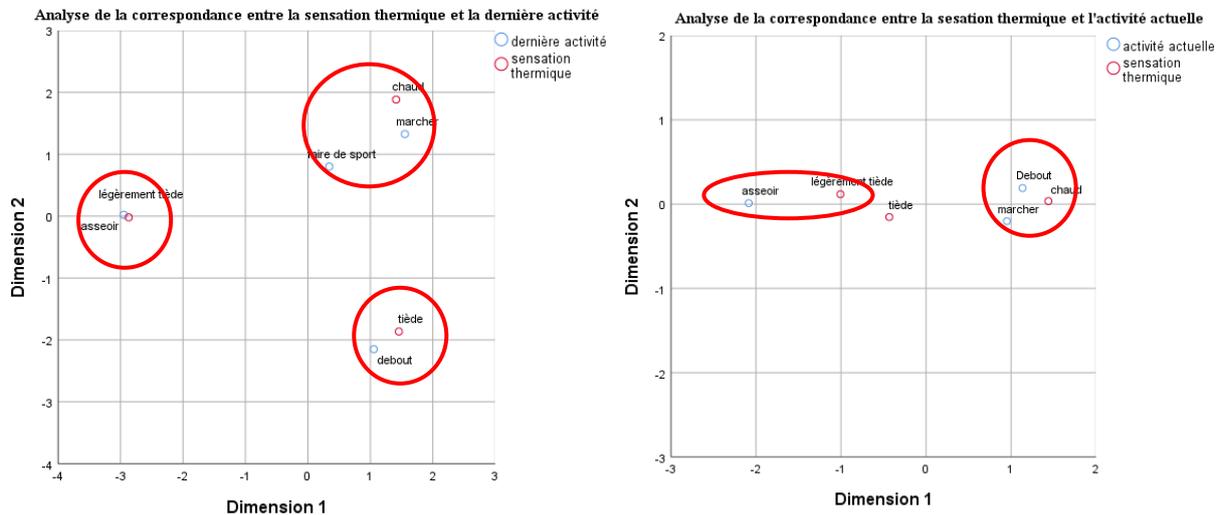
-L'analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité pratiquée au moment de questionnaire au jardin de Bennacer montre qu'une forte correspondance a été enregistrée entre ces deux variables, les usagers qui sont assis se sentent tiède, alors que ceux qui sont debout et ceux qui marchent se sentent chaud (Graphe 27).



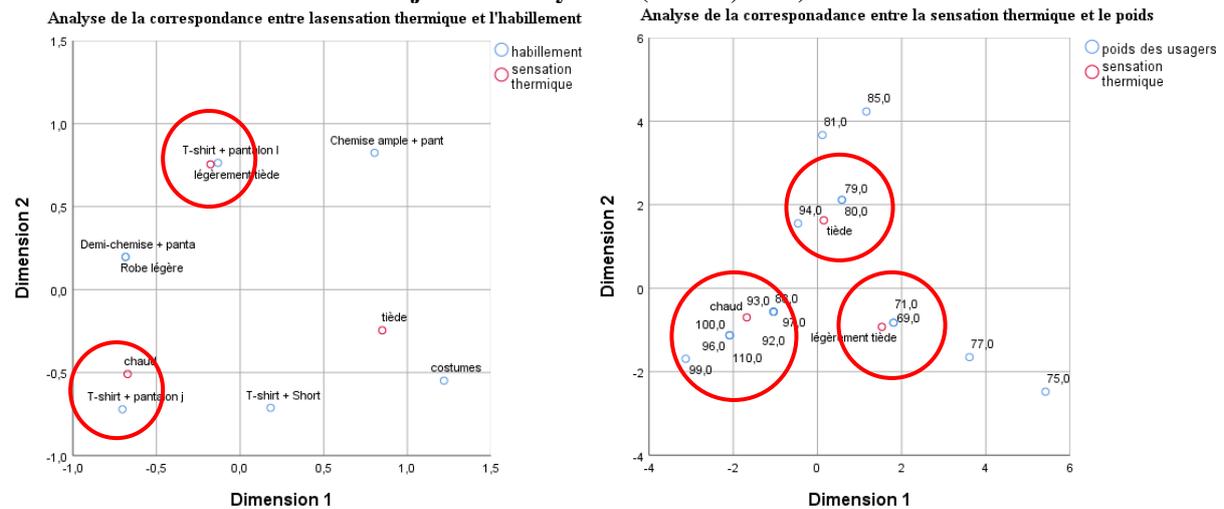
Graphe 28: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids au jardin de Bennacer (Auteur, 2020).

L'analyse de la relation entre la sensation thermique/poids et sensation thermique/habillement montre qu'une correspondance a été enregistrée entre les deux variables, les personnes qui pèsent moins se sentent mieux que les autres, ainsi les gens qui portent des vêtements moins légers se sentent aussi mieux (Graphe 28).

III-3-2-Jardin de Bayrouth



Graphe 29 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle au jardin de Bayrouth (Auteur, 2020).

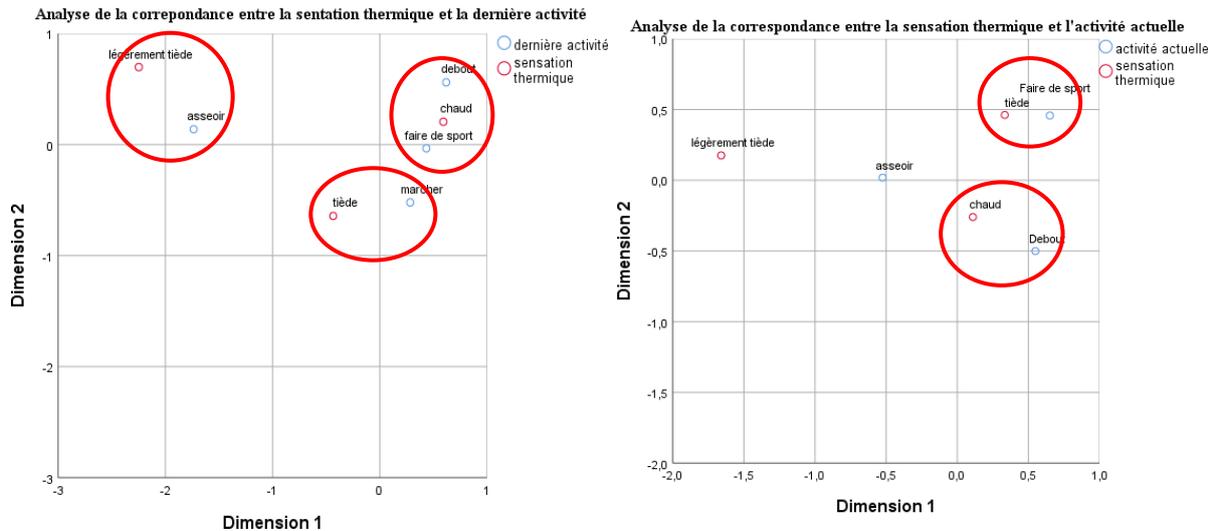


Graphe 30: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids au jardin de Bayrouth (Auteur, 2020).

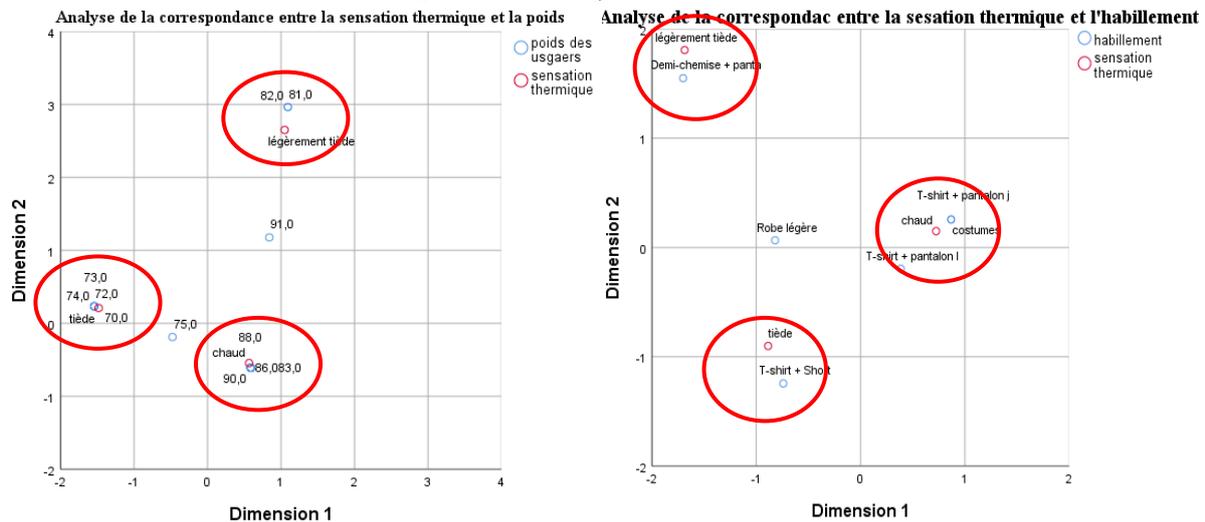
Une correspondance a été enregistrée entre les usagers qui fessaient du sport et ceux qui étaient en marche la dernière demi-heure et lors de questionnaire, ils possèdent la même sensation de chaud. Une correspondance entre ceux qui étaient debout, ils se sentaient tiède, et entre ceux qui étaient assis, ils se sentaient légèrement tiède (Graphe 29).

Une correspondance a été enregistrée entre les usagers qui portent des vêtements légers, ils se sentaient légèrement tiède, et ceux qui portent des vêtements moins légers, ils se sentaient chaud (Graphe 30).

III-3-3-Jardin de Zouaghi



Graph 31: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle au jardin de Zouaghi (Auteur, 2020).

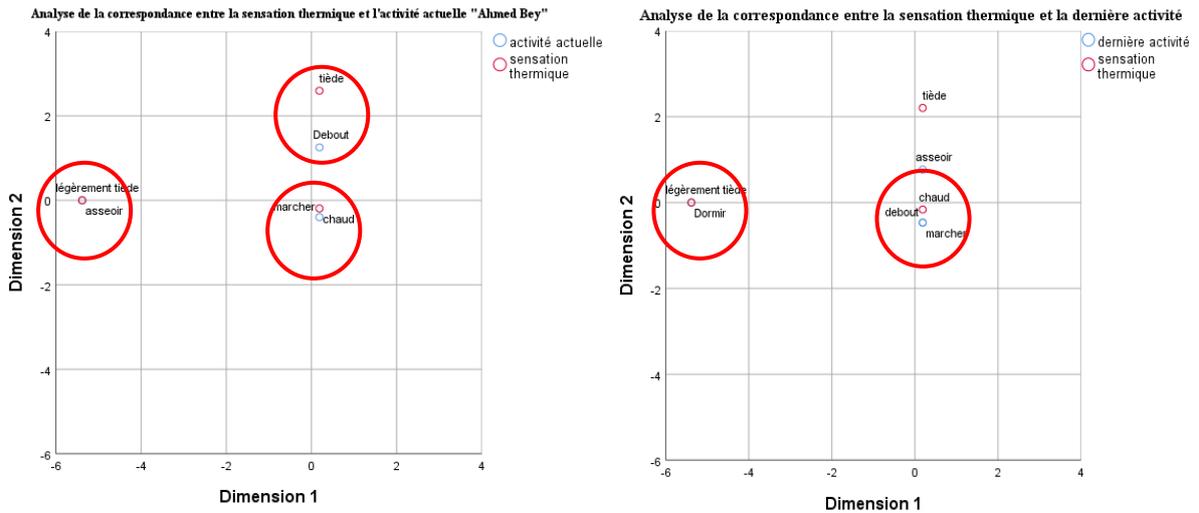


Graph 32: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids au jardin de zouaghi (Auteur, 2020).

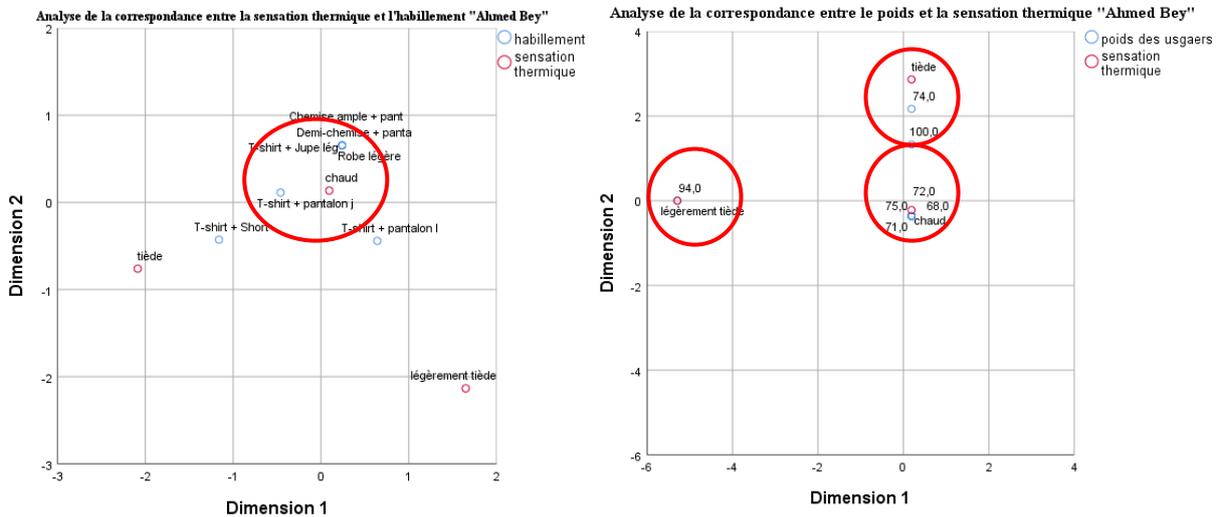
Une correspondance a été enregistrée entre les usagers qui fessaient de sport et ceux qui étaient debout la dernière demi-heure et lors de questionnaire, ils possèdent la même sensation de chaud. Une correspondance entre ceux qui étaient en marche, ils se sentaient tiède, et entre ceux qui étaient assis, ils se sentaient légèrement tiède (Graph 31).

Une correspondance entre a été enregistrée entre ceux qui pèsent entre 70kg et 75kg lorsqu'ils se sentaient tiède, entre ceux qui pèsent entre 80kg et 88kg lorsqu'ils se sentent légèrement chaud, entre ceux qui pèsent plus de 88kg lorsqu'ils se sentent chaud (Graph 32).

III-3-4-Place Ahmed Bey



Graph 33: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique et l'activité dernière et actuelle à la place Ahmed Bey (Auteur, 2020).

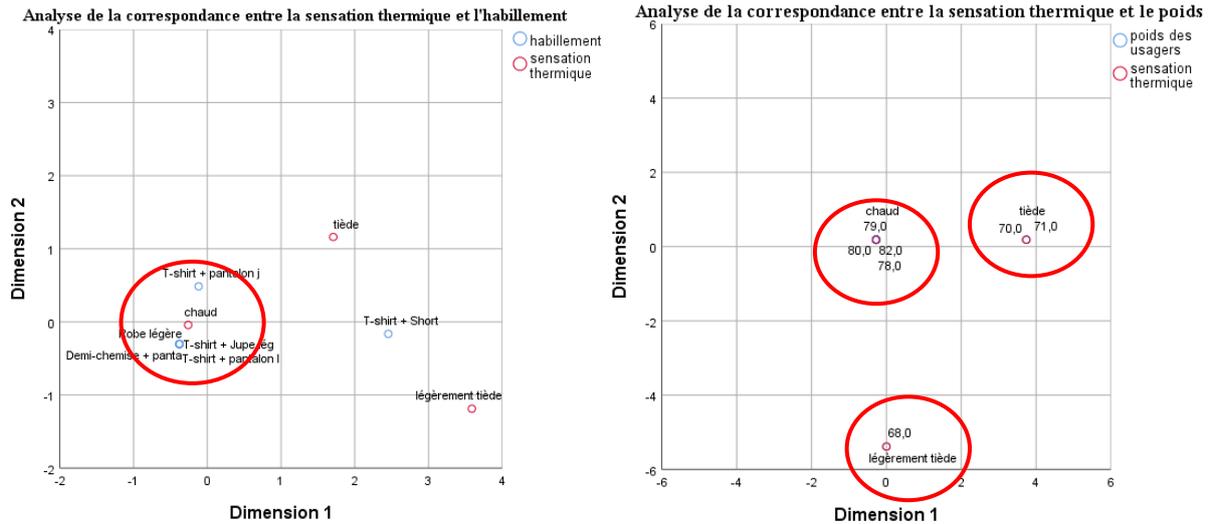


Graph 34 : Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids à la place Ahmed Bey (Auteur, 2020).

Une correspondance a été enregistrée entre les usagers qui faisaient de sport et ceux qui étaient debout la dernière demi-heure et lors de questionnaire, ils possèdent la même sensation de chaud. Une correspondance entre ceux qui étaient en marche, ils se sentaient tiède, et entre ceux qui étaient assis, ils se sentaient légèrement tiède (Graph 33).

Une correspondance a été enregistrée entre ceux qui pèsent entre 70kg et 75kg lorsqu'ils se sentaient tiède, entre ceux qui pèsent entre 80kg et 88kg lorsqu'ils se sentent légèrement chaud, entre ceux qui pèsent plus de 88kg lorsqu'ils se sentent chaud (Graph 34).

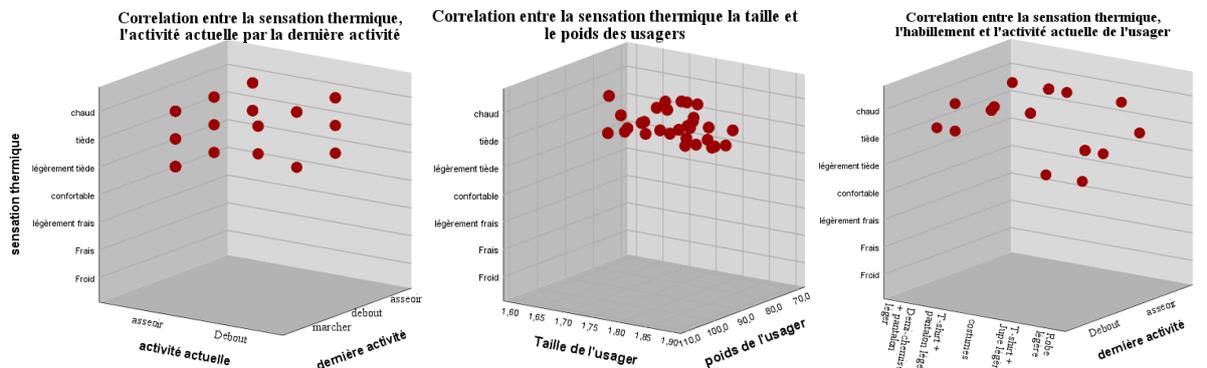
III-3-5-Place de Zouaghi



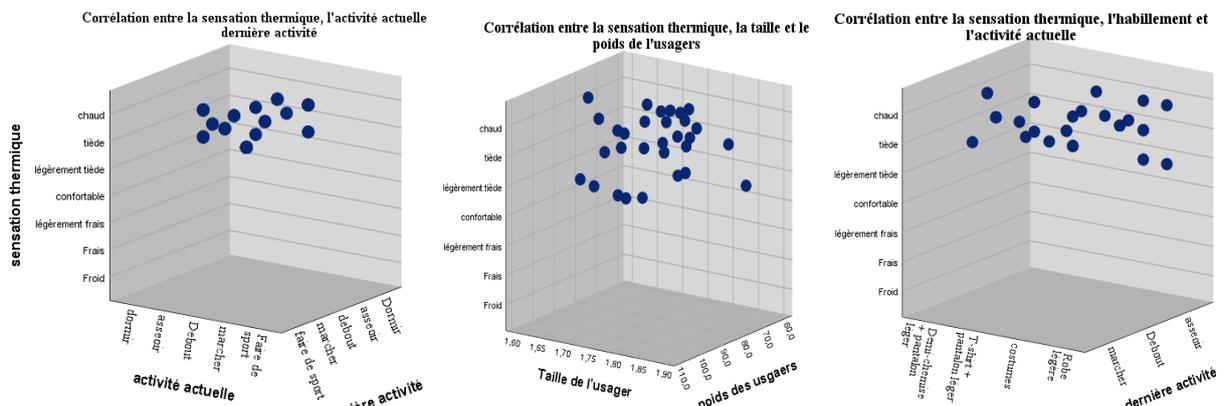
Graph 35: Analyse de la correspondance entre la sensation thermique/ l'habillement et la sensation thermique/ le poids à la place Ahmed Bey (Auteur, 2020).

- Une correspondance a été enregistrée entre ceux qui portent des robes légères, des T-shirt et pantalon léger, demi -chemise et pantalon léger lorsqu'ils se sentent chaud.
- Une correspondance a été enregistrée entre ceux qui pèsent 70kg et 71kg lorsqu'ils se sentent tiède, et entre ceux qui pèsent plus de 79kg lorsqu'ils se sentent chaud (Graph 35).

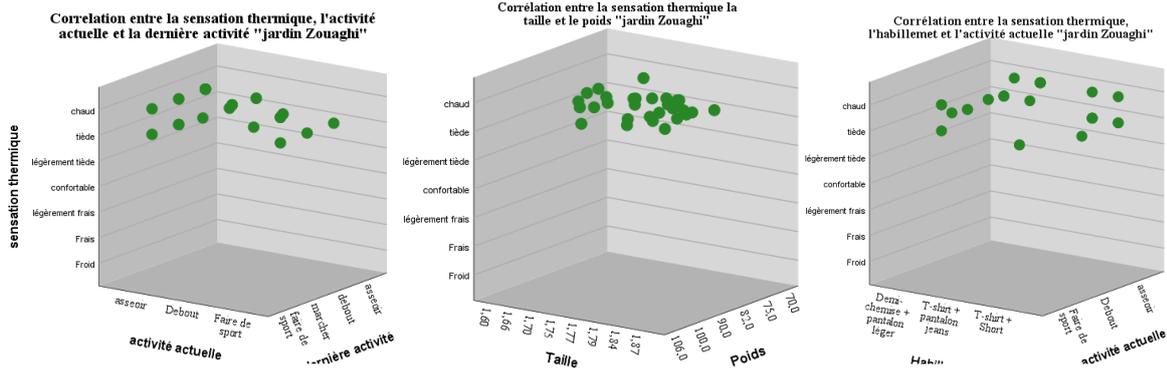
III-4-L'analyse de la corrélation en 3D



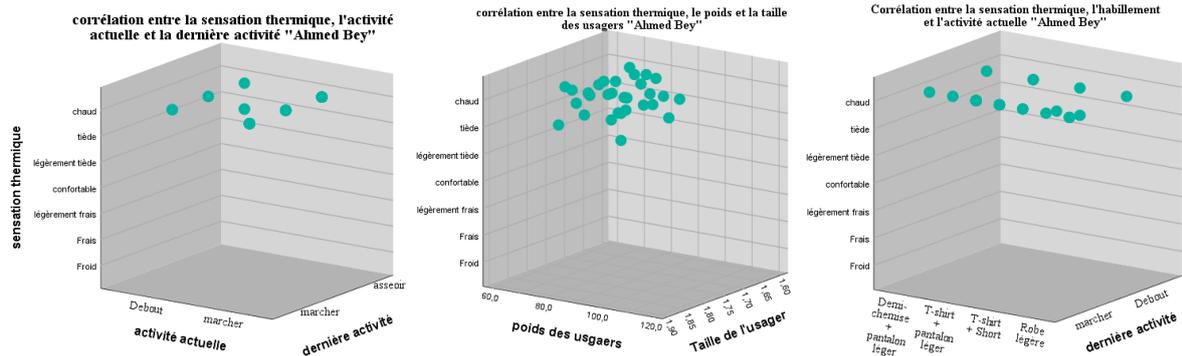
Graph 36: Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers au jardin de Bennacer



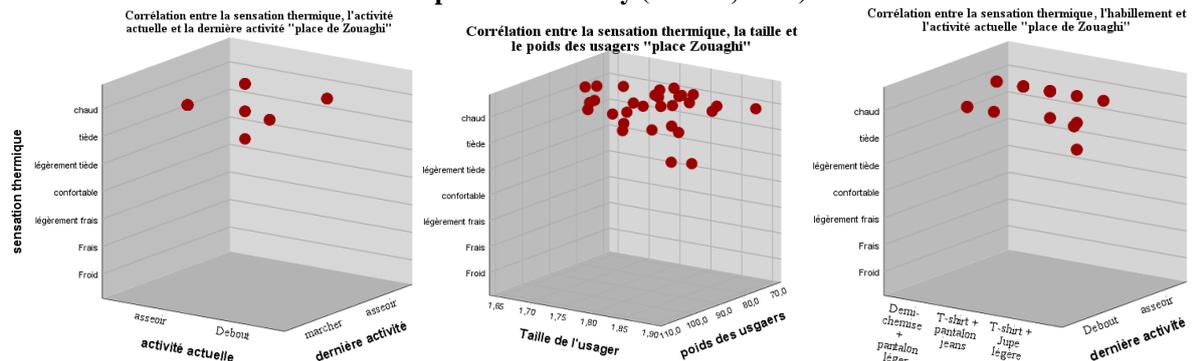
Graph 37: Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers au jardin de Bayrouth (Auteur, 2020).



Graph 38: Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers au jardin de Zouaghi (Auteur, 2020).



Graph 39: Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers à la place Ahmed Bey (Auteur, 2020).



Graph 40: Corrélation 3D entre la sensation thermique, l'activité, le poids et le métabolique des usagers à la place de Zouaghi (Auteur, 2020).

De l'analyse de la corrélation 3D entre les variables, on constate que la dernière activité pratiquée par les usagers influence leur sensation thermique même s'ils étaient en repos lors de questionnaire. Aussi, l'activité des usagers lors de questionnaire influence aussi leur sensation même s'ils étaient en repos totale avant. Une corrélation a été enregistrée entre les 3 variable, donc on peut dire que lorsque l'utilisateur était en repos pour la dernière demi heure et même lors de questionnaire, il présente la meilleur sensation par rapport aux autres, et vice versa. Une autre corrélation a été enregistré entre la sensation/la taille/le poids, on peut dire que lorsque l'utilisateur pèsent moins et possède une taille moyenne il présente la meilleur sensation (Graph 36, 37, 38, 39 et 40).

III-5-L'analyse par la composante principale (ACP)

III-5-1-Jardin de Bennacer

Selon la matrice de corrélation (la majorité des coefficients de corrélation sont supérieurs à 0.5), l'indice de KMO et le test de Bertlett (0.715), et la méthode d'extraction (tous les indices sont supérieurs aussi à 0.5), l'analyse par la composante principale est réalisable.

Selon la variance totale expliquée, la majorité de l'information est présentée par la composante 1 (47.210%) et la composante 2 (19.298%), ce qui nous donne un cumul de 66.507%, un total suffisant pour étudier les variables.

Matrice des composantes

	Composante	
	1	2
sensation thermique	-,963	,133
acceptation thermique	,872	-,248
perception de la température	-,934	,033
changement de la température	,911	,016
vitesse de l'air	,574	,374
humidité relative	,187	-,129
changement de l'humidité relative	,115	,761
intensité des rayons solaires	,098	,853

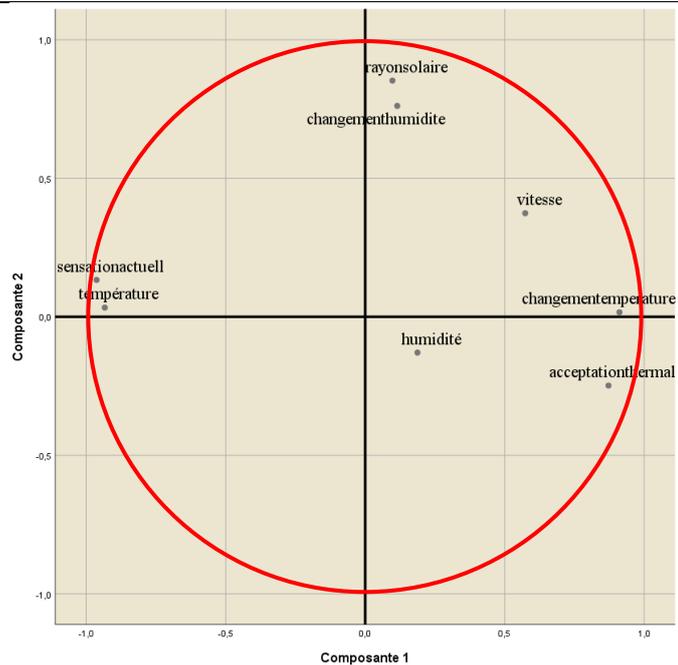


Tableau 12: la matrice des composantes (jardin Bennacer) (Auteur, 2020).

Graphe 41: Analyse par la composante principale (jardin Bennacer) (Auteur, 2020).

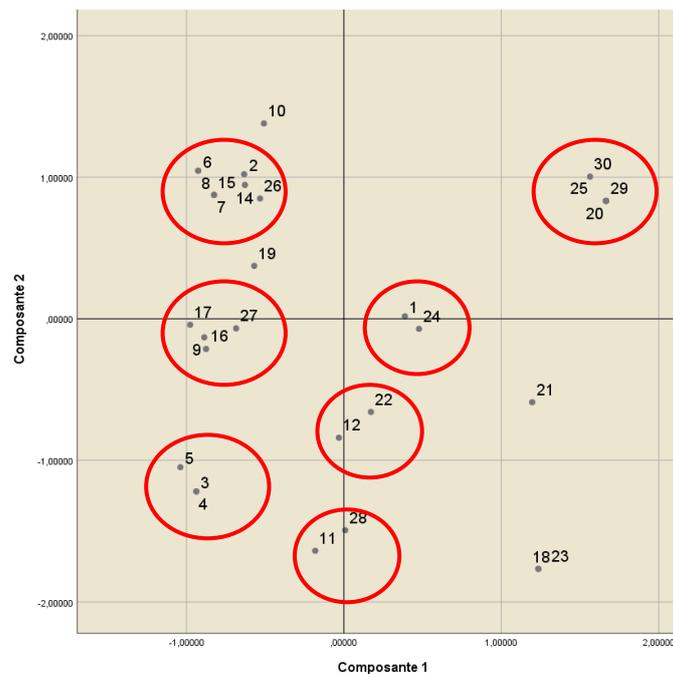
Les variables sont projetées dans un cercle de rayon 1 appelé le cercle des corrélations. Lorsqu'une variable est proche des limites du cercle, on dit qu'il est bien représenté par le plan factoriel. Cette variable est alors bien corrélée avec les 2 facteurs principaux constituant ce plan. Le cercle permet de voir la corrélation ou la liaison entre les variables (Guechi & Alkama, 2017).

D'après la matrice des composantes (Tableau 12), la sensation thermique, acceptation thermique, la perception de la température, le changement de la température et la perception de la vitesse de l'air sont bien présentées par la composante 1 (Graphe 41).

Tandis que, le changement de l'humidité relative, la perception de l'intensité des rayons solaires sont bien présentés par la composante 2. Quand à l'humidité relative, elle est bien représentée par les deux composantes. L'analyse de graphe montre que la sensation

thermique, la perception de la température, la perception des rayons solaires, le changement de l'humidité et la température, et l'acceptation thermique sont bien corrélés avec les deux axes factoriels et ils peuvent être aussi bien corrélés entre eux (Graphe 41).

Les usagers qui perçoivent l'environnement thermique chaud, la température très chaude, les rayons solaires très intenses et le climat humide, préfèrent le changement de cette sensation et ainsi le changement de la température (Graphe 41).



Grappe 42 : graphe d'observation de l'analyse ACP (jardin Bennacer) (Auteur, 2020).

Le graphique d'observation correspond à l'un des objectifs de l'ACP. Il permet de représenter les individus sur une carte à deux dimensions, et ainsi d'identifier des tendances (Guechi & Alkama, 2017). L'analyse de notre graphe montre que des groupes des individus qui partagent le même point de vue ; les usagers 1 et 24 partagent le même point de vue concernant la perception de l'humidité relative. Les usagers 9, 16, 17 et 27 partagent le même point de vue concernant la sensation thermique et la perception de la température. Les usagers 20, 25, 29 et 30 partagent le même point de vue concernant la vitesse de l'air et le changement de la température (Graphe 42).

III-5-2-Jardin de Bayrouth

Selon la matrice de corrélation (la majorité des coefficients de corrélation sont supérieures à 0.5), l'indice de KMO et le test de Bertlett (0.603), et la méthode d'extraction (tous les indices sont supérieurs à 0.5), l'analyse par la composante principale est réalisable.

Selon la variance totale expliquée, la majorité de l'information est présentée par la composante 1 (36.816%) et la composante 2 (24.627%), ce qui nous donne un cumul de 61.443%, un total suffisant pour étudier les variables.

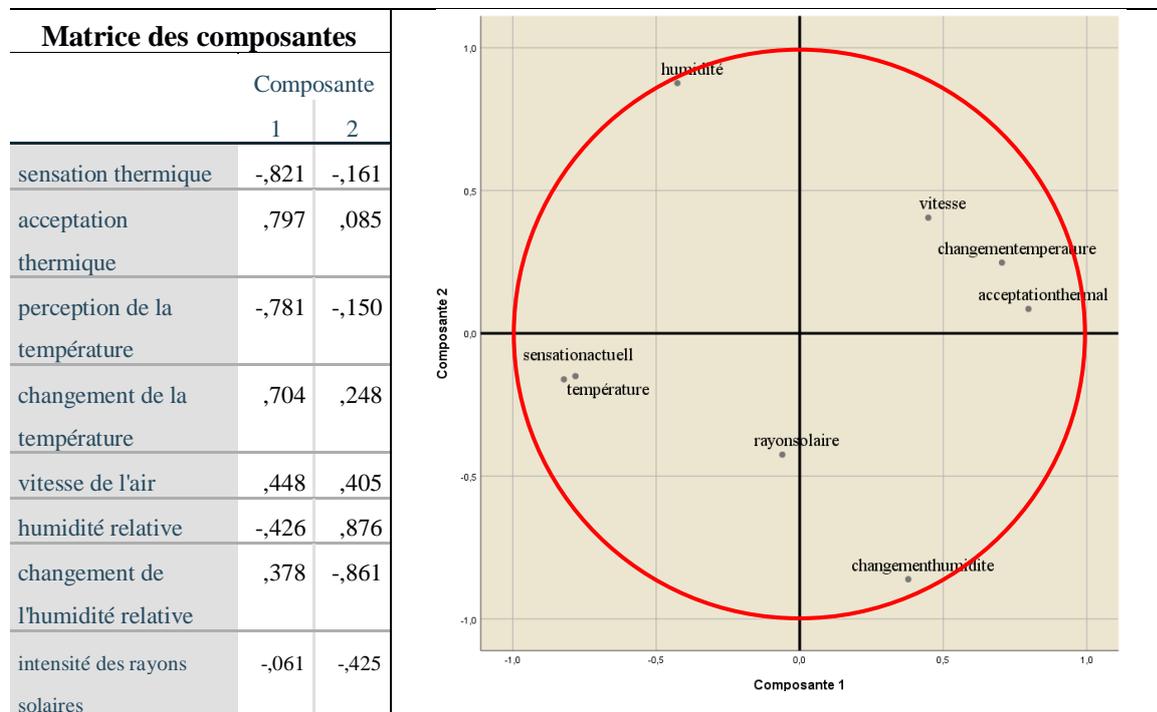


Tableau 13: la matrice des composantes (jardin Bayrouth) (Auteur, 2020).

Graph 43 : Analyse par la composante principale (jardin Bayrouth) (Auteur, 2020).

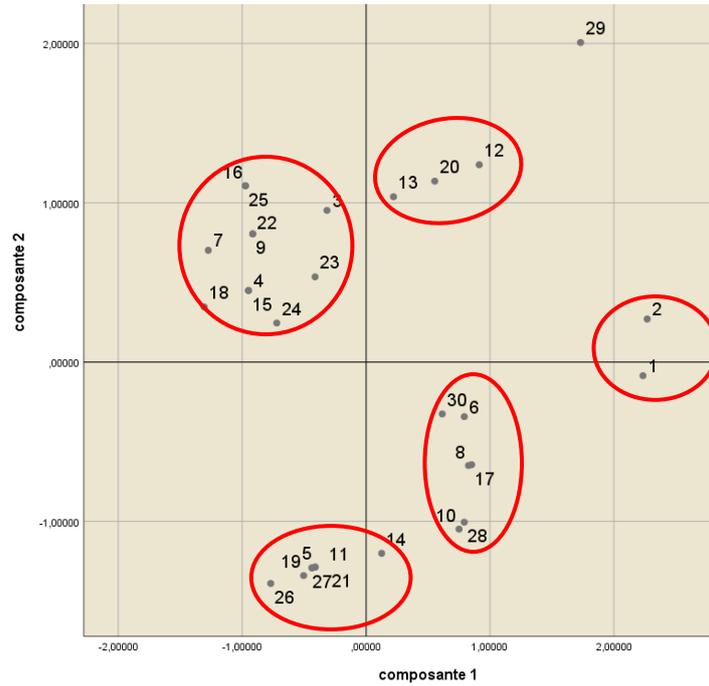
D'après la matrice des composantes (Tableau 13), la sensation thermique la perception de la température, l'acceptation thermique, le changement de la température sont bien présentés par la composante 1. Alors que la perception de l'humidité relative, le changement de l'humidité relative et la perception de l'intensité des rayons solaires sont bien présentés par l'axe factoriel ou bien la composante 2. La perception de la vitesse de l'air est bien présentée par les deux axes (Graph 43).

Les usagers qui perçoivent l'environnement thermique chaud, la température très chaude préfèrent le changement de cette sensation et ainsi le changement de la température. Ainsi ceux qui trouvent le climat humide préfèrent aussi le changement de l'humidité relative.

La sensation thermique, la perception de la température, l'acceptation thermique, le changement de la température, la perception de l'humidité relative et le changement de l'humidité relative sont bien corrélés avec les deux axes factoriels et peuvent être bien corrélés entre eux (Graph 43).

L'analyse de graph d'observation montre que les usagers 1 et 2 partagent le même point de vue concernant l'acceptation de l'environnement thermique et le changement de la

température de l'air. Les usagers 5, 11, 14, 19, 21, 26, 27 partagent le même pont de vue concernant l'humidité relative (Graphe 44)



Graph 44: graphe d'observation de l'analyse ACP (jardin Bayrouth) (Auteur, 2020).

III-4-3-Jardin de Zouaghi

Matrice des composantes

	Composante	
	1	2
sensation thermique	,873	-,311
acceptation thermique	-,561	,629
perception de la température	,822	-,458
changement de la température	-,620	,017
vitesse de l'air	-,677	-,308
changement de la vitesse de l'air	,584	,277
humidité relative	,371	,774
changement de l'humidité relative	-,404	-,631
intensité des rayons solaires	,303	,331

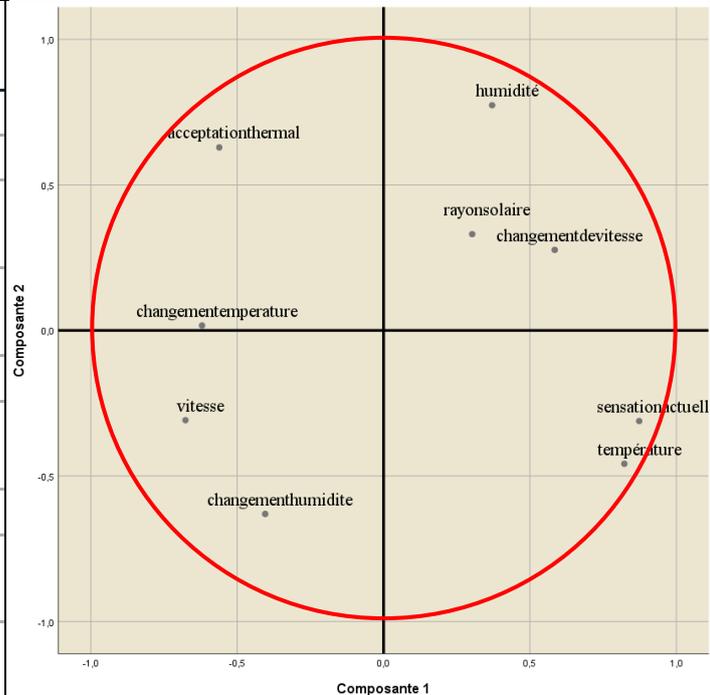


Tableau 14: la matrice des composantes (jardin Zouaghi) (Auteur, 2020).

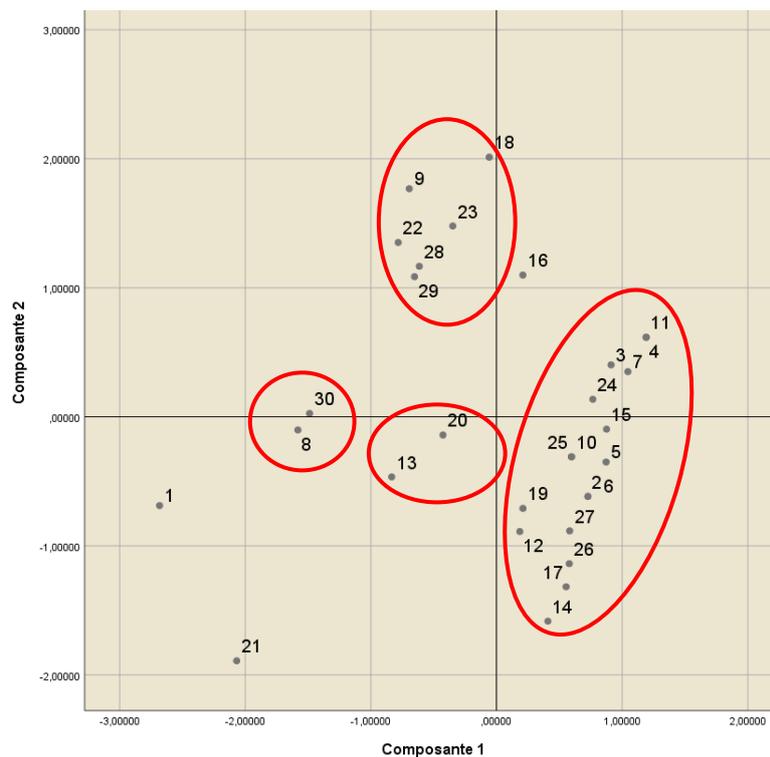
Graph 45: Analyse par la composante principale (jardin Zouaghi) (Auteur, 2020).

Selon la matrice de corrélation (la majorité des coefficients de corrélation sont supérieures à 0.5), l'indice de KMO et le test de Bertlett (0.653), et la méthode d'extraction (tous les indices sont supérieurs à 0.5), l'analyse par la composante principale est réalisable.

Selon la variance totale expliquée, la majorité de l'information est présentée par la composante 1 (37%) et la composante 2 (22%), ce qui nous donne un cumul de (59%), un total suffisant pour étudier les variables.

D'après la matrice des composantes (Tableau 14), la sensation thermique la perception de la température, l'acceptation thermique, le changement de la température, la perception de la vitesse de l'air et le changement de la vitesse de l'air sont bien présentés par la composante 1. Alors que la perception de l'humidité relative, le changement de l'humidité relative et la perception de l'intensité des rayons solaires sont bien présentés par l'axe factoriel ou bien la composante 2 (Graphe 45).

L'acceptation thermique, la perception de l'humidité relative, la sensation thermique et la perception de la température sont bien corrélés avec les deux axes factoriels et ainsi peuvent être bien corrélés entre eux (Graphe 45).



Graph 46: graphe d'observation de l'analyse ACP (jardin Zouaghi) (Auteur, 2020).

L'analyse de graphe d'observation montre qu'un grand nombre d'individu partagent le même point de vue concernant la sensation thermique, la perception de la température de l'air, l'intensité des rayons solaire et le changement de la vitesse de l'air (Graphe 46).

III-4-4-Place Ahmed Bey

Selon la matrice de corrélation (la majorité des coefficients de corrélation sont supérieures à 0.5), l'indice de KMO et le test de Bertlett (0.538), et la méthode d'extraction (tous les indices sont supérieurs à 0.5), l'analyse par la composante principale est réalisable.

Selon la variance totale expliquée, la majorité de l'information est présentée par la composante 1 (36.621%) et la composante 2 (31.960%), ce qui nous donne un cumul de 68.581%, un total suffisant pour étudier les variables.

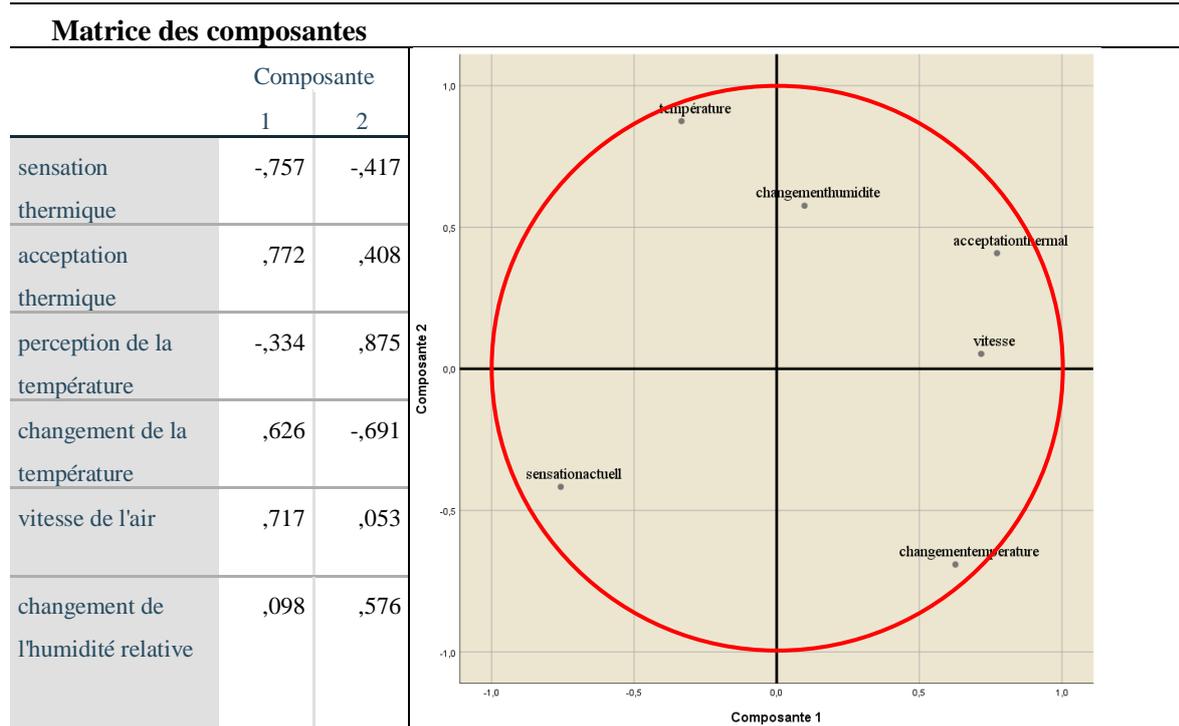


Tableau 15: la matrice des composantes (place Ahmed Bey) (Auteur, 2020).

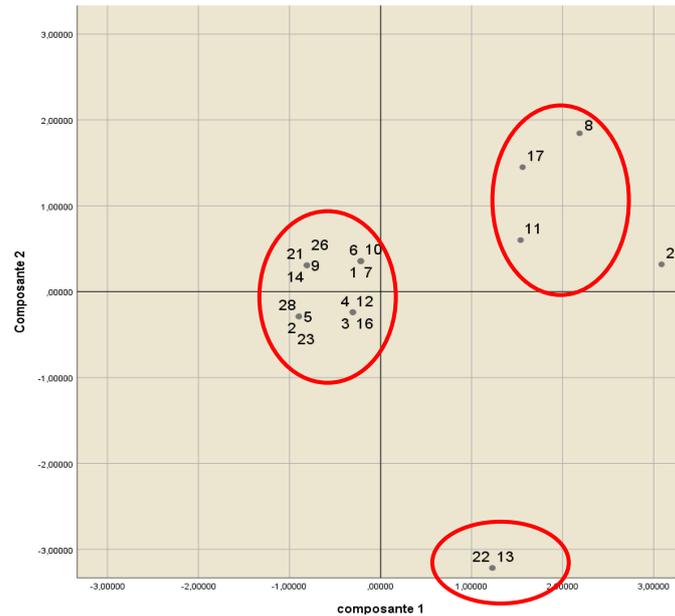
Graphe 47: Analyse par la composante principale (place Ahmed Bey) (Auteur, 2020).

La vitesse de l'air est bien présentée par l'axe factoriel 1. le changement de l'humidité relative est bien présenté par l'axe factoriel 2. La sensation thermique, l'acceptation thermique, la perception de la température et le changement de la température sont présentés par les deux axes (Tableau 15 et Graphe 47). Les variables sensation thermique, perception de la température, acceptation thermique et changement de la température sont bien corrélés avec les deux composantes et peuvent être bien corrélés entre eux (Graphe 47).

Les usagers qui se sentent chaud préfèrent le changement de cette sensation. Et ceux qui perçoivent la température très chaude suggèrent une température plus froide (Graphe 47).

De l'analyse de graphe d'observation de l'analyse ACP de la place Ahmed Bey, on constate que les usagers 8, 11 et 17 partagent le même avis concernant l'acceptation thermique, le changement de l'humidité relative et la perception de la vitesse de l'air. Alors qu'un grand

nombre d'individus (1, 2, 3,4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 16, 21, 23, 26 et 28) partage le même avis concernant la sensation thermique (Graphe 48).



Graph 48: graphe d'observation de l'analyse ACP (place Ahmed Bey) (Auteur, 2020).

III-4-5-Place de Zouaghi

Selon la matrice de corrélation (la majorité des coefficients de corrélation sont supérieure à 0.5), l'indice de KMO et le test de Bertlett (0.532), et la méthode d'extraction (tous les indices sont supérieurs à 0.5), l'analyse par la composante principale est réalisable.

Matrice des composantes

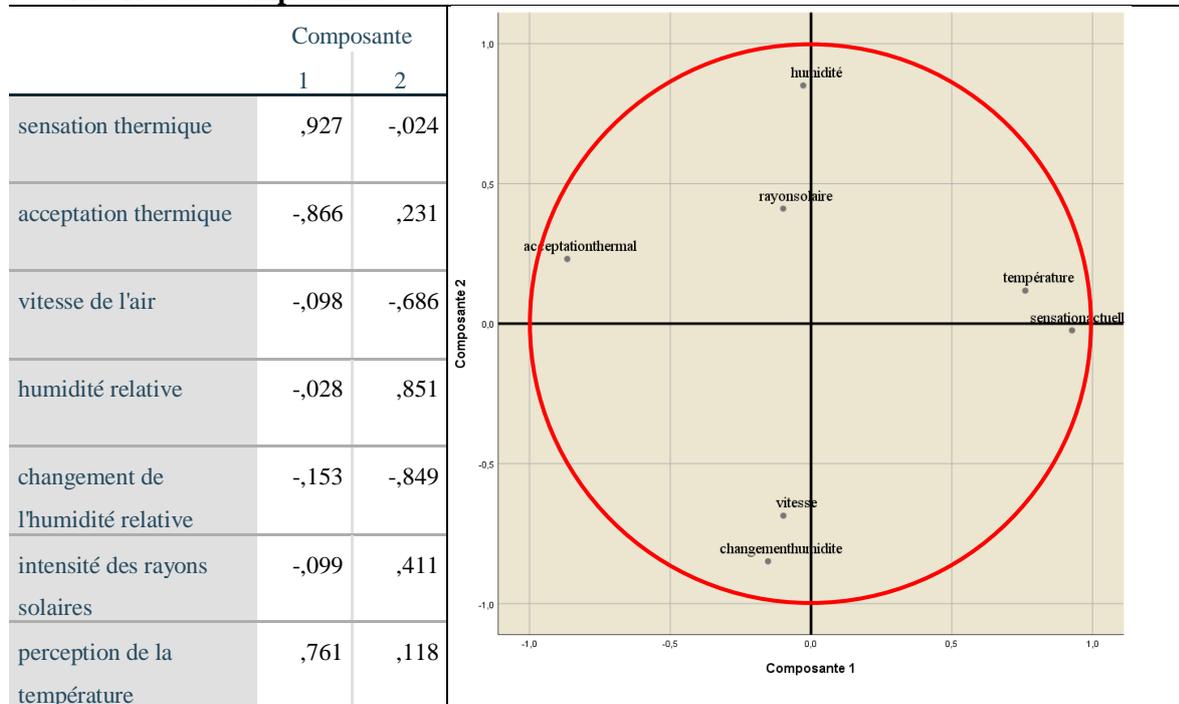


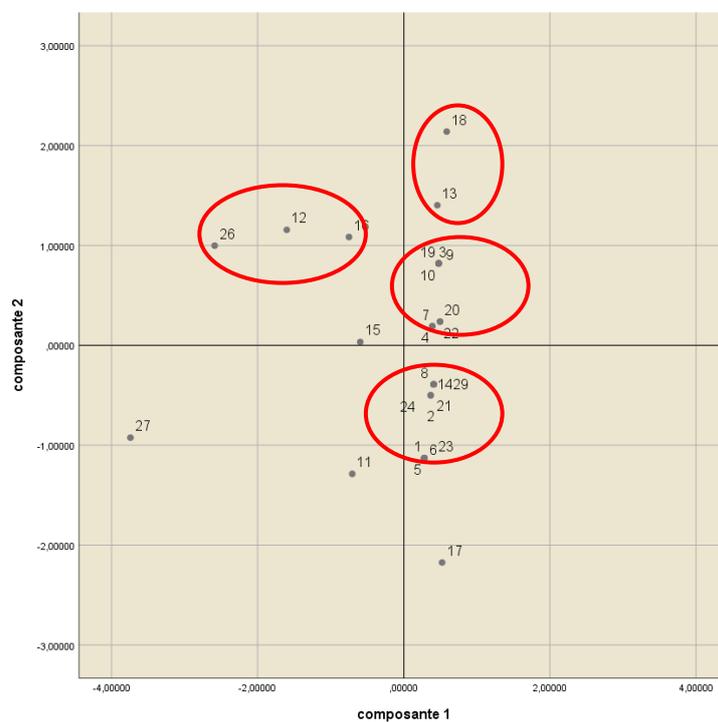
Tableau 16: la matrice des composantes (Place Zouaghi) (Auteur, 2020).

Graph 49: Analyse par la composante principale (place Zouaghi) (Auteur, 2020).

Selon la variance totale expliquée, la majorité de l'information est présentée par la composante 1 (31.879%) et la composante 2 (30.725%), ce qui nous donne un cumul de 62.604%, un total suffisant pour étudier les variables (Graphe 49).

La sensation thermique, l'acceptation thermique et la perception de la température sont bien présentés par la composante 1. Tandis que la vitesse de l'air, la perception de l'humidité et le changement de cette dernière sont bien présentés par la composante 2 (Graphe 49).

L'acceptation thermique, la perception de l'humidité, la perception de la température, l'acceptation thermique et le changement de l'humidité sont bien corrélés avec les deux axes factoriels et ainsi peuvent être bien corrélés entre eux (Graphe 49).



Graph 50: graphe d'observation de l'analyse ACP (place Zouaghi) (Auteur, 2020).

L'analyse de graphe d'observation de l'analyse ACP de la place de Zouaghi révèle qu'il existe plusieurs groupes d'individus qui partagent le même avis concernant les variables analysées. Comme il existe des individus qui présentent des avis différents comme l'es usagers 17, 11 et 27 (Graphe 50).

-Conclusion

Le corps humain ne dispose pas de capteurs sélectifs pour la perception des paramètres climatiques individuels. Il ne peut donc ressentir que l'effet de tous les paramètres réunis. L'application d'indices thermiques basés sur le bilan énergétique humain donne des informations détaillées sur l'effet des environnements thermiques complexes sur l'homme. Elle est liée à la relation étroite entre le mécanisme de thermorégulation humaine et le système circulatoire humain. Les récepteurs thermiques peuvent enregistrer la température de la peau et le flux sanguin passant par l'hypothalamus et répondre de manière thermorégulatrice (Höppe, 1999). Ces températures, cependant, sont influencées par l'effet intégré de tous les paramètres climatiques, qui sont dans une sorte d'interrelation, c'est-à-dire s'influencent mutuellement. Sur la base du bilan énergétique humain, des indices thermiques peuvent être dérivés, qui décrivent l'effet intégral du climat sur les humains. Tous les indices thermiques nécessitent les mêmes paramètres météorologiques d'entrée: température de l'air, humidité de l'air, vitesse du vent ainsi que les flux de rayonnement à ondes courtes et longues résumés par la température moyenne de rayonnement (T_{mrt}).

Les résultats affirment que la végétation a un impact très clair sur la température de l'air enregistrée (valeurs journalières faibles aux points proches de la végétation), sur le taux d'humidité relative (valeurs journalières élevées aux points plus proches de la végétation) et sur la vitesse de l'air, dans la comparaison de tous les sites étudiés. L'arbre ombrage les surfaces anthropiques, limite le rayonnement solaire direct intense et l'émission de rayonnement thermique converti. Le végétal par son effet d'évapotranspiration augmente l'humidité relative, réduit la température de l'air et limite la vitesse de l'air. Cela représente son potentiel de l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

L'effet modérateur de l'îlot de chaleur urbain par la végétation a été enregistré au jardin de Bennacer, jardin de Bayrouth et à la rue de Belouezdad (PMV le PET, le SET et l'UTCI ont montré un stress thermique modéré surtout dans les premières heures de la journée, alors à midi le stress ne dépasse pas le stress fort, une sensation qui tend à changer vers le soir) la densité de la végétation de ces sites ainsi que les arbres d'alignement peuvent créer un microclimat différents de celui dans les espaces alentours.

Les résultats acquis par le questionnaire affirment les résultats de l'analyse des indices de confort, les usagers interrogés lors de notre étude confirment que le jardin de Bennacer, de Bayrouth sont les espaces les plus confortables en montrant un taux de satisfaction très élevé,

alors que la place de Ahmed Bey, le jardin de Zouaghi et la place de Zouaghi sont les espaces les plus inconfortables en montrant un taux d'insatisfaction très élevé.

En sus de conclusion, la végétation est une composante primordiale dans le système urbain pour l'amélioration de la vie des habitants. Le bon choix de type, de taille et de la densité de végétation rend la ville vivable et durable. Planter les arbres d'une manière étudiée, minimiser les surfaces minérales, assurer l'ombrage au sol ou sur les parois (ce qui peut se faire avec des arbres d'alignements ou des végétaux grimpants), sont des opérations qui peuvent créer des espaces agréables à vivre.

Conclusion générale

1-Conclusion générale

La qualité des espaces extérieurs dans les zones urbaines joue un rôle fondamental dans la qualité de vie des habitants. Parallèlement, l'urbanisation rapide des villes ces dernières années a accru le besoin de créer davantage d'environnements extérieurs pour les activités de loisirs. De même, la condition du confort humain dans les espaces extérieurs est vitale, et à prendre en compte lors de la conception des espaces extérieurs car elle est affectée par un large éventail de paramètres. Par conséquent, la création d'environnements thermiquement confortables en fonction des conditions climatiques est considérée comme l'un des principaux critères lors de la conception des espaces extérieurs.

Le confort humain dans les espaces extérieurs est un paramètre essentiel pour évaluer la qualité du microclimat urbain et pour fournir des lignes directrices pour un développement urbain durable. Le confort thermique est l'un des facteurs qui influencent les différentes activités des utilisateurs. L'intensité de ces activités est inversement proportionnelle au niveau de gêne ressenti par les utilisateurs de l'espace public lorsqu'ils sont exposés aux conditions climatiques. Par conséquent, la réduction de l'inconfort thermique dans les espaces publics peut améliorer la qualité de vie d'un public en particulier face aux intempéries et à la température.

En ce qui concerne l'évaluation du confort thermique basée sur les flux d'énergie entre le corps et l'environnement, des indices thermiques polyvalents ont été développés tels que le vote moyen prévisible (PMV), la température effective (ET*), la température effective standard (SET*), OUT_SET* et une température équivalente physiologique (PET). Les indices PMV, ET* et SET* ont été conçus pour une utilisation en intérieur conformément aux conditions environnementales permanentes des espaces intérieurs, tandis que les indices OUT_SET* et PET ont été essentiellement développés pour le calcul du confort thermique dans les environnements extérieurs. De même, des études récentes indiquent que le PET est le choix le plus approprié pour évaluer les conditions de confort thermique des environnements extérieurs plutôt que les indices thermiques basés sur l'intérieur.

La végétation urbaine décrit l'assemblage total de plantes à l'intérieur et sur le périmètre des villes. Cela comprend une diversité de plantes dans un large éventail d'habitats. Ils sont établis et gérés pour diverses raisons et présentent une valeur économique, sociale, esthétique et écologique. La valeur écologique de la végétation urbaine se trouve dans sa contribution à la protection de la biodiversité et le maintien des processus écologiques et des systèmes de

survie. Quant à la valeur sociale, la végétation urbaine contribue à la qualité de vie par son influence sur le bien-être psychologique et physiologique des individus. Les espaces verts urbains sont importants pour améliorer la qualité de l'air en absorbant des gaz polluants et des particules responsables d'infections respiratoires. Ils contribuent également à la réduction des coûts énergétiques liés au refroidissement des bâtiments. De plus, en raison de leur confort et de leur esthétique, les espaces verts augmentent la valeur de la propriété. Cependant, les avantages les plus recherchés des espaces verts en ville sont les avantages sociaux et psychologiques. Les espaces verts urbains, en particulier les parcs et les jardins publics, constituent des ressources propices à la détente et aux loisirs. Idéalement, cela aide à la guérison émotionnelle (thérapeutique) et à la relaxation physique. Dans l'ensemble, la végétation est un élément important, sinon essentiel, de l'environnement urbain. Les espaces verts urbains sont nos alliées pour aider à promouvoir la santé et le bien-être des citoyens, apportant une contribution vitale non seulement à la qualité du cadre de vie, mais aussi à l'attractivité de nos villes

De nombreuses études ont été menées sur les bienfaits rafraîchissants des arbres et de la végétation dans les villes. Des réductions de la température de surface jusqu'à 20 ° C peuvent être possibles par temps chaud et ensoleillé. Bien que de nombreuses études se concentrent sur les avantages de l'évapotranspiration des arbres urbains, il est important de noter que les arbres affectent également les régimes du vent dans les villes. Ainsi, en modifiant les régimes du vent, les arbres peuvent altérer l'efficacité des brises de refroidissement et peuvent jouer un rôle important dans les processus de dispersion ainsi que dans l'élimination des polluants par dépôt. L'augmentation de la végétation et la réduction de la surface imperméable en milieu urbain, l'ajout ou l'expansion de toitures vertes et la mise en œuvre de chaussées perméables peuvent atténuer l'îlot de chaleur urbain et améliorer le confort des habitants dans les espaces extérieurs.

L'étude de l'impact de l'espace vert sur le microclimat et le confort thermique extérieur fait l'objet de centaines d'études à travers le monde. Nous avons essayé de résumer les différentes méthodes et approches utilisées pour évaluer cet impact. De ce fait, nous avons étudié les approches utilisées pour évaluer le confort thermique extérieur à travers la simulation, plusieurs logiciels ont été développés pour estimer les différents indices de confort thermique, parmi ces logiciels et modèles, on a cité : ENVI-met, l'outil de post-traitement Bio-Met interagit directement avec ENVI-met qui détermine le confort thermique, selon PMV, PET, UTCI et

TMR, le modèle RayMan qui calcule les flux de rayonnement et les indices thermophysiques, comme PMV, PET, SET*, UTCI, PT et la température moyenne radiante, le modèle OTC qui analyse l'indice universel de climat thermique (UTCI), la température physiologique équivalente température équivalente physiologique (PET) et la Température effective universelle (ETU), un autre modèle SOLWEIG qui simule les flux 3D de rayonnement solaire et IR à partir d'une description de la ville par coordonnées (x,y) et hauteur associée, en outre le modèle Solène-microclimat qui permet d'étudier l'impact des aménagements urbains à l'échelle du quartier sur le confort extérieur, sur la température de surface et sur la consommation énergétique. Le modèle TEB-SURFEX permet d'étudier les échanges d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et les villes, l'îlot de chaleur urbain dans une ville, les consommations énergétiques pour la climatisation et le chauffage du bâtiment ainsi que les indices du confort humain et enfin, le calculateur UTCI qui détermine le confort thermique du piéton, selon l'indice universel de climat thermique (UTCI). Nous avons étudié aussi l'approche paramétrique effectuée généralement par le biais de logiciel Rhinocéros en utilisant le Grasshopper et les différents plugs-in comme ladybug, Honneybee et Butterfly.

La télédétection révèle être un outil tout à fait approprié pour étudier le fonctionnement et suivre l'évolution de la végétation. Grâce aux satellites, il est possible en effet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variées. Ils permettent en outre d'estimer le rayonnement solaire global, ainsi que certains paramètres caractéristiques des couverts végétaux, comme la quantité de biomasse, ou la fraction du rayonnement photosynthétique actif. Outils d'une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques qui gouvernent la dynamique des écosystèmes végétaux, les données de télédétection peuvent aussi être utilisés pour informer les politiques sur les conséquences d'éventuels changements de la répartition mondiale des couverts végétaux, de façon à mettre en place des solutions de gestion plus durables.

Les données de télédétection ont été largement utilisées pour analyser l'effet ICU dans de nombreuses études, en plus des données obtenues à partir de mesures au sol. La première observation d'ICU de la surface du sol utilisant des données de capteurs satellitaires a été signalée par Rao (1972), qui a exploré la possibilité de distinguer les régions urbaines sur la base de données infrarouges thermiques (TIR) acquises par un capteur. Dès lors, diverses combinaisons de capteurs et de plates-formes basées sur des satellites ont été utilisées pour les observations à distance. De nombreuses études sur l'ICU de surface sont basées sur des données de télédétection thermique provenant de différents satellites (Dousset & Gourmelon, 2003 ; Aniello et al., 1995 ; Mathew et al., 2017).

Les indices de végétation ont été utilisés dans des applications très nombreuses et variées depuis l'apparition de la télédétection spatiale, dans ce volet, nous avons présenté les indices les plus couramment utilisés. Ce qu'on peut dire que chaque indice a ses avantages et beaucoup ont des avantages particuliers, mais ils se caractérisent par le fait qu'ils sont intrinsèquement dépourvus de dimension et qu'ils ont tous en fin de compte la caractéristique d'utiliser le contraste entre la réflexion NIR (proche de l'infrarouge) et le rouge comme mesure principale de la végétation.

A l'instar de la télédétection, la théorie des patrons du paysage et les métriques paysagères sert aussi à évaluer l'impact de la composition et la configuration spatiale de la couverture végétale sur la température de surface du sol LST et le microclimat. Une méthode pertinente, permet de quantifier l'effet des patches vert sur LST à travers l'usage de plusieurs métriques par le biais de la télédétection, et en utilisant des cartes de l'usage du sol en format Raster ou ASCII et les analyser dans le logiciel FRAGSTAT. La télédétection fait aujourd'hui une révolution dans différents domaines de la recherche scientifique notamment l'étude de la végétation et l'estimation de l'impact de l'espace vert sur le microclimat, nous avons exposé un nombre important des études précédentes pour s'inspirer de la méthodologie y utilisé.

Notre cas d'étude est la ville de Constantine, capitale de l'Est Algérien, elle se situe à environ 431 km de la capitale Alger et à 245 km des frontières Algéro-tunisiennes, à 89 km de Skikda vers le Nord et à 235 km de Biskra vers le Sud. Sa position lui procure situation stratégique en situant à équidistance du littoral au Nord et le massif des Aurès au sud, et constituant un relais entre les villes du sud et les villes côtières.

Elle est entourés par Skikda au Nord, Mila à l'Ouest, Guelma à l'Est et Oum El Bouaghi au Sud, elle est considérée parmi les wilayas les plus importantes du pays, elle s'étend sur une superficie de l'ordre de 2297,20 Km². Elle est située entre 350m et 1100m d'altitude, entre latitude 36° 17' et la longitude 6° 37'.

La ville se situe au cœur d'un pincement entre les montagnes (djebel Ouahch et Djebel Chettaba) sur un grand rocher localisé sur les deux cotés de OUED RHUMEL, le site est marqué par la juxtaposition de deux plateaux (El Mansourah et Ain El Bey).

Cette ville est située dans une région comprise entre le Sahara au sud avec un climat continental et l'influence du climat méditerranéen au nord caractérisé par des précipitations irrégulières, et une longue période de sécheresse estivale. Donc le climat de la ville est de type semi-aride frais, caractérisé par deux périodes distinctes : une période humide et froide en hiver de 197 jours et une période sèche et chaude en été de 133 jours.

A L'époque Ottomane, Constantine était à l'image d'une civilisation maghrébine. Les espaces verts Étaient périurbains à caractère agricole, ils se trouvaient derrière les remparts. Le seul espace vert dans la ville se trouvait dans les jardins des maisons et de palais du bey. L'époque coloniale s'est distinguée par une dynamique particulièrement identique à celle de la reconstruction des villes européennes (Benhassine, 2009). L'émergence des espaces verts urbains sous toutes leurs formes (forets urbaines, arbres d'alignements et squares), a été apparue à cette époque. Après l'indépendance, Constantine a connu une évolution urbaine à cadence très rapide. Le processus d'attraction a donné l'exode rural qui provoqua à son tour la crise de logement. Dans l'optique de résorber cette crise, le phénomène de diffusion fait apparition par l'extension de la commune sur la périphérie. Engendrant, ainsi, la rareté des espaces verts dans la proche campagne et dans la ville. Alors, par manque de terrains à urbaniser, la croissance de Constantine durant la décennie 1980 s'est faite en dehors de son périmètre urbain avec la création d'une part, des Z.H.U.N de Békira au Nord, de Zouaghi au Sud et Boussouf à l'Ouest et, d'autre part des lotissements d'habitat individuel implantés sur ces mêmes sites. L'extension urbaine de cette ville s'est poursuivie sans programmation le long des axes de communication. Cet état de fait a engendré une urbanisation favorisant la conurbation avec les centres urbains avoisinants constitués de lotissements privés informels ainsi que de certains nombres de poches d'habitat de type précaire, (ONAMA, Sissaoui, Benchergui, etc....).

Cette croissance urbaine engendre la réduction de la surface vertes, la ville de Constantine comportait plus de 150 hectares des forêts urbaines après l'indépendance, alors qu'actuellement elle ne compte que 50 hectares (quelques foret ont été réduite par leur transformation en terre urbanisées tel que la forêt d'El Mansorah qu'avait une superficie de 61 hectares, alors actuellement elle n'occupe que 7,11hectares, la forêt de Fort dans le secteur de Sidi Mebrouk avait une superficie de 20 hectares, actuellement elle n'occupe que 13 hectares. D'autres forêts ont complètement disparues tel que la forêt de Sidi Djellis qui avait 32 hectares, et la forêt de Sidi M'cid d'une superficie de 8 hectares)

Dans la dernière décennie, cette ville est dotée d'un système végétal à tous les niveaux et échelles dans le cadre d'un PUG (Projet Urbain Global) et un PUL (Plan Urbain Local). Le projet urbain global vise la création des espaces verts périurbains, interurbains et urbains à la ville de Constantine. Alors que le Projet Urbain Local vise la création des parcs de loisir périurbains d'attraction, des parcs zoologiques et aquatiques qui relie le centre urbain de Constantine et les autres centres urbains proches, dans le but est de rendre la ville verte, un

nombre important des espaces vert a été proposé au niveau des équipements collectifs, éducatifs et sanitaires, et des grands ensembles (Benhassine, 2009).

En analysant la couverture végétale de la ville de Constantine, l'approche cartographique nous a permis de faire un inventaire quantitatif pour estimer l'existant, le besoin et le déficit en matière d'espace vert. Notre cas d'étude compte un nombre restreint des jardins et de squares, une surface insuffisante des espaces verts résidentiels qui demeurent non aménagés pour répondre aux besoins des usagers, et un nombre très modestes des aires et plaines de jeux.

Les résultats montrent que le ratio total de l'espace vert urbain (Aires et plaines de jeux, espaces résidentiels plantés, jardins et squares) est de **01,17m²/hab**, **7,98m²/hab** pour les forêts récréatifs et **0,28m²/hab** pour les allées de promenade, un ratio très faibles et demeure très loin de la norme Algérienne qui préconise 6,8 m²/hab pour l'espace vert urbains.

De notre analyse, il ressort que l'ensemble de secteurs urbains connaît un déficit de **1560964m²** soit 156 hectares en matière de jardins, de **283371,8m²** soit **28,33 hectares** en matière d'espaces résidentiels verts et de **2101373m²** soit **210,13 hectares** en matières d'aires de jeux.

Selon la norme édictée par le circulaire interministériel n° 6838, la superficie nécessaire pour atteindre cette norme est de **4732138,8m²** soit **473,21 hectares** pour les espaces verts urbains (Aires et plaines de jeux, espaces résidentiels plantés, jardins et squares) et de **4381610m²** soit **438,16 hectares** en espace vert interurbain (Parcs et forêts de récréation). A travers nos calculs, il ressort que notre ville connaît un déficit estimé à environ **3.945.708,8m²** soit **394,57 hectares** et ça concerne seulement espaces verts inter-quartiers, Quand aux parcs et jardins publics, la surface est largement suffisante pour la population de la ville de Constantine sans prendre en considération la population des autres centres urbains qui les fréquentent.

Pour les allées de promenades, la norme Algérienne préconise **0,5m²/hab**, on a enregistré une longueur de **12,28Km** soit **12280m** et une largeur de 10m aménagé en Berges de Oued, **122800m²** soit un ratio de **0,28m²/hab** qui peut servir au future comme une allée de Promenade.

La télédétection nous a offert un moyen judicieux pour évaluer l'impact de la couverture végétale sur le climat urbain. L'indice NDVI est un bon indicateur pour calculer l'impact de la couverture verte sur la température de surface du sol LST. Nous avons confirmé que la végétation montre une relation négative avec LST, en analysant les cartes de la distribution spatiale de LST, les pics de température sont enregistrés toujours au niveau des surfaces

imperméables et les surface non végétalisées. Les résultats montrent que la température de surface du sol correspond étroitement à la distribution de la couverture végétale. La température de l'air et l'îlot de chaleur urbain diminuent linéairement avec l'augmentation de l'espace vert urbain.

D'un autre part, nous avons estimé l'îlot de refroidissement des espaces verts composants de la couverture végétale de cette ville, et nous avons constaté que les espaces verte ayant la densité et les valeurs de NDVI les plus élevés possèdent l'îlot de refroidissement le plus élevé. Nous confirmons que la végétation forestière dense possède un îlot de refroidissement mieux que celui de la végétation urbaine. Cela indique que l'effet de refroidissement de la végétation ne fonctionne que lorsque la couverture atteint un certain degré (**NDVI > 0,35**). Ils indiquent également qu'un îlot de refroidissement est le résultat agrégé des zones plus froides environnantes, et les effets de refroidissement cumulatifs des espaces verts environnants créent la zone de réduction de température maximale dans l'îlot de refroidissement. En conséquence, l'effet de fraîcheur de la végétation sur la température de l'air et l'îlot de chaleur urbain pourrait toujours être contrôlé car il est déterminé par les différences inhérentes des surfaces sous-jacentes, y compris l'albédo, l'absorption et le stockage de la chaleur, l'évapotranspiration. Ainsi, notre étude confirme que le type et la densité de la végétation, la taille et la forme des espaces verts, sont tous des facteurs importants pour déterminer l'effet de refroidissement qui est un moyen efficace d'atténuer l'effet ICU, de réduire les effets du stress thermique, et fournir un cadre extérieur confortable pour les citoyens.

Les résultats montrent que les surfaces imperméables sont les surfaces les plus chaudes et qui possèdent les températures les plus élevées durant la période d'étude. Les résultats montrent aussi que les espaces verts les plus influents sont la forêt de Djbel El Ouahch et la Forêt de Oued Ziad avec des îlots de refroidissement les plus élevés durant la période d'étude.

En prenant en compte la topographie de la ville de Constantine et l'altitude de chaque forêt, la forêt de Djbel el Ouahch à une altitude qui dépasse 1000m, et qui cause une augmentation de la température et de précipitation par rapport à la zone urbaine, (si on prend en considération l'altitude de cette forêt, en appliquant le coefficient de correction des température) les îlots de refroidissement s'augmentent par **2,42°C**, ce qui rend cette forêt la plus influente par rapport au reste dans la saison chaude. Alors que, durant la saison froide, cette forêt s'est retrouvée exposer au risque de gel, ce qui endommage les arbres qui ne résistent pas.

-La forêt de Djebbas dans le mont de Chattaba et la forêt d'El Mridj se localisent sur une altitude plus de 800m, cette localisation aide à augmenter l'intensité des îlots de refroidissement.

-Tandis que, la forêt de Oued Ziad se localise sur une altitude plus basse (**380m**), cette forêt possède l'indice NDVI et les îlots de refroidissement les plus élevés et les températures les plus basses durant la période d'étude malgré sa densité. Si on applique le coefficient de correction de température et de précipitation, les températures se diminuent par **2,19°C** et les précipitations par **125,6mm**. Mais la situation de cette forêt au bord de Oued Ziad favorise l'augmentation de l'indice NDVI et les îlots de refroidissement par rapport aux autres forêts.

Reliant la télédétection et la théorie des métriques du paysage, la corrélation entre les métriques paysagères et la LST a été étudiée à l'aide de SPSS 26. Nos résultats ont confirmé que la composition et la configuration des espaces verts ont une relation significative et forte avec la distribution spatiale du LST avec R^2 variait entre (**0,052 et 0,382**) et les valeurs P variaient entre (**0,000115 et 0,000490**). Les résultats ont révélé qu'un paysage vert simple, homogène et agrégé était plus efficace. La grande tache verte dominante a eu le plus grand impact sur la LST et la tache verte la plus fragmentée avec des formes compliquées a conduit à une augmentation de la LST.

Toutes les métriques paysagères étaient significativement corrélées avec le LST à différents degrés. Dans l'ensemble, toutes les mesures liées à la zone (**CA, PLAND, MPS et LPI**) étaient toutes négativement corrélées avec le LST, ce qui suggère qu'une couverture relativement plus verte avec des plus grandes taches apporte un effet de refroidissement plus élevé.

Les métriques de complexité de l'indice de forme (**SHAPE_AM et LSI**) étaient positivement corrélées avec LST, suggérant que la couverture verte dans notre zone d'étude avec des formes et des patches plus simples avait un effet de refroidissement plus efficace.

Les métriques de fragmentation et d'agrégation (**PD, NP et AI**) ont indiqué que le paysage vert moins fragmenté (**PD et NP inférieurs**) et le paysage vert plus agrégé (**AI supérieur**) génèrent moins de LST.

Comme dernière étape, nous avons essayé d'évaluer le confort thermique extérieur dans quelques espaces publics à Constantine à savoir : le Jardin de Bachir Bennacer et la place Ahmed Bey en plein centre ville, le parc de Bardo, les deux rues Belouezdad et le Rue Ben Meliek au centre ville aussi, le jardin de Bayrouth à Sidi Mebrouk, et un jardin ainsi qu'une place publique à Zouaghi. Pour attendre l'objectif visé, nous avons fait appel à deux méthode

d'analyse ; la première était le calcul des indices de confort thermique par la simulation, et la deuxième était le questionnaire qui nous a offert un support pour analyser la perception thermique des usagers dans chaque espace.

L'impact de la végétation sur le microclimat a été observé sur tous les paramètres climatiques mesurés ; les résultats enregistrés de la température de l'air montrent que les valeurs journalières les plus faibles sont obtenues aux points plus proches de la végétation. Les valeurs enregistrées les plus élevées de taux d'humidité relative sont obtenues aux points aussi les plus proches de la végétation. Les valeurs faibles de la vitesse de l'air sont obtenues dans les sites dont la couverture végétale est plus dense, dans la comparaison des sites étudiés.

Nous avons enregistré un facteur de vue du ciel qui varie entre 0.105 et 1. Une valeur très grande a été obtenue au niveau des deux places Amed Bey et Zouaghi à cause de la carence en espace vert et tout type d'aménagement.

Les résultats affirment aussi que les valeurs de PMV varient entre **2,9** et **5**. Les valeurs de PET varient entre **35,7°C** et **45,2°C**, les valeurs de SET varient entre **31,5°C** et **39,5°C** et les valeurs d'UTCI varient entre **34,2°C** et **44,1°C**. Les valeurs minimales qui représentent un stress thermique fort ont été obtenues vers les premières heures du matin et dans les espaces bien végétalisés comme le jardin de Bennacer, de Bayrouth et la rue de Belouezdad. Tandis que les valeurs maximales qui représentent un stress thermique extrême ont été obtenues dans les espaces moins végétalisés comme la place de Ahmed bey, le jardin et la place de Zouaghi. Quand au parc de bardo, il a enregistré des valeurs moyennes par rapport aux autres espaces. Donc l'effet de refroidissement de végétation a été détecté fortement au niveau de jardin Bachir Bennacer, le jardin de Bayrouth et la rue de Belouezdad.

L'analyse de la corrélation entre les paramètres climatiques et les indices de confort révèle qu'une relation positive très forte a été établie entre la température de l'air et les différents indices de confort thermique extérieur, nous avons obtenu une progression linéaire avec un coefficient de Pearson $R^2=0,975$ pour le PMV, $R^2= 1$ pour le PET, $R^2=0,818$ pour le SET et $R^2= 0,950$ pour l'UTCI. L'interprétation de ces résultats énonce que l'augmentation de la température de l'air engendre une augmentation des valeurs de PMV, PET, SET et UTCI et vice versa.

Une relation linéaire très faible a été établie entre la vitesse des vents et les indices de confort. Nous avons obtenu une progression linéaire avec un coefficient de Pearson $R^2=0,161$ pour le PMV, $R^2= 0,129$ pour le PET, $R^2=0,023$ pour le SET et $R^2= 0,104$ pour l'UTCI. L'interprétation de ces résultats énonce que la vitesse des vents a un impact très faible sur les

indices de confort, et son augmentation peut causer une faible augmentation des valeurs de ces indices.

Une relation négative très forte a été établie entre l'humidité relative et les différents indices de confort thermique extérieur, nous avons obtenu une régression linéaire avec un coefficient de Pearson $R^2= 0,633$ pour le PMV, $R^2= 0,590$ pour le PET, $R^2= 0,609$ pour le SET et $R^2=0,675$ pour l'UTCI. L'interprétation de ces résultats énonce que l'augmentation de l'humidité relative engendre une diminution des valeurs de PMV, PET, SET et UTCI et vice versa.

Les résultats acquis par le questionnaire affirment les résultats de l'analyse des indices de confort, les usagers interrogés lors de notre étude confirment que le jardin de Bennacer, de Bayrouth sont les espace les plus confortable en montrant un taux de satisfaction très élevé, alors que la place de Ahmed Bey, le jardin de Zouaghi et la place de Zouaghi sont les espace les plus inconfortables en montrant un taux d'insatisfaction très élevé.

En sus de conclusion, il s'avère que, les espaces verts et les plans d'eau en milieu urbain ont des effets évidents sur la réduction de la température de l'air par évapotranspiration. La ville de Constantine renferme un potentiel en terre agricoles et espaces verts qui peuvent servir comme espace publics verts bien structurés afin de combler le déficit actuel et hausser le ratio pour atteindre la norme recommandée. Les espaces verts doivent être uniformément répartis dans toute la ville et la surface totale occupée par les espaces verts de la ville doit être suffisamment grande pour répondre aux besoins de la population de la ville. Il convient de noter que le couvert végétal de la ville de Constantine est un couvert à restructurer notamment au sein de la zone urbaine, à travers le choix du type, de la taille et des formes, sans oublier de donner une importance aux forêts environnantes pour les rendre plus efficaces.

Nous concluons que les méthodes efficaces pour réduire la température de l'air et de surface et offrir un confort thermique extérieur comprennent l'augmentation de la superficie des espaces verts tout en restant en dessous du seuil, l'ajout de la complexité de la forme des espaces verts, la diminution des surfaces imperméables et l'agrandissement de la superficie des plans d'eau. Pour l'environnement environnant des espaces verts, l'augmentation des fractions de végétation et des plans d'eau ou la diminution des surfaces imperméables contribuera à renforcer les effets de fraîcheur. Afin de créer des environnements sains dans les villes futures, une meilleure compréhension de la capacité en eau est nécessaire pour tenter d'obtenir des opportunités pour l'action, ainsi que l'implantation de la végétation aux bords du

des plans d'eau peut augmenter l'intensité des îlots de fraîcheur et réduire le taux de l'humidité.

2-Limites de l'étude :

Cette étude présente plusieurs limites méritant ainsi une analyse plus approfondie et des études supplémentaires:

- La résolution des images satellitaires (30m par pixel) nous a empêchés d'utiliser les outputs de ArcGis comme des inputs dans le logiciel Skyhelios pour nous faciliter le calcul des indices du confort thermique. Des images satellitaires avec une résolution de (1m par Pixel) étaient indispensables pour atteindre l'objectif visé.
- Cette recherche a été menée au cours de l'été pour la ville de Constantine; les résultats peuvent être différents pour d'autres centres urbains proches comme la nouvelle ville Ali Mendjeli et El Khroub.
- Nous n'avons inclus que deux types d'images avec deux résolutions spatiales, ce qui peut ne pas révéler pleinement les effets de la résolution spatiale sur la relation entre la LST et la configuration spatiale de l'espace vert. Les travaux futurs pourraient inclure plus de types d'images avec des bandes multispectrales et panchromatiques pour mieux comprendre les effets de la résolution spatiale sur la relation entre la LST et la configuration spatiale de l'espace vert.
- Du point de vue de l'écologie du paysage, nous n'avons analysé que les effets de la quantité et de la configuration spatiale des espaces verts sur le LST. Le modèle de paysage des autres utilisations des terres et de la couverture terrestre (par exemple, les bâtiments) et les caractéristiques de la végétation des espaces verts (par exemple, l'indice de surface foliaire) peuvent également affecter le LST. La prise en compte des facteurs ci-dessus peut nous aider à mieux comprendre la relation entre le LST et l'espace vert.

3-Futurs axes de recherches

Cette recherche ouvre les portes pour les questions suivantes qui peuvent être des futurs axes de recherche :

- L'application de données de télédétection à plus haute résolution facilite l'étude des caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et du climat urbain. De plus, un futur capteur améliorant les données Landsat et thermiques des avions sont des options possibles. D'autre part, afin de déterminer une variation temporelle du LST en utilisant

des données satellitaires à des temps de passage limités, il semble nécessaire d'utiliser des données de terrain pour étudier l'ICU diurne. Les recherches futures devraient améliorer les méthodes pour dériver la LST à partir des données hyperspectrales TIR, multispectrale-temporelle, TIR-micro-ondes, et les méthodes devraient tenir compte des effets des aérosols.

- En outre, un autre angle viable des études futures devrait se concentrer sur les stratégies d'atténuation des ICU nocturnes et explorer les matériaux de surface qui peuvent réduire la température de surface dans les zones urbanisées des régions sèches. La recherche devrait examiner de plus près différentes parties de la ville. Enfin, la région a besoin de plus de recherche sur les techniques de réduction de la LST dans les zones rurales entourant les villes dans les régions sèches, telles que l'effet de la végétation irriguée pendant la saison sèche et l'augmentation de l'humidité du sol grâce à des cours d'eau artificiels.

Bibliographie

Livres :

- Adams, J B & Gillespie, A R. (2006). Remote Sensing of Landscapes with Spectral Images, A Physical Modeling Approach, Department of Earth and Space Sciences, Cambridge university.
- Baas, A.C.W., (2013). Quantitative modeling of geomorphology. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Baas, A.C.W. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, vol. 2, Quantitative Modeling of Geomorphology, pp. 1–5.
- Bertrand, G. (1975). Pour une histoire écologique de la France rurale, Paris, Le seuil.
- Bonan, G. (2016). Ecological Climatology; Concepts and Applications. 3rd edition, Boulder: University of Colorado.
- Boutefeu, E. (2005). La demande sociale de nature en ville, enquête auprès des habitants de l'agglomération lyonnaise. Editions Puca. Lyon.
- Burel F. et Baudry J. (2003). Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications, 2e éd., Tec & Doc, Paris, 355 p.p45-66,90.
- Camuffo, D. (2014). Microclimate for Cultural Heritage: Conservation and Restoration of Indoor and Outdoor Monuments, Second Edition, ISBN 978-0-444-63296-8, Elsevier B.V. All rights reserved.
- Coombes, A, J. (1993). Les arbres. Paris : Bordas, Collection L'œil Nature. Traduction Isabelle Delvallée, 320 p.
- De Herde A, Liébard A. (2005), Traité d'Architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Editions du Moniteur, Paris, France.
- Deschamps C & Daydé A. (1992). L'aménagement des espaces verts ; conception technique et réalisation, Dossiers d'étude et de travaux, modalités administratives. Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme, service technique d'urbanisme. Edition le Moniteur, Paris.
- Dobesch, H., Dumolard, P., Dyras, I. (2007). Spatial Interpolation for Climate Data : The Use of GIS in Climatology and Meteorology, ISTE Ltd, ISBN 978-1-905209-70-5
- Etzioni A. (1998). The Essential Communitarian Reader, Rowman and Littlefield, Lanham.
- Fanger, P. (1972). Thermal comfort. McGraw Hill. New York:
- Foken, T. (2008) Micrometeorology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Forman R T T & Godron M. (1986). Landscape ecology. John Wiley & sons, New York, USA.
- Franklin S. E. (2001). Remote sensing for sustainable forest management, CRC Press LLC, Taylor & Francis Group, ISBN 1-56670-394-8
- Gillig C, Bourgery C, Amann N. (2008). L'arbre en milieu urbain; conception et réalisation de plantation. Edition Infolio.
- Givoni B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur; Paris,
- Gliessman, S.R. (2015) Agroecology; the ecology of sustainable food systems. 3rd edition. Taylor & Francis Group;
- Gordon B. (2016). Ecological Climatology, Concepts and Applications, Third edition, Cambridge university press.
- Guangxing W & Qihao W. (2014). Remote Sensing of Natural Resources, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1-4665-5693-5
- Harrison, B., and D. Jupp. (2000). Introduction to remotely sensed data, a module of the science of remote sensing. 4th ed., prepared by Committee on Earth Observation Satellites (CNES), the French Space Agency
- Hufty, A. (2001). Introduction à la climatologie, le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine, les presses de l'université Laval, De Boeck université, Bruxelles.

- Jensen, J.R. (2005). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Jensen, J.R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2nd ed., 592. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- LANDSAT 8 data users handbook. (2016). Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Version 2.
- Laureau-Varet, M. (2015). *Biodiversité, trame verte et aménagements urbains ; réponses des assemblages des carabiques et d'araignées dans les haies publiques de Rennes métropole*, presses académiques Francophones, Deutschland, Allemagne.
- Laure C. (2006). *Petit atlas des climats*, 2^{ème} édition, édition Larousse, Paris.
- Legendre, P. & Legendre, L. (1999). *Numerical Ecology*, 2nd Edition, Elsevier Science, New York.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*, 5th ed. John Wiley & Sons Ltd., New York, NY.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman J.W. (2008). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman J.W. (2015). *Remote sensing and image interpretation*, 7th edition, New York: John Wiley & Sons
- Moughtin C & Shirley P. (2005). *Urban Design: Green dimension*,” Published by Elsevier.
- Nicholson, S.E. (2012) *Dryland Climatology*. Cambridge: Florida State University,
- Oke, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York: Methuen, Second edition (first edition 1978).
- Oke, T. R. (2002). *Boundary layer climates*. Routledge.
- Pagny, P. (2000). *La climatologie*. 7e éd. Paris : Presse Universitaire de France, P 127.
- Quezel, P, Medail F. (2003). *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Edit. Elsevier, Paris. 571p.
- Seltzer P (1946) *Le climat de l'Algerie*. Trav.Inst.Météorol. Phys.Globe. Alger. Vol :1. 219p.
- Slater, P.N. (1980). *Remote sensing, optics and optical systems*. Reading : Addison - Wesley,. 575p.
- Stefulesco, C. (1993). *L'urbanisme végétal*. Paris : I.D.F, 323 p.
- Thenkabail, P.S. (2016). *Remote sensing handbook, volume 1: remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies*, United States Geological Survey (USGS), CRC Press, Taylor & Francis Group
- Tso, B & Mather, P.M. (2009). *Classification methods for remotely sensed data*, second edition, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Xian G Z. (2016). *Remote Sensing Applications for the Urban Environment*, CRC Press, Taylor & Francis Group
- Weng, Q. (2009). *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications*, 397. New York: McGraw-Hill

Thèses :

- Ali-Khodja A. (2011), *Espace vert public urbain: de l'historicisme à la normativité*, Thèse de Doctorat, Département d'Architecture et d'Urbanisme, Faculté des Sciences de la Terre et de l'Aménagement du Territoire, Université Mentouri Constantine.
- Athamena K. (2012). *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers*. Architecture, aménagement de l'espace. Ecole Centrale de Nantes. France.
- Ballout, A. (2010). *Le rôle de la végétation et l'eau dans La création d'un microclimat Urbain « cas de la place de ain el fouara à Sétif»*, mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine

- Benmecheta, A. (2016). Estimation de la température de surface à partir de l'imagerie satellitale; validation sur une zone côtière d'Algérie, thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil Val de Marne.
- Boussoualim, Aicha. (2002). Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace public extérieur- Etude de cas à Blagnac -. Architecture, space management. Thèse de doctorat, université de Nantes- Ecole polytechnique de Nantes; Ecole d'architecture de Toulouse, French.
- Bouyer, J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains - Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Energie électrique. Université de Nantes, France.
- Bozonnet, E. (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments « Cas de la rue canyon ». Thèse de doctorat, Sciences de l'ingénieur [physics], génie civile. Université de la Rochelle. Français.
- Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Autre. Université Paris-Est. Français.
- De Munck, C. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), université de Toulouse.
- Djedjig, R. (2013). Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain. Thèse de doctorat, Génie civil. Université de La Rochelle, Français.
- Fensholt, R. (2003). Assessment of primary production in a semi - arid environment from satellite data: exploiting capabilities of new sensors. PhD, Institute of Geography, University of Copenhagen, Denmark. 270p.
- Guechi I. (2018). L'influence des contraintes physiques sur l'urbanisation des établissements humains, cas de l'agglomération de Guelma, thèse de Doctorat, université de Biskra.
- Hanafi A. (2018). le végétal urbain générateur de confort thermique dans les villes sahariennes contemporaines « cas des places publiques de la ville de Biskra/ Algérie », thèse de Doctorat, université de Biskra.
- Jeff F. (2018). Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des ilots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Génie civil. INSA de Toulouse, France.
- Le Bras J. (2015). Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et modélisation, thèse de Doctorat, université de Toulouse.
- Louafi, S. (2013). Impact de la végétation sur la qualité des ambiances thermiques et visuelles dans les espaces publics urbains, thèse de doctorat, université frères Mentouri Constantine.
- Redon E. (2017). Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique. Climatologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III. Français.
- 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, UCL Université catholique de Louvain
- Tebhani. H. (2006). Impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique des espaces urbains publics (cas de cours de la révolution d'Annaba), mémoire de magistère, université frères Mentouri, Constantine.
- 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, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

Articles

- Agam, N., & Berliner P.R. (2006) Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments; a review. *Journal of Arid Environments*. Vol. 65, Issue 4, June 2006: 572–590;
- Akbari H, Davis S, Dorsano S, Huang J, Winert S. (1992). Cooling our communities _ a guidebook on tree planting and white coloured surfacing. USA: US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, 1992.
- Akbari, H. & Kolokotsa, D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. *Energy and Buildings* **133**, 834–842.
- Ali Khoudja A & KHENOUCHE T. (2017). A planning strategy for a green network in the city of Constantine, *International Journal of Human Settlements* Vol. 1. Nr.1.
- Ali Khoudja A. (2010). aménagement urbain : la problématique de l'espace vert public dans la ville de Constantine, *Sciences & Technologie D – N°32*, Décembre (2010), pp. 9-18.
- Altunkasa F. and Uslu, C. (2004). The Effect of Urban Green Spaces in Upper Northern Urban Development Area of Adana (Turkey), *Tubitak Journal*, Vol. 28, pp. 203-209.
- Amani-Beni M., Zhang B., Xie G., Shi Y. (2019). Impacts of Urban Green Landscape Patterns on Land Surface Temperature: Evidence from the Adjacent Area of Olympic Forest Park of Beijing, China, *Sustainability*, 11, 513; doi:10.3390/su11020513.
- Amiri, R., Weng, Q.H., Ali mohammadi, A., Alavipanah, S.K. (2009). Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and land use/cover in the Tabriz urban area, Iran. *Remote Sens. Environ.* 113, 2606–2617.
- Andrade, H. (1998). O desconforto térmico estival em Lisboa. Uma abordagem bioclimática. Finisterra–Revista Portuguesa de Geografia, XXXIII (66): 41-58.
- Andrade, H. (2003). Bioclima humano e temperature do ar em Lisboa Doutorado em Geografia Física. Universidade de Lisboa.
- Aniello, C., Morgan, K., Busbey, A., Newland, L., 1995. Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS. *Comput. Geosci.* 21, 965–969.
- APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme). (2007). Consommation d'énergie et 'émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes. *Atelier Parisien d'Urbanisme: Paris, d'décembre 2007*, 1–46.
- Asgarian A., Amiri B J., Sakieh S. (2014). Assessing the effect of green cover spatial patterns on urban land surface temperature using landscape metrics approach, *Urban Ecosyst*
- ASHRAE. (2010). Thermal environment conditions for human occupancy. *ASI/ASHRAE Standards*, pp. 55–2010.
- Bajsanski I., Milosevic D D., Savic S M. (2015). Evaluation and improvement of outdoor thermal comfort in urban areas on extreme temperature days: Applications of automatic algorithms, *Building and Environment* 94, 632-643.
- Bajsanski I., Stojakovic V., Jovanovic M. (2016). Effect of tree location on mitigating parking lot insolation, *Computers, Environment and Urban Systems* 56, 59–67.
- Baker, W.L., Cai, Y. (1992) The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. *Landscape Ecology*. 7(4), 291–302.
- Balram S. & S. Dragicevic, (2005). "Attitude towards Urban Green Spaces; Integrated Questionnaire Survey and Col-laborative GIS Techniques to Improve Attitude Measurement," *Elsevier: Landscape and Urban Planning*, Vol. 71, No. 2-4, pp. 147-162.
- Barada V, Zdravkovic Z, Segaric N. Activity 5.2 Report: Open Space 1 Survey "Pag Main Square" (Croatia).
- Baret F., Jacquemoud S., and. Hanocq J. F. (1993). The soil line concept in remote sensing, *Remote Sensing Reviews*, vol. 7, no. 1, pp. 65–82.

- Benhassine-Touam N. (2009). Les squares de Constantine; image(s) et pratique, *Sciences & Technologie D – N°29*, Juin (2009), pp. 19-32
- Benhassine-Touam N & Labii B. (2011). Une stratégie verte dans un urbanisme de sante et de bien-être à Constantine : une approche méthodologique. *Sciences & Technologie D – N°33*, Juin (2011), pp. 23-35.
- Benhassine-Touam N. (2011). Trame verte et mobilité verte (tramway), dans une Stratégie verte à Constantine.
- Bernatzky, Aloys. (1982). The contribution of trees and green spaces to a town climate. *Energy and Buildings*, vol.5, 1982, p. 1-10.
- Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A. (2010). Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in european scale. *Misc. Geogr.* 14, 91–102.
- Bogaert J. & Mahamane A. (2005). Ecologie du paysage: cibler la configuration et l'échelle spatiale. *Annales des Sciences Agronomiques du Bénin*, 7 (1): 1-15.
- Bolund P & Sven H. (1999). Ecological Services in Urban Areas,” *Elsevier Sciences: Ecological Economics*, Vol. 29 , pp. 293-301. doi:10.1016/S0921-8009(99)00013-0
- Boudjellal, L., Bourbia, F. (2018). An evaluation of the cooling effect efficiency of the oasis structure in a Saharan town through remotely sensed data. *International Journal of Environmental Studies*, 75(2), 309–320. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.136161>
- Bounoua, L., Hall, F. G., Sellers, P. J., Kumar, A., Collatz, G. J., Tucker, C. J., et al. (2010). Quantifying the negative feedback of vegetation to greenhouse warming: A modeling approach. *Geophysical Research Letters*, 37.
- Brunet Y. (2016). Impact de la végétation sur le microclimat urbain et la qualité de l'air, Colloque Chimie et grandes villes.
- Bruse M., Fleer H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environmental Modelling and Software*, 13 (3-4), , 373-384.
- Cao, X., Onishi, A., Chen, J., Imura, H. (2010). Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landsc. Urban Planning*. 96, 224–231.
- Chang, C.-R.; Li, M.-H.; Chang, S.-D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landsc. Urban Plan.* 2007, 80, 386–395.
- Chatzidimitriou A; Chrissoumaliidou. N; Yannas S. 2006 Ground surface materials and microclimates in urban open spaces, *PLEA*, the 23rd conference, Genève, Suisse, 6-7 September 2006.
- Chen A., Yao X A., Sun R., Chen L. (2014). Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations, *Urban Forestry & Urban Greening* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2014.07.006>.
- Chen, Y., Wong, N.H., (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy Build.* 38, 105–120.
- Cheng, X., Wei, B., Chen, G., Li, J. and Song, C. (2015). Influence of park size and its surrounding urban landscape patterns on the park cooling effect. *Journal of Urban Planning and Development*, **141** (3), A4014002.
- Chun B., Guldmann J M. (2018). Impact of greening on the urban heat island: Seasonal variations and mitigation strategies, *Computers, Environment and Urban Systems* 71 (2018) 165–176.
- Clarke JF. (1972). Some effects of the urban structure on heat mortality. *Environmental Research*; 1972, 5(1): 93–104.
- Coccolo, S., Kämpf, J., Scartezzini, J. L., & Pearlmutter, D. (2016). Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate*, 18, 33–57.
- Coumou, D. & Robinson, A. Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters* 8, 034018 (2013).

- Csillag, F., Kabos, S. (2002) Wavelets, boundaries, and the spatial analysis of landscape pattern. *Ecoscience*. 9, 177–190.
- Daget P. (1977). Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation. *Végétation*. 34 : 1-20.
- Dale, M.R.T. (1999). *Spatial Pattern Analysis in Plant Ecology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Dandan X. and Wenlong L. (2009). Vegetation Index Controlling the Influence of Soil Reflection, Department of Pastrol, *Agricultural Science and Technology*.
- Duarte D. H. S., Shinzato P., dos Santos Gusson C., Abrahão Alves C. (2015). The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate* 14, pp 224–239.
- Dugord, P.-A.; Lauf, S.; Schuster, C.; Kleinschmit, B. (2014). Land use patterns, temperature distribution, and potential heat stress risk—The case study Berlin, Germany. *Comput. Environ. Urban Syst*, 48, 86–98.
- Emberger L. (1942). Un projet de classification des climats du point de vue phytogéographie. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse. France*. 77 : 99-124.
- Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: The Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Build. Environ*. 40, 1591–1601.
- EPA, Reducing Urban Heat Islands: compendium of strategies - Urban Heat Island basic <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm>.
- Eurosurveillance (2005); 10(no. 7–9), Workshops Sustainable & Energy Efficient Building in Africa, Johannesburg, South Africa, 2006.
- Fabbri, K. (2015). Indoor thermal comfort perception. A Questionnaire Approach Focusing on Children. Springer.
- Fanger, P.O. (1970). *Thermal comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*.
- FAO (2016) Physical factors affecting soil organisms. <http://www.fao.org/agriculture/crops/thematic-sitemap/theme/spi/soil-biodiversity/soil-organisms/physical-factorsaffecting-soil-organisms/en/>
- Fauconnier R. (1992). "L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires", *Chauffage Ventilation Conditionnement*
- Fintikakis, N.; Gaitani, N.; Santamouris, M.; Assimakopoulos, M.; Assimakopoulos, D.N.; Fintikaki, M.; Albanis, G.; Papadimitriou, K.; Chryssochoides, E.; Katopodi, K.; et al. (2011). Bioclimatic design of open public spaces in the historic centre of Tirana, Albania. *Sustain. Cities Soc.* 2011, 1, 54–62.
- Forman, R. T. (2014). *Urban ecology: science of cities*. (Cambridge University Press, 2014).
- Forman, R.T.T. (1995). *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Francis C., "People Places; Design Guidelines for Urban Open Space," Second Edition, John Wiley and Sons, Hoboken, 1997.
- Fu, B., Chen, L. (2000) Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*. 44, 291–303.
- Gaffin, S. R., Rosenzweig, C. & Kong, A. Y. Adapting to climate change through urban green infrastructure. *Nature Climate Change* 2, 704 (2012).
- Gagge, A.P, Fobelets, A., Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*; 92: 709–31.
- Gagge, A.P., 1936. The linearity criterion as applied to partitional calorimetry. *Am. J. Physiol.* 116.
- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A., Nishi, Y., 1971. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans.*
- Garc, J., Melia, J., Gilabert, A., & Gonza, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index.

- Remote Sensing of Environment*, 82, 303–310.
- Gates, D. M., H. J. Keegan, J. C. Schleter, and V. R. Weidner. 1965. Spectral properties of plants. *Appl Opt* 4:11–20.
- Gausman, H. W. and W. A. Allen. 1973. Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant Physiol* 52:57–62.
- Georgi, J.N.; Dimitriou, D. (2010). The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece. *Build. Environ.* 2010, 45, 1401–1414.
- Gherraz, H., Guechi, I., & Benzaoui, A. (2018). Strategy to Improve Outdoor Thermal Comfort in Open Public Space of a Desert City, Ouargla, Algeria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 151(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/151/1/012036>
- Gherraz H, Guechi I, Alkama D. (2020). Quantifying the effects of spatial patterns of green spaces on urban climate and urban heat island in a semi-arid climate, *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège* [En ligne], Volume 89 - Année 2020, Articles, 164-185 URL : <https://popups.uliege.be:443/0037-9565/index.php?id=9821>
- Gherraz H & Alkama D. (2020). L'estimation de l'impact des espaces verts et des surfaces d'eau sur le climat urbain et la température de surface du sol (Mila, Algérie), *Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr.*, 64, (2), p. 155–174, București.
- Giannini M. B., Belfiore O. R., Parente C., Santamaria R. (2015). Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 8 (3) (2015) 83-90
- Giridharan, R., Lau, S.S.Y., Ganesan, S., Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: the vegetation influence. *Build. Environ.* 43, 1583–2159.
- Givoni, B. (1963). Estimation of the Effect of Climate on Man: Development of a New Thermal Index.
- Gomez, F. Tamarit, N. Jabaloyes, J. (2001). Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. *Landscape and Urban Planning*, vol.55, n 3, p. 151-161.
- Goto, T., Toftum, J., De Dear, R., Fanger, P.O. (2006). Thermal sensation and thermophysiological responses to metabolic step-changes. *Int.J. Biometeorol.* 50, 323–332.
- Grahn P. and U. A. Stigsdotter, (2003). Landscape Planning and Stress,” *Urban Forest: Urban for Urban Green*, Vol. 2, pp. 001-018.
- Grundström K, Johansson E, Mraissi M, Ouahrani D. (2003). Climat et Urbanisme - La Relation entre le Confort Thermique et la Forme du Cadre Bâti, (Report; Vol. 8). *Housing Development and management*.
- Guyot, G. (1999). *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés*. 2ème ed. Paris: Dunod.
- Hamada, S., Ohta, T., (2010). Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban For. Urban Gree.* 9, 15–24.
- Hanafi. A & Alkama D. (2017). Role of the urban vegetal in improving the thermal comfort of a public place of a contemporary Saharan city, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, *TMREES17*, 21-24, Beirut Lebanon .
- Hassid S, Santamouris M, Papanikolaou N, Linardi A, Klitsikas N, Georgakis C, Assimakopoulos DN. (2000). The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Buildings*, 32: 131–41.
- He, H.S., DeZonia, B.E., Mladenoff, D.J. (2000). An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*.15(7), 591–601.

- Heidt, V & Neef, M. (2008). Benefits of Urban Space for Improving Urban Climate, *Ecology, Planning and Management of Urban Forests: International Perspective*.
- Helpenstein, J., Bauer, L., Claluna, A., Bolliger, J., Kienast, F. (2014) Landscape ecology meets landscape science. *Landscape Ecology*. 29, 1109–1113.
- Herzele V. and T. Wiedeman, “A Monitoring Tool for the Provision for Accessible and Attractive Green Spaces,” *Elsevier Sciences: Landscape and Urban Planning*, Vol. 63, No. 2, 2003, pp. 109–126.
- Hoag, H. (2015). How cities can beat the heat. *Nature* **524**, 402.
- Hongyu, D., Wenbo, C., Yanqing, X., Zhibao, W., Yuanyuan, W., Yongli, C. (2017). Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing Data. *Urban Forestry and Urban Greening*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.008>
- Höppe P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2): 71–75.
- Höppe, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy Build.* 34, 661–665.
- Huang D., C. C. Lu and G. Wang, (2009). Integrated Management of Urban Green Space: The Case in Guangzhou China,” 45th ISOCARP Congress.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, issue 3, pp. 259–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
- Irum S., M. Alamgir, M. Gul and A. Osman. (2002). Perceptions of Community of Madina Town towards the Undeveloped Green Spaces in Madina Town,” *Pakistan Journal of Applied Sciences*, Vol. 2, No. 12, pp. 1099–1101.
- ISO. International Standard 7730. ISO Geneva, revised 1990; 1984.
- Jänicke B., Meier F., Hoelscher M., Scherer D. (2015). Evaluating the Effects of Façade Greening on Human Bioclimate in a Complex Urban Environment. *Advances in Meteorology*, Article ID 747259.
- Jansson, C., Jansson, P.-E. & Gustafsson, D. (2007). Near surface climate in an urban vegetated park and its surroundings. *Theoretical and Applied Climatology* 89, 185–193.
- Jendritzky, G., De Dear, R., Havenith, G., 2012. UTCI-why another thermal index? *Int. J. Biometeorol.* 56, 421–428. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Jendritzky, G., Nübler, W., 1981. A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol.* 29, 313–326.
- Jensen R., H. Haise, Estimating evapotranspiration from solar radiation, irrigation drainage division, American Society of Civil Engineers 89 (1963) 13–41
- Jordan, C. F. “Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor,” *Ecology*, vol. 50, no. 4, pp. 663–666, 1969.
- Jusuf S K, Wong N.H., Hagen E, Anggoro R, Hong Y, The influence of land use on the urban heat island in Singapore, *Habitat International* 31 (2007) 232–242
- Kantor N., Egerhazi L., Unger J. (2012). Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces e part 1: investigations in Szeged, Hungary, *Int. J. Biometeorol.* 56, 1075–1088.
- Kantor N., Unger J., Gulyas A. (2012). Subjective estimation of thermal environment in recreational urban spaces part 2: international comparison, *Int. J. Biometeorol.* 56, 1089–1101.
- Kantor, N., Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment — the mean radiant temperature. *Cent. Eur. J. Geosci.* 3, 90–100. <http://dx.doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>.

- Kariminia S., Ibrahim N., Ahmad S. (2013). Landscape attributes, microclimate and thermal comfort of an urban square in moderate and dry climate, *Advanced Materials Research Vols. 610-613* (2013) pp 3780-3784
- Karnieli A., Agam N., Pinker R. T. et al. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations, *Journal of Climate*, vol. 23, no. 3, pp. 618–633,
- Kaufman, Y.J. and Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 261-270.
- Ketterer C., Matzarakis A. (2014). Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany, *Landscape and Urban Planning* 122, 78– 88
- Ketterer C., Matzarakis A. (2015). Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. *Int J Biometeorol* 59, 1299–1309.
- Kherief, N.S. (2006). Etude de la variété des températures extrêmes et pérennité des arbres urbains dans la région de Constantine. *Mémoire de magister en écologie et environnement*, université Mentouri de Constantine.
- Kong, F., Yin, H., James, P., Hutyra, L. R., & He, H. S. (2014). Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 128, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.04.018>
- Kong, F., Yin, H., Wang, C., Cavan, G., & James, P. (2014). A satellite image-based analysis of factors contributing to the green-space cool island intensity on a city scale. *Urban Forestry and Urban Greening*, 13(4), 846–853. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.009>
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, **15**, 259-263.
- Kurazumi, Y., Fukagawa, K., Yamato, Y., Tobita, K., Kondo, E., Tsuchikawa, T., Horikoshi, T., Matsubara, N., 2011. Enhanced conduction corrected modified effective temperature as the outdoor thermal environment evaluation index upon the human body. *Build. Environ.* 46, 12–21.
- Kurn D.K., S.E. Bretz, H. Akbari, The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling, in: *Proceedings of the 1994 Summer Study on Energy Effects in Buildings*, Pacific Grove, California, 1994.
- Lai D., Guo D., Hou Y., Lin C, Chen Q. (Studies of outdoor thermal comfort in northern China, *Building and Environment* 77, 110-118.
- Laing R., Miller D., Davies M., Scott S., (2006). Urban Green Spaces; The Incorporation of environmental values in a Decision Support System. <http://www.itcom.org/2006/14/>
- LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK, Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Version 2.0, March 29, 2016.
- Le Guay, M, 2010. Le confort thermique dans les lieux de vie,
- Lee H, Mayer H, Chen L. (2016). Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning* 148, 37–50.
- Legendre, P. & Fortin, M.-J. (1989). Spatial pattern and ecological analysis, *Vegetatio* 80, 107–38.
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., and Pearlmutter, D.(2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1377–1393.
- Li J., Song C., Cao L., Zhu F., Meng X., Wu J. (2011). Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: A case study of Shanghai, China. *Remote Sens. Environ.* 2011, 115, 3249–3263.
- Li, B.L & Archer, S. (1997) Weighted mean patch size: A robust index for quantifying landscape structure. *Ecological Modelling*. 102, 353– 361.
- Li, B.L. (2000) Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics. *Ecological Modelling*. 132, 33–50.

- Li, H. & Reynolds, J.F. (1993). A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes, *Landscape Ecology* 8, 155–162.
- Li, H., Wu, J. (2004) Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*. 19(4), 389–399.
- Li, L., Zhou, X., & Yang, L. (2017). The Analysis of Outdoor Thermal Comfort in Guangzhou during Summer. *Procedia Engineering*, 205, 1996–2002.
- Li, X., He, H.S., Bu, R., Wen, Q., Chang, Y., Hu, Y., Li, Y. (2005) The adequacy of different landscape metrics for various landscape patterns. *Pattern Recognition*. 38, 2626–2638.
- Li, X.; Zhou, W.Q.; Ouyang, Z.; Qian, Y.; Zhou, W.Q.; Li, W.; Han, L.; Yu, W.; Pickett, S.T.A.; Li, X.; et al. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution? *Landsc. Urban Plan.* 2013, 114, 1–8.
- Lin T.P., Matzarakis A., Hwang R. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort, *Building and Environment* 45 (2010) 213–221
- Lin, T-P., Matzarakis, A., & Hwang, R. L. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, 45(1), 213-221.
- Liu, X., Li, X., Chen, Y., Tan, Z., Li, S., Ai, B. (2010) A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*. 25(5), 671–682.
- Llauss, A., Nogué, J. (2012) Indicators of landscape fragmentation: The case for combining ecological indices and the perceptive approach. *Ecological Indicators*. 15, 85–91.
- Lobaccaro, G., Acero, J. A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons, *Urban Climate* 14, 251–267.
- Louafi Bellara S., Abdou S. (2012). Effet de l'ombrage sur le confort thermique et visuel dans les espaces extérieurs : cas de l'esplanade de l'Université Mentouri de Constantine, Est de l'Algérie, *Revue Nature & Technologie*. n° 07/Juin 2012 p 26–37
- Louafi Bellara S., Abdou S. (2016). Vegetation effects on urban street microclimate and thermal comfort during overheated period under hot and dry climatic conditions, *Journal of New Technology and Materials JNTM*, Vol. 06, N°02 (2016)87-94
- Loures L., R. Santos and P. Thomas, “Urban Parks and Sustainable Development: The case study of Partimao city, Portugal,” *Conference on Energy, Environment, Ecosystem and Sustainable Development*, Agios Nikolaos, Greece, 2007.
- Lu, J., Li, C., Yang, Y., Zhang, X., Jin, M. (2012). Quantitative evaluation of urban park cool island factors in mountain city. *J CENT SOUTH UNIV* 19, 1657-1662.
- Lucedito P. (2019). Les espaces verts en zone urbaine et périurbaine de la ville du Cap-Haïtien (Haïti) : Typologie, structure et services écosystémiques potentiels, Master de spécialisation en production intégrée et préservation des ressources naturelles, université du Liège.
- Mackey, C. W., Lee, X., & Smith, R. B. (2012). Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, 49, 348e358.
- Manin, Anaïs. Améliorer le climat urbain grâce aux petits espaces verts. *Bulletin Electronique Allemagne*, n°350, 2007.
- Manusset, S., 2010, *Les Bienfaits du Végétal en ville*, Plante et Cité, rapport d'étude.
- Martins, T.A.L., Adolphe, L., Bonhomme, M., Bonneaud, F., Faraut, S., Ginestet, S., Michel, C., Guyard, W. (2016). Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society* 26, 9-26.
- Masakazu I., “Urbanization, Urban Environment and Land Use: Challenges and Opportunities,” *Asia-Pacific Forum for Environment and Development Expert Meeting*, Guilin, 23 January 2003.
- Matzarakis A, Amelung B (2008) Physiological Equivalent Temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In Thomson et al. (Eds.). *Seasonal Forecasts, Climate Changes and Human Health*: 161-172.

- Matzarakis A., Ludwigs A. (2014). Estimation of Thermal Indices in Urban Structures: Simulations by micro scale models, Proceedings of the Third International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, Venice, October 13-15.
- Matzarakis, A. (2015). Developments and applications of thermal indices in urban structures by RayMan and SkyHelios model. 9th International Conference on Urban Climate. Toulouse.
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological Equivalent Temperatures. *International Journal of Biometeorology*, 43: 76-84.
- McGarigal K. & Marks B.J. (1995). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland.
- McGarigal K. & McComb W.C. (1995). Relationships between landscape structure and breeding birds in the Oregon Coast Range, *Ecological Monographs* 65, 235–260.
- McGarigal K., Cushman S.A., Neel M.C., Ene E. (2002). FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer Software Program Produced by the Authors at the University of Massachusetts, Amherst.
- McGarigal, K., Marks, B.J. (1995) FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure.
- Merrouche M. (2011). Microclimat végétation urbaine dans les espaces publics cas : jardin Bennaceur (Constantine) sciences et technologie D- N° 33 p 37-45
- Middel A., Chhetri N., Quay R. (2015). Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forestry & Urban Greening* 14, 178–186.
- Middel, A., Selover, N., Hagen, B., & Chhetri, N. (2016). Impact of shade on outdoor thermal comfort—a seasonal field study in Tempe, Arizona. *International Journal of Biometeorology*, 60(12), 1849–1861. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1172-5>
- Mikami, T., Sekita, Y. (2009). Quantitative evaluation of cool island effects in urban green parks. Japan: *The Seventh International Conference on Urban Climate* 56-63.
- Milosevic D D., Savic S M., Bajanski I. (2017). Applications of automatic algorithms for improvement of outdoor thermal comfort in cities, Urban Transitions Conference, Shanghai, September 2016, *Procedia Engineering* 198, 187 – 192.
- Morakinyo T. E., Lam Y. F. (2016) Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's micro-climate and thermal comfort. *Building and Environment* 103, 262-275.
- Mulla, D. J. “Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps,” *Biosystems Engineering*, vol. 114, no. 4, pp. 358–371, 2013.
- Müller N., Kuttler W., Barlag A.-B. (2014). Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort *Theoretical and Applied Climatology*, 115 (1-2), 243-257.
- Musy. M. (2015). Du Microclimat au bâtiment - Concevoir en milieu urbain : prise en compte des interactions bâtienvironnement urbain, laboratoire CERMA, école nationale supérieure de Nante.
- Myer, W. B. Urban Heat Island and Urban Health: Early American Perspective. *Professional Geographer*, 1991, 43, n°1, 38-48.
- Nagano, K., Horikoshi, T., 2011a. Development of outdoor thermal index indicating universal and separate effects on human thermal comfort. *Int. J. Biometeorol.* 55, 219–227.
- Nagano, K., Horikoshi, T., 2011b. New index indicating the universal and separate effects on human comfort under outdoor and non-uniform thermal conditions. *Energy Build.* 43, 1694–1701.
- Nazarian N., Fan J., Sin T., Norford L., Kleissl J. (2017). Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature, *Urban Climate* 20, 251–267.

- Neuvonen M., T. Sievanen, T. Susan and K. Terhi, "Access to Green Areas and the Frequency of Visits: A Case Study in Helsinki," *Elsevier: Urban Forestry and Urban Greening*, Vol. 6, No. 4, 2007, pp. 235-247.
- Nikolopoulou M., Steemers K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energ Buildings* 35(1):95–101. doi:10.1016/S0378-7788(02)00084-1
- Nikolopoulou, M., Baker, N., Steemers, K., 2001. Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Sol. Energy* 70, 227–235.
- Noon B.R., Dale V.H. (2002). Broadscale ecological science and its application. In: *Applying landscape ecology in biological conservation*. Eds. Gutzwiller K.J., pp.34-52. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Oguz D. (2000). User Survey of Ankara's Parks," Elsevier Science: *Landscape and Urban Planning*, Vol. 52, No. 2, pp. 165-171.
- Oke, T.R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations ». In : *Journal of climatology* 1.3 , p. 237–254.
- Oke, T.R., 1973. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7, 769–779.
- Oke, T.R., Hannel, F.G., 1970. The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. WMO Tech. Note No. 108, WMO No. 254 TP 141, pp. 113–126.
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, 46(11): 2186–2194.
- Opdam, P., Verboom, J., Pouwels, R. (2003) Landscape cohesion: An index for the conservation potential of landscapes for biodiversity. *Landscape Ecology*. 18, 113–126.
- Otsu, N., 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 9, 62–66.
- Perini K., Chokhachian A., Dong S., Auer T. (2017). Modeling and Simulating Urban Outdoor Comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by Grasshopper, *Energy and Buildings* <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.061>
- Peron F., De Maria M.M., Spinazzè F., Mazzali U. (2015). An analysis of the urban heat island of Venice mainland. *Sustainable Cities and Society* 19, 300–309.
- Pickup, J., De Daer, R., 1999. An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*) - part I - the model and his assumptions. 15th *International Congress of Biometereology and International Conference on Urban Climatology*, p. 83.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete., A. R., Kerr, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing and Environment.*, 48(2), 119–126.
- Rasul, A., Balzter, H., & Smith, C. (2015). Spatial variation of the daytime Surface Urban Cool Island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14, 176–186.
- Razagui, A., Bachari, N.E.I. (2014). Analyse spatio-temporelle de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des images satellites NOAA et MSG. *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 17 N°3 (2014) 497 – 506.
- Razzaghamanesh M, Beecham S, Salemi T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening* 15, 89–102.
- Rchid, A. The effects of green spaces (Palme trees) on the microclimate in arides zones, case study: Ghardaia, Algeria. *Energy Procedia* 18, 10–20 (2012).
- Richards, K. (2004) Observation and simulation of dew in rural and urban environments. *Progress in Physical Geography*, 28 (2004): 76–94.
- Richardson A. J. and C. Weigand, "Distinguishing vegetation from soil background information," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, p. 43, 1977.

- Rizwan, A.M. DENIS, Y.C. Leung. LIU, Chumbo. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, vol.20, p. 120-128.
- Roudsari M S., Pak M. (2013). Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design, 13th conference of international building performance simulation association, Chambréy, France, August 26-28.
- Sahnoune S & Benhassine N. (2017). Quantifying the impact of green-roofs on urban heat island mitigation,
- Salatta F., Golasi L., de Lieto Vollaro R., de Lieto Vollaro A. (2016). Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area. A transversal study in Rome, Italy, *Building and Environment* 96, 46-61
- Sangkertadi, A. (2012). Field study of outdoor thermal comfort in the warm-humid environment, in: International Conference “Conveesh 2nd & Senvar 13th” Yogyakarta, 29 November 2012.
- Sarrat C, Lemonsu A, Masson V, Guedalia D. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment* 2006; 40(10): 1743–58.
- Seneviratne, S.I., T. Corti, E.L. Davin, M. Hirschi, E.B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky & A.J. Teuling (2010) Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth-Science Reviews*. Vol. 99. Issue 3-4, May 2010: 125–161;
- Shahidan M F Mustafa K M S and Elias S 2007 Effects of tree canopies on solar radiation filtration in a tropical microclimatic environment *PLEA 2007 conference* Singapore.
- Skelhorn C., Lindley S., Levermore G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK *Landscape and Urban Planning*, 121, 129-140.
- Sodoudi S., Shahmohamadi P., Vollack K., Cubasch U., Che-Ani A. I. (2014). Mitigating the Urban Heat Island Effect in Megacity Tehran. *Advances in Meteorology*, Article ID 547974.
- Sorensen M., J. Smit, V. Barzetti and J. Williams, “Good Practices for Urban Greening,” Inter-American Development Bank, 1997.
- Spagnolo, J., de Dear, R., 2003a. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Build. Environ.* 38, 721–738.
- Spagnolo, J.C., de Dear, R.J., 2003b. A human thermal climatology of subtropical Sydney. *Int. J. Climatol.* 23, 1383–1395. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.939> .
- Spronken-Smith, R. & Oke, T. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International journal of remote sensing* 19, 2085–2104 (1998).
- Sripada R. P., Heiniger R.W., White J. G, and Weisz R., “Aerial color infrared photography for determining late-season nitrogen requirements in corn,” *Agronomy Journal*, vol. 97, no. 5, pp. 1443–1451, 2005.
- Stanhil G., G.H. Hofstede, J.D. Kalma, Radiation balance of natural and agricultural vegetation, *Quarterly Journal of Royal Metal Society* 92 (1966) 128–140.
- Stathopoulos T., Wu H., Zacharias J. (2004). Outdoor human comfort in an urban climate, *Build. Environ.* 39, 297e305.
- Stein T., Lee M., “Managing Recreation Resources for Positive Outcomes: An Application of Benefits Based Management,” *Park and Recreation Administration Journal*, Vol. 13, No. 3, 1995, pp. 52-70.
- Sun, R. & Chen, L. Effects of green space dynamics on urban heat islands: Mitigation and diversification. *Ecosystem Services* 23, 38–46 (2017).
- Taha H. Meteorological and photochemical simulations of the south coast air basin. In: Taha H ed. Analysis of energy efficiency of air quality in the south coast air basin—Phase II. Report No. LBL-35728, Chapter 6. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Laboratory, 1994: 161–218.
- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., Huang, J. (1988). Residential cooling loads and the urban heat island the effects of Albedo. *Build. Environ.* 23, 271–283.

- Tanré, D. Deroo, C. Duhaut P. et al., “Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no. 4, pp. 659–668, 1990.
- TESTO. TESTO 480 Climate Measuring Instrument. Available online: <https://staticintesto.com/media/cf/01/1ff8d8380280/testo-480-Instruction-manual.pdf>
- Tiangco, M., Lagmay, A.M.F., Argete, J. (2008). ASTER-based study of the night-time urban heat island effect in Metro Manila. *Int. J. Remote Sens.* 29, 2799–2818.
- Troll C. (1939). Luftbildplan und ökologische Bodenforschung. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* : 241-298.
- Tsilini V., Papantoniou S., Kolokotsa D., Maria E. (2014). Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. *Sustainable Cities and Society* 14 323–333.
- Turner, M.G. (1989). Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20:171-197.
- Turner, M.G. (1990) Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology*. 4(1), 21–30
- Tuzin B., Leeuwen E, Rodenburg C. and Peter N., Paper presented at the 38th International Planning Congress on “The Pulsar Effect” Planning with Peaks, Glifada, Athens, 21-26 September 2002.
- Uuemaa, E., Antrop, M., Marja, R., Roosaare, J., Mander, Ü. (2009) Landscape Metrics and Indices : An Overview of Their Use in Landscape Research Imprint / Terms of Use. *Living Reviews in Landscape Research*. 3, 1–28.
- VDI. Methods for the human biometeorological evaluation of climate and air quality for the urban and regional planning. Part I: climate. VDI guideline 3787, Part 2. Berlin: Beuth; 1998.
- Voogt, J.A., 2004. Urban heat islands: hotter cities. (17 July 2016). www.actionbioscience.org/environment/voogt.html
- Weier, J., Herring, D. (2000). Measuring vegetation (NDVI & EVI), August 3, <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation>
- Weng Q., Lu D., Schubring J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment* 89 (2004) 467–483.
- Wu Z., Zhang Y. (2018). Spatial Variation of Urban Thermal Environment and Its Relation to Green Space Patterns: Implication to Sustainable Landscape Planning
- Wu, J. (2004) Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations. *Landscape Ecology*. 19(2), 125–138.
- Wu, Weicheng. (2014).The generalized difference vegetation index (GDVI) for dry land characterization. *Remote Sensing* 6 (2), 1211-1233.
- Xi T., Li Q., Mochida A., Meng Q. (2012). Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas, *Build. Environ.* 52 162e170.
- Xion-Jun, W. “Analysis of Problems in Urban Green Space System Planning in China,” *Journal of forestry Research*, Vol. 20, No. 1, 2009, pp. 79-82.
- Xue S., Xiao Y. (2016). Study on the Outdoor Thermal Comfort Threshold of Lingnan Garden in Summer, 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island (UHI), *Procedia Engineering* 169, 422 – 430
- Yu, Z., Guo, X., Jørgensen, G. & Vejre, H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities? *Ecological Indicators* 82, 152–162.
- Yuan, F., Bauer, M.E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* 106, 375–386.

- Zhang B, D. Wu, L. Zhang, Q. Jiao, and Q. Li, "Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas," *Environmental Earth Sciences*, vol. 65, no. 3, pp. 649–658, 2012.
- Zhang, Y., Zhan, Y., Yu, T., & Ren, X. (2017). Urban green effects on land surface temperature caused by surface characteristics: A case study of summer Beijing metropolitan region. *Infrared Physics and Technology*, 86, 35–43.
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B. & Oleson, K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature* 511, 216–219, <https://doi.org/10.1038/nature13462> (2014).
- Zhou, W., Huang, G., Cadenasso, M.L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landsc. Urban Plan.* 2011, 102, 54–63.
- Zhou, W., Wang, J. & Cadenasso, M. L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: A comparative study. *Remote Sensing of Environment* **195**, 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.043> (2017).

-Cours

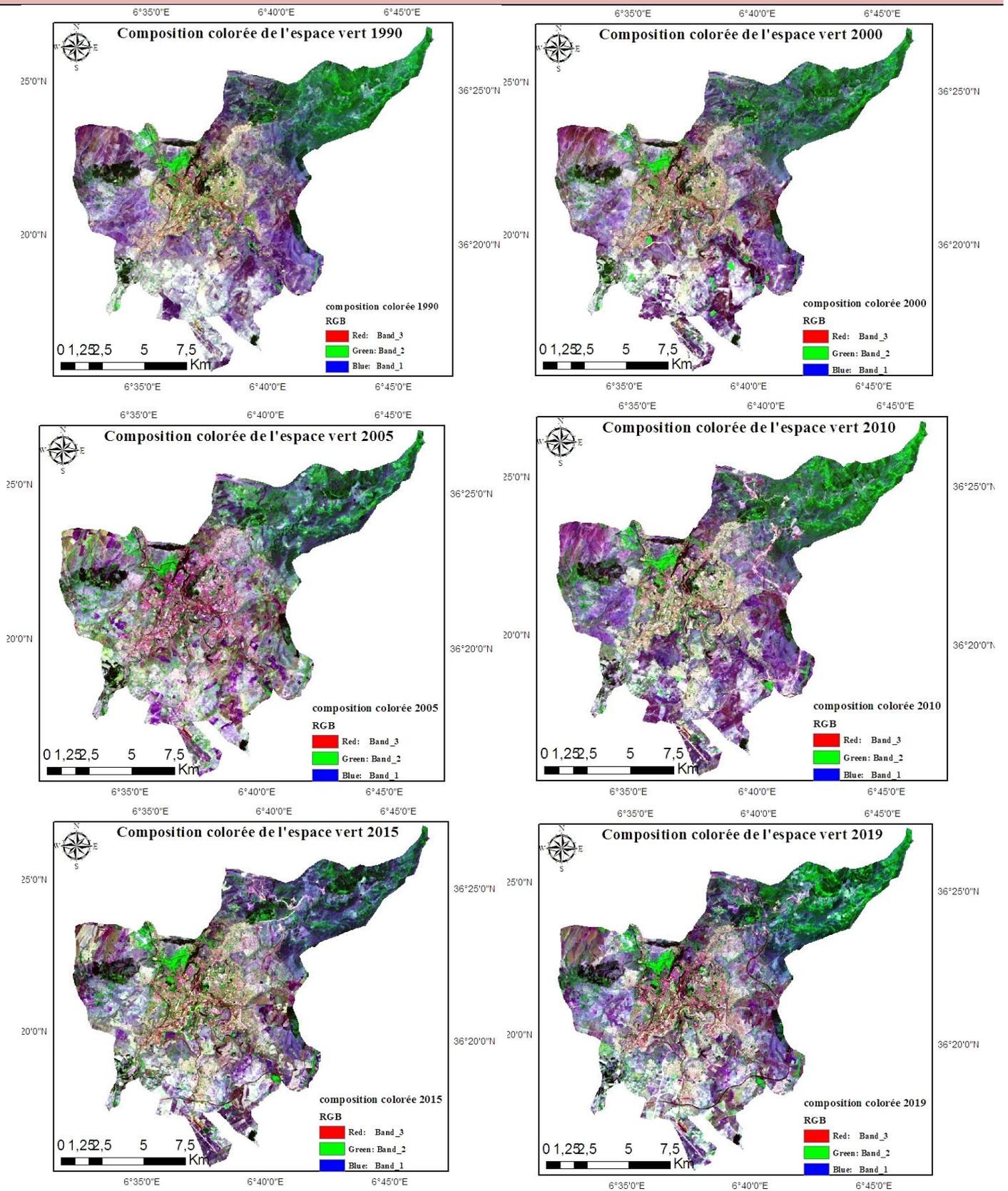
- Anselme B & Gadal S. 2008. EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection, cours de Master 2, géographie et sciences de la terre, université de Paris 1.
- Mili M, (2018). Espaces verts, polycopies de cours, Institut de Gestion des Techniques Urbaines, Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Webographie

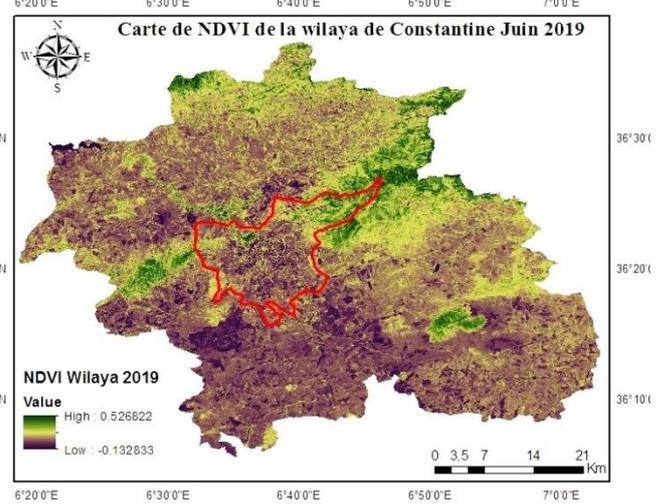
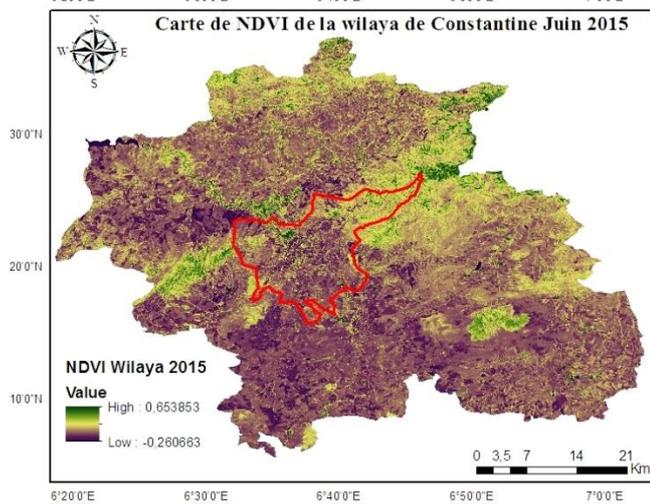
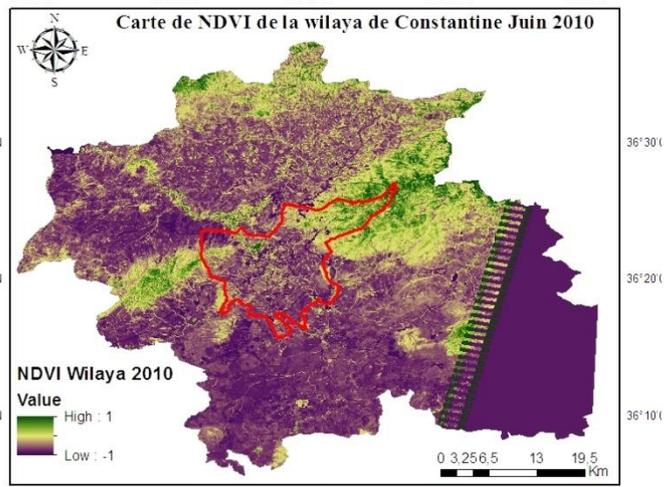
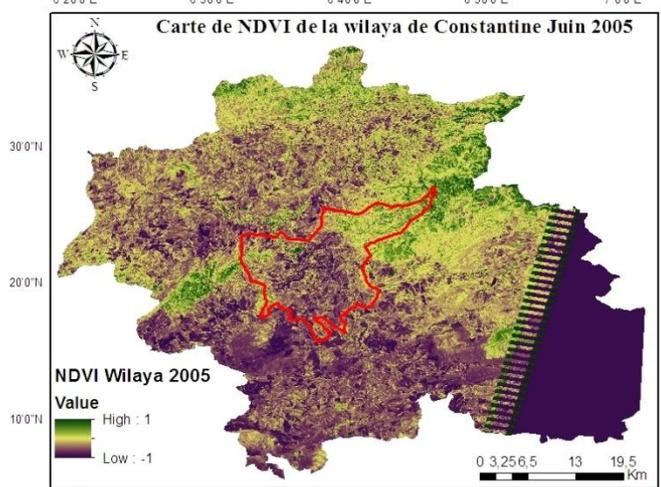
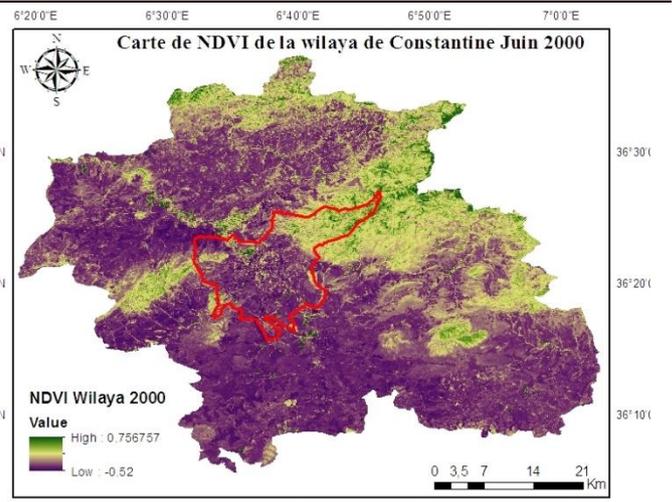
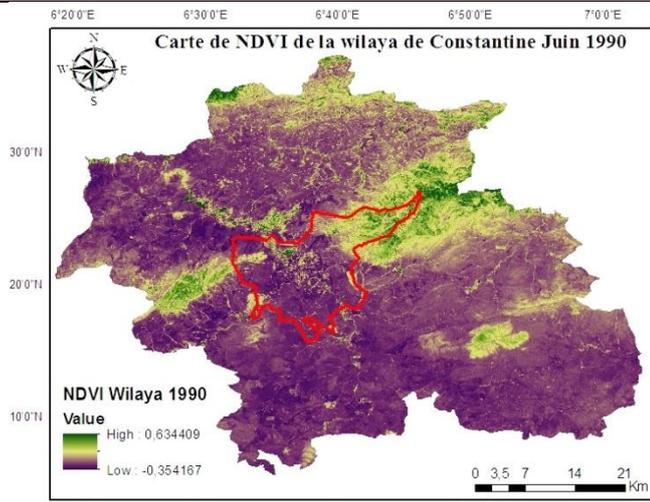
- <https://www.gammvert.fr/2-1212-plantes-dexterieur/2-3082-plantes-grimpantes> consulté le 15 juin 2019 à 10 :19.
- <https://www.aquaportail.com/definition-13498-couvre-sol.html> consulté le 15 juin 2019 à 10 :30.
- <https://www.18h39.fr/articles/les-cles-pour-avoir-une-belle-pelouse.html> consulté le 15 juin 2019 à 10 :30.
- <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensing> consulté le 23 octobre 2019.
- [https://rp5.ru/Archives_m%C3%A9t%C3%A9o_%C3%A0_Constantine_\(a%C3%A9roport\),_META_R](https://rp5.ru/Archives_m%C3%A9t%C3%A9o_%C3%A0_Constantine_(a%C3%A9roport),_META_R) consulté le 30/11/2019.
- <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article199> consulté le 01/04/2020 à 14h
- <https://www.envi-met.com> consulté le 01/04/2020 à 10h
- <https://aau.archi.fr/creneau/solene/> consulté le 02/04/2020
- https://solenemc.hypotheses.org/exemples_de_resultats consulté le 02/04/2020
- <http://docplayer.fr/10076900-Confort-thermique-dans-les-lieux-de-vie-auteur-michel-le-guay.htmlpdf> (consulté le 05/07/2019)
- www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html consulté le 10/01/2020
- <https://www.trfihi-parks.com/en/park-details/4829-El-Meridj> consulté le 02/03/2020
- <https://www.trfihi-parks.com/en/park-details/4811-Atlasliat-jabal-alwahsh-park> consulté le 02/03/2020
- <https://www.facebook.com/BladyAljzayrNhbhaWnhbAllyYhbha/> consulté le 02/03/2020
- <https://www.facebook.com/AlgerieCartesPostalesAnciennes/> consulté le 10/03/2020
- <https://www.judaicalgeria.com/pages/constantine.html> consulté le 02/04/2020
- <http://www.constantine-hier-aujourd'hui.fr/> consulté le 12/04/2020
- <https://palaisdumaghreb.wixsite.com/epoqueottomane/palais-ahmed-bey-constantine> consulté le 02/08/2019
- <http://cnra.dz/atlas/palais-ahmed-bey/> consulté le 02/09/2019

Annexe 1

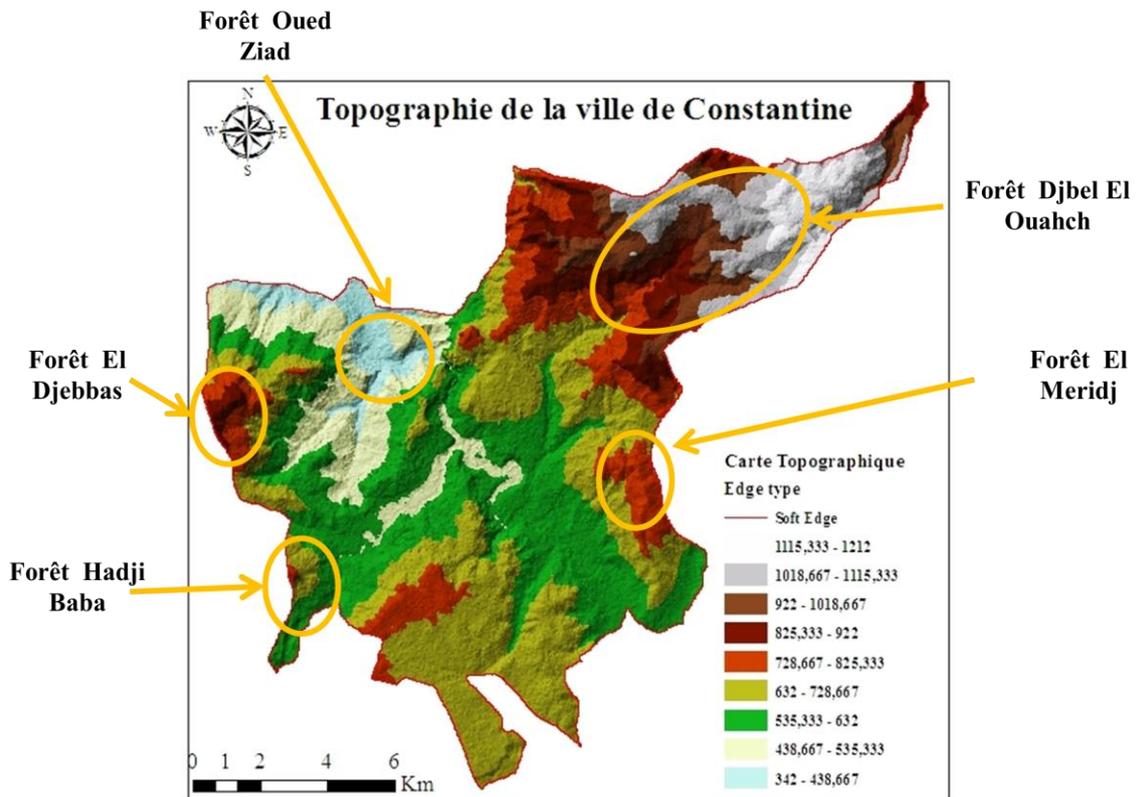
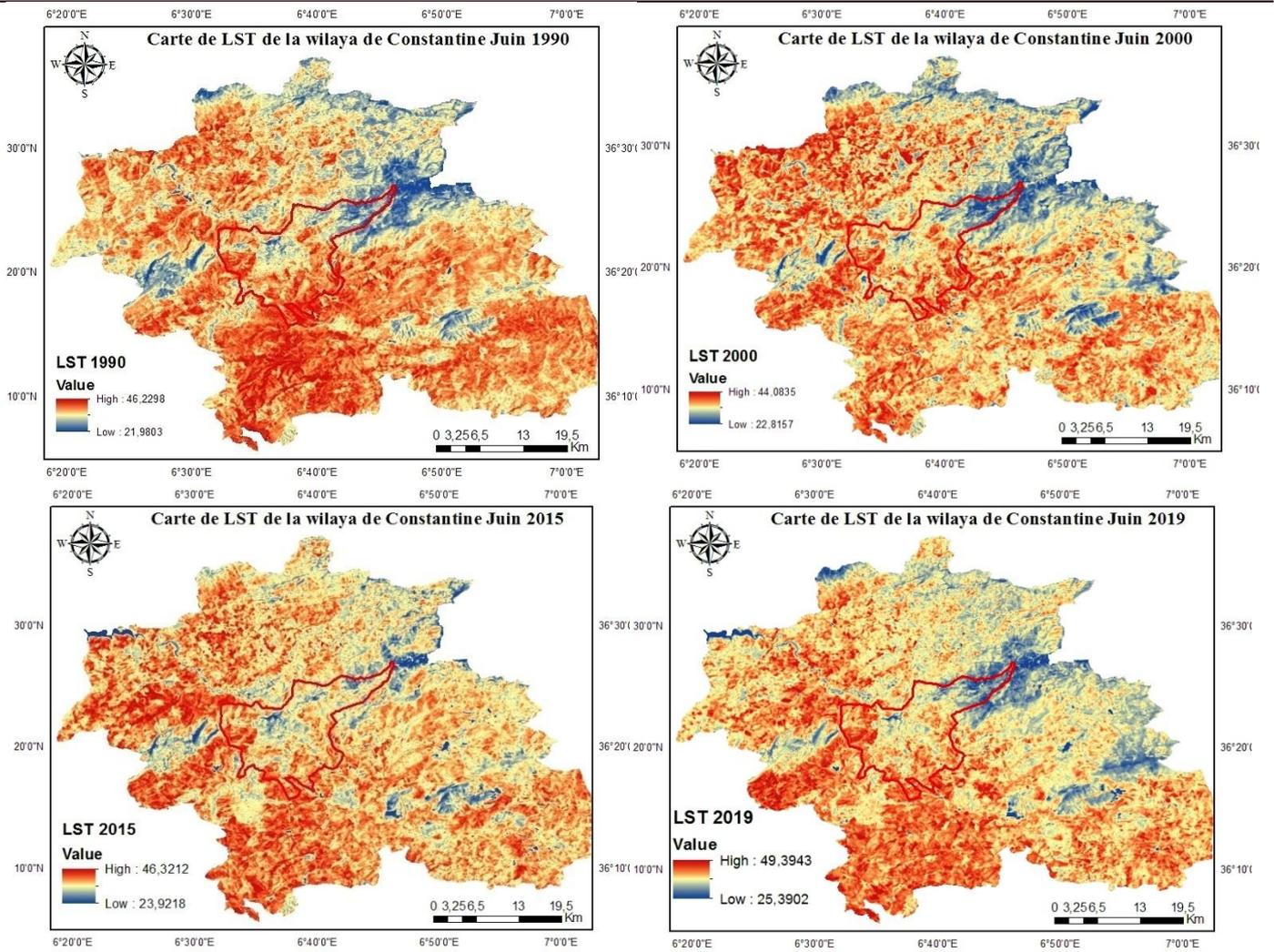
ANNEXE 1



ANNEXE 1



ANNEXE 1



Carte de localisation des forêts de Constantine et leurs altitudes

Annexe 2

ANNEXE 2

Tableau 1 : Caractéristique du Testo 480

Source : <https://static-int.testo.com/media/cf/01/1ff8d8380280/testo-480-Instruction-manual.pdf>

Fonctionnalité	valeurs
Paramètres de mesure	<ul style="list-style-type: none"> • Température (° C, ° F, différence - ° C, différence - ° F) • Humidité (% HR, td ° C, td ° F, bulbe humide ° C, bulbe humide ° F, g / m³, g / pi³, g / kg, g / lb, kJ / kg, BTU / lb, ppm, Vol%) • Vitesse d'écoulement (m / s, ft / m) • Pression (Pa, hPa, mbar, kPa, bar, psi, inH₂O, inHg, mmH₂O, Torr) • CO₂ (ppm, vol%) • Lux (Lux, footcandle)
Connexions du capteur	<ul style="list-style-type: none"> • 2x température (TC type K) • 1x pression différentielle • 3x sondes numériques (débit, humidité, température, CO₂, Lux, pression absolue)
Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> • Mini USB • Infrarouge pour l'imprimante de rapports Testo • Carte SD • Connexion secteur
Capacité mémoire interne	1,8 Go (environ 60 000 000 valeurs de mesure)
Autonomie de la batterie rechargeable	Environ. 17 h (instrument à main sans sonde avec 50% de luminosité de l'écran)
Cycle de mesure	0,5 s
Température de fonctionnement	0 à +40 °C
Température de stockage	-20 à +60 °C
Dimensions	81 mm x 235 mm x 39 mm
Poids	Environ. 435 grammes
Température (TC type K; mesure du point de référence interne: plage de mesure 0 à +40 ° C, précision ± 0,5 ° C)	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de mesure: -200,0 à +1370,0 ° C • Précision: ± (0,3 ° C + 0,1% de la valeur de mesure) • Résolution: 0,1 ° C • Les informations de précision s'appliquent dans un état de température ajusté et stable. Le branchement du bloc secteur, la charge de la batterie ou l'ajout de sondes numériques peuvent le déformer temporairement et des erreurs supplémentaires peuvent survenir.
Pression différentielle	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de mesure: -100 à +100 hPa • Précision1: 0 ... + 25 hPa: • ± (0,3 Pa + 1% de la valeur de mesure) • +25,001 à + 100hPa: ± (0,1 hPa + 1,5% de la valeur de mesure) • Résolution: 0,001 hPa • La spécification de précision s'applique immédiatement après la mise à zéro du capteur. Pour les mesures à long terme, il est recommandé de fonctionner sur secteur avec une batterie complètement chargée. • Coefficient de température: <0,01% FS / K typique
Pression absolue	<ul style="list-style-type: none"> • Plage de mesure: +700 à +1100 hPa • Précision: ± 3 hPa • Résolution: 0,1 hPa



Figure : un Testo 480 (<https://static-int.testo.com/media/cf/01/1ff8d8380280/testo-480-Instruction-manual.pdf>)

Annexe 3

ANNEXE 3

Questionnaire sur les espaces publics verts de la ville de Constantine

Espace :

Formulaire n° :

Ce questionnaire est établi dans le cadre de préparation d'une thèse de Doctorat en Science en architecture (option : les établissements humains dans les villes arides et semi arides), intitulé :

L'impact de l'espace vert sur le microclimat urbain et l'utilisation des espaces extérieurs « Cas de la ville de Constantine. »

-Ce questionnaire contient des questions sur différents espaces publics de Constantine

Nous rappelons que :

-Ce questionnaire ne sera utilisé que pour la préparation de notre thèse.

-Cochez la question que vous sélectionnez.

Nous vous remercions de bien vouloir participer à cette enquête, L'aboutissement de ce travail dépend de votre aide et coopération, nous espérons avoir des réponses claires et authentiques.

-Nous vous demandons de répondre aux questions rapidement, le plus naturellement et de la manière la plus intime possible pour vous.

Toutes vos réponses seront prises avec anonymat, **Merci beaucoup**

ANNEXE 3

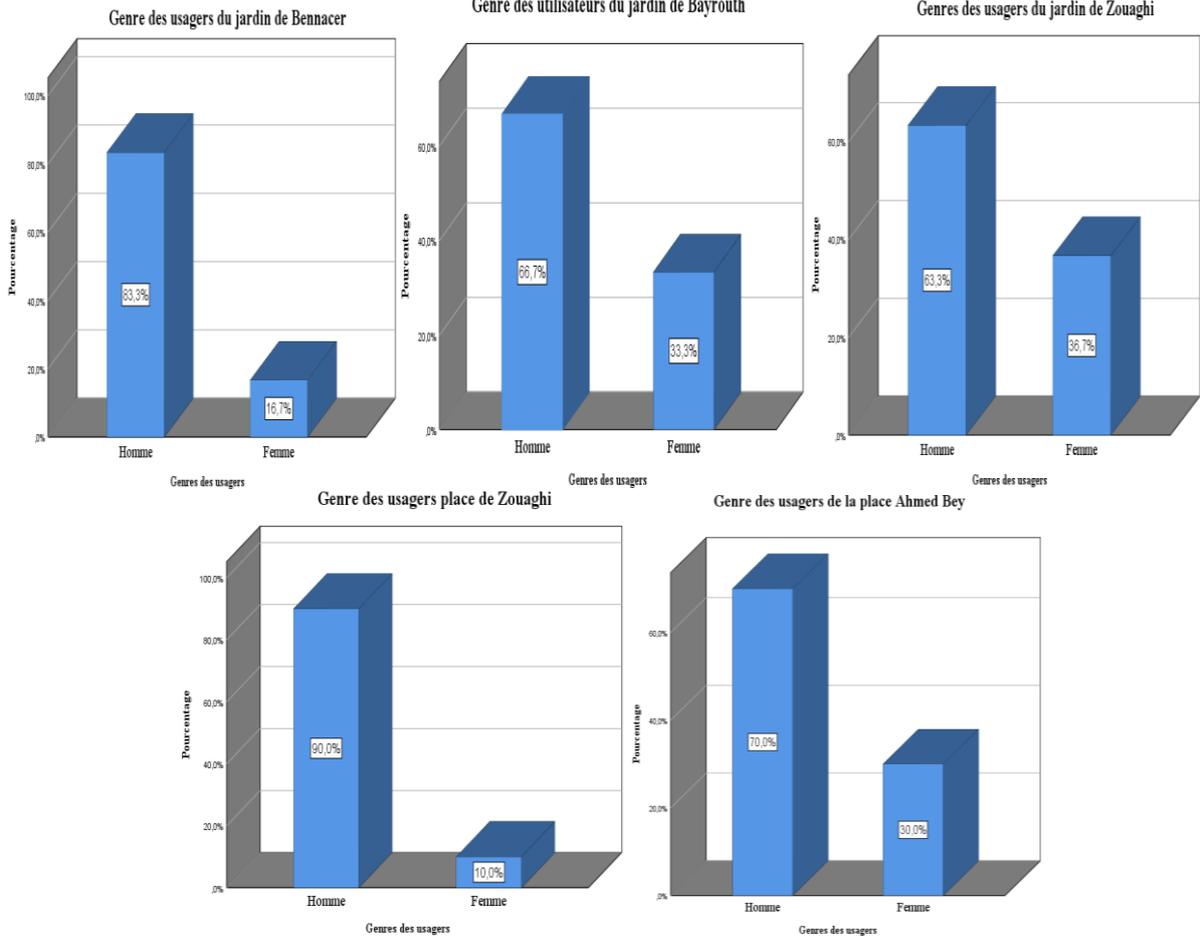
Date :/...../.....

Heure :

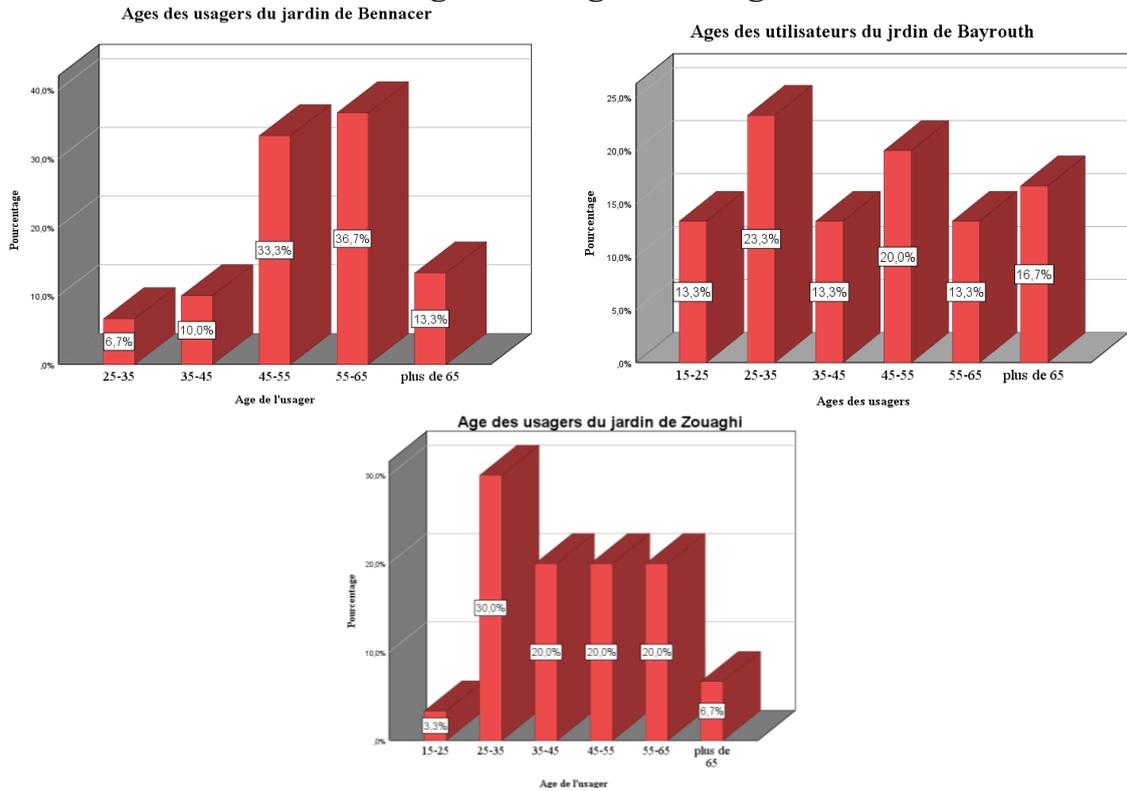
1	Sexe <input type="checkbox"/> Masculin <input type="checkbox"/> Féminin
2	Age : <input type="checkbox"/> 15-25 <input type="checkbox"/> 25-35 <input type="checkbox"/> 35-45 <input type="checkbox"/> 45-55 <input type="checkbox"/> 55-65 <input type="checkbox"/> plus de 65
3	La taille
4	Le poids
5	Lieu de résidence <input type="checkbox"/> Vous habitez proche de là <input type="checkbox"/> Vous travaillez proche de là <input type="checkbox"/> Vous êtes passager
6	-Votre activité dan la dernière demi-heure était : <input type="checkbox"/> Dormir <input type="checkbox"/> Asseoir <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Marcher <input type="checkbox"/> Faire de sport <input type="checkbox"/> Autres (préciser)
7	-Votre activité actuelle <input type="checkbox"/> Dormir <input type="checkbox"/> Asseoir <input type="checkbox"/> Debout <input type="checkbox"/> Marcher <input type="checkbox"/> Faire de sport <input type="checkbox"/> Autres (préciser)
8	-Comment vous vous sentez actuellement Chaud Tiède Légèrement Tiède Confortable Légèrement Frais Frais Froid +3 +2 +1 0 -1 -2 -3
9	pouvez-vous accepter cette sensation thermique (acceptation thermique) <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
10	-Comment trouvez-vous la Température de l'air Très Chaud Chaud Légèrement chaud Confortable Légèrement froid Froid Très Froid +3 +2 +1 0 -1 -2 -3
11	Comment préféreriez-vous avoir la température <input type="checkbox"/> plus chaude <input type="checkbox"/> pas de changement <input type="checkbox"/> plus Froide
12	-Comment trouvez-vous la Vitesse de l'air Très Forte Forte Légèrement Forte Confortable Légèrement lente Lente Très Lente +3 +2 +1 0 -1 -2 -3
13	-Comment préféreriez-vous avoir la vitesse de l'air <input type="checkbox"/> plus Forte <input type="checkbox"/> pas de changement <input type="checkbox"/> plus Faible
14	-Comment trouvez-vous l'humidité Relative Très humide Humide Légèrement humide Confortable Légèrement sec Sec Très Sec +3 +2 +1 0 -1 -2 -3

Annexe 4

1-Genre des usagers

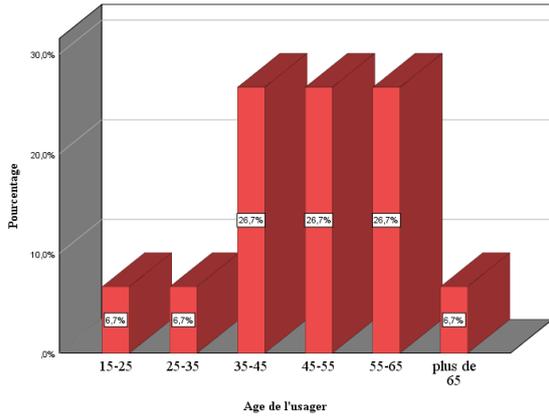


2-Catégories d'âge des usagers

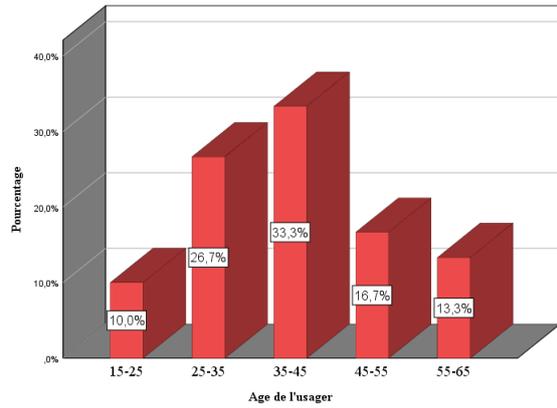


ANNEXE 4

Age des usagers de la place Ahmed Bey

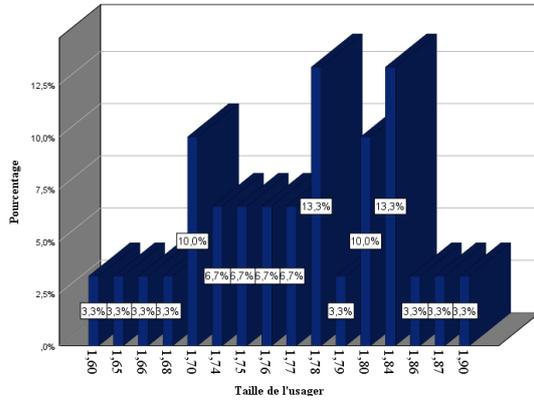


Age des usagers de la place de Zouaghi

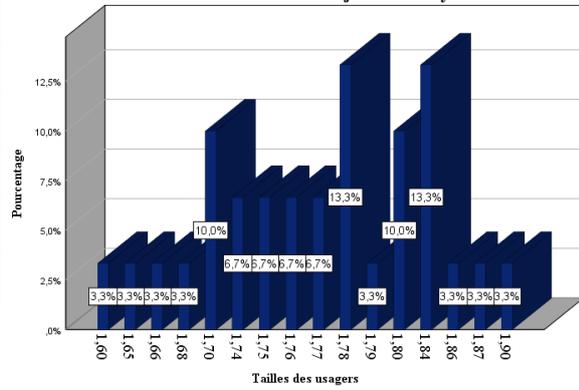


3- Les Tailles des usagers

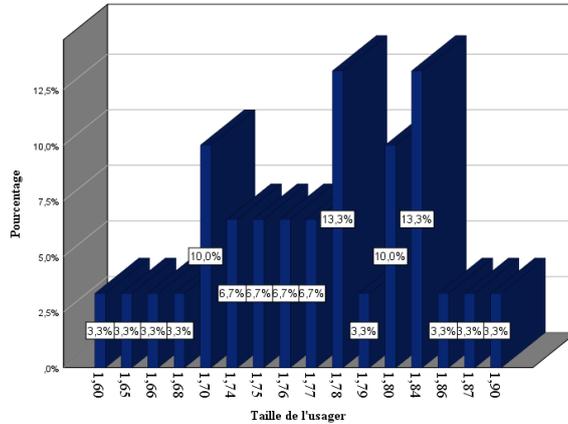
Tailles des usagers du jardin de Bennacer



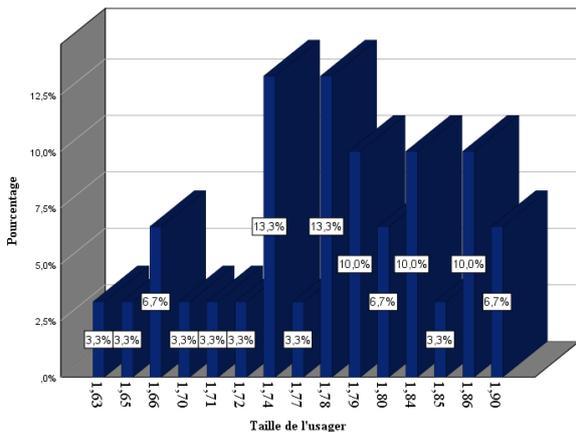
Tailles des utilisateurs du jardin de Bayrouth



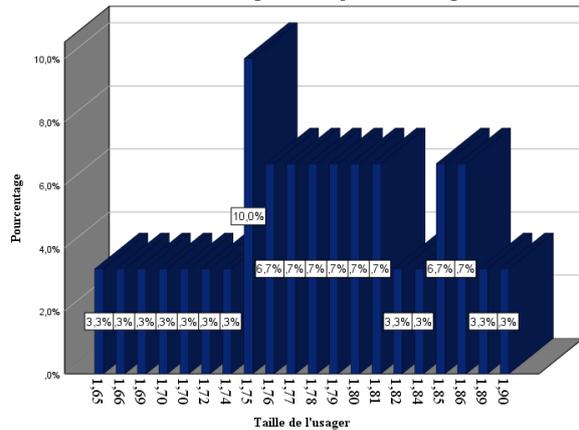
Tailles des usagers du jardin de Zouaghi



Tailles des usagers de la place Ahmed Bey

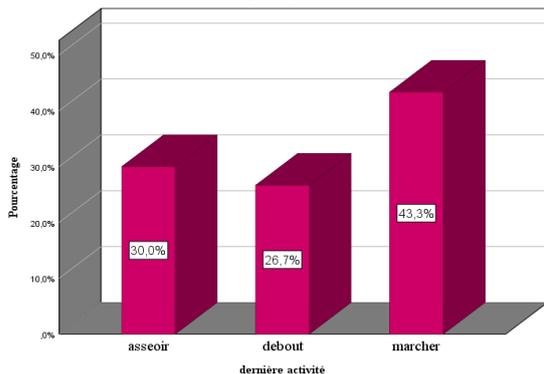


Tailles des usagers de la place de Zouaghi

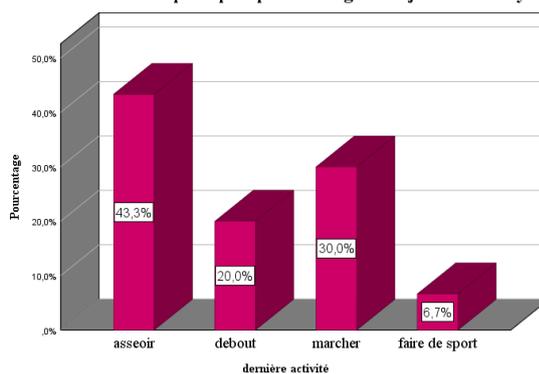


ANNEXE 4

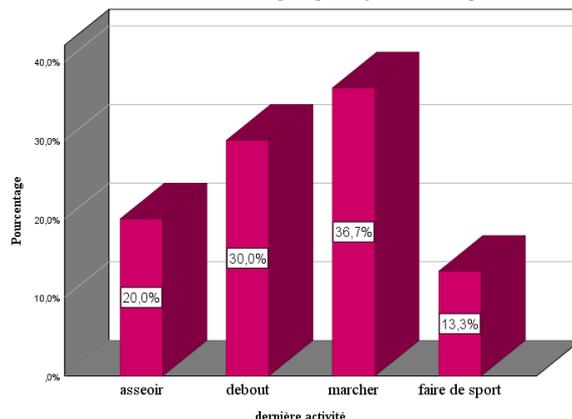
Dernières activités pratiquées "jardin Bennacer"



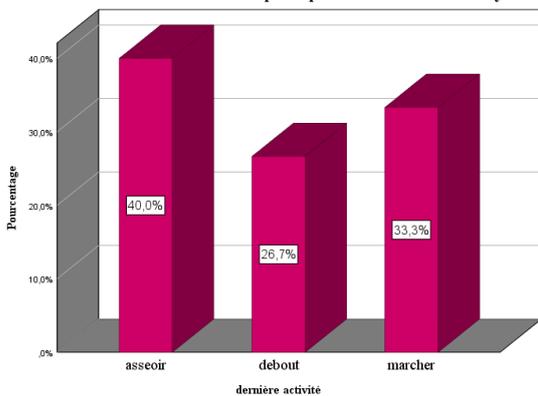
Dernière activité pratiquée par les usagers du jardins de Bayrouth



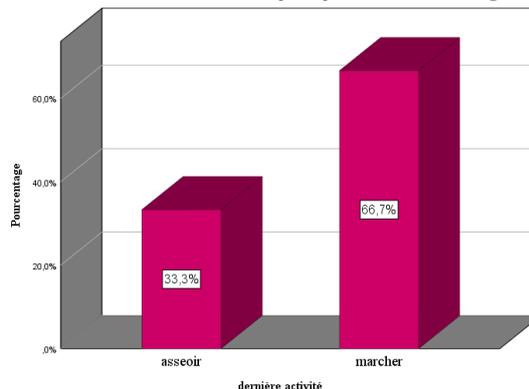
Dernières activités pratiquées "jardin de Zouaghi"



Dernières activités pratiquées "Place Ahmed Bey"

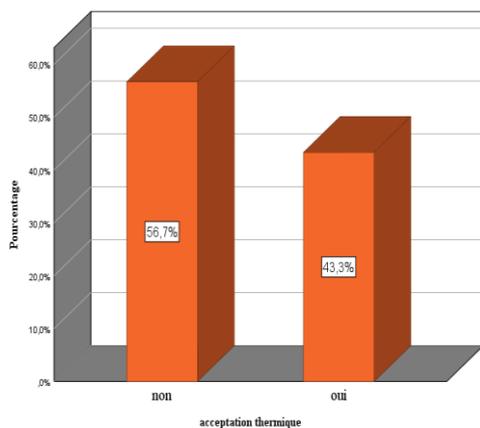


Dernières activités pratiquées "Place de Zouaghi"

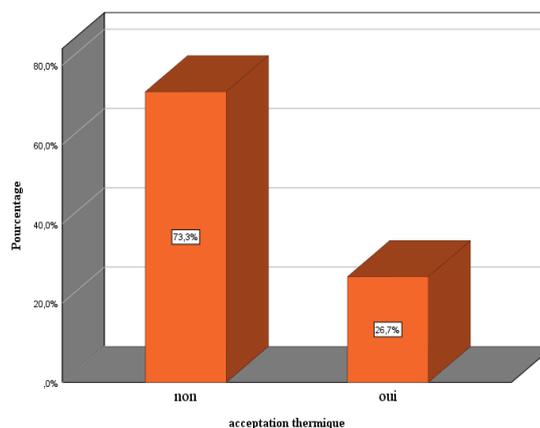


6-Acceptation de l'environnement thermique

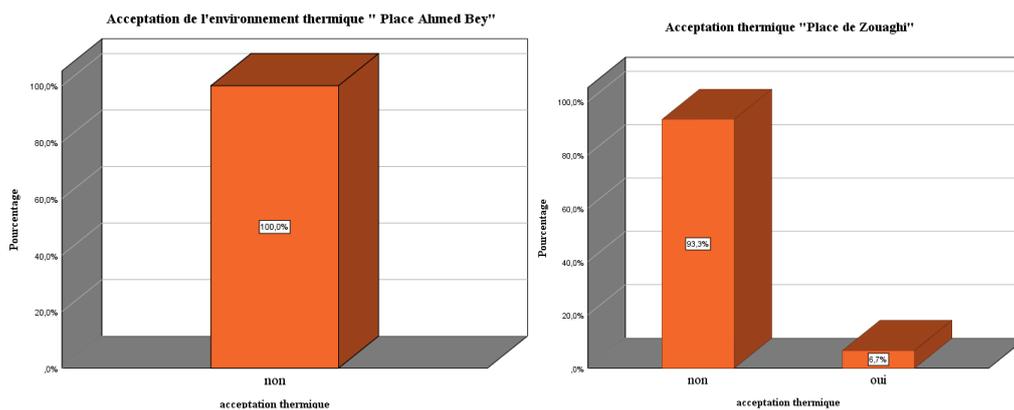
Acceptation de l'environnement thermique "jardin Bennacer"



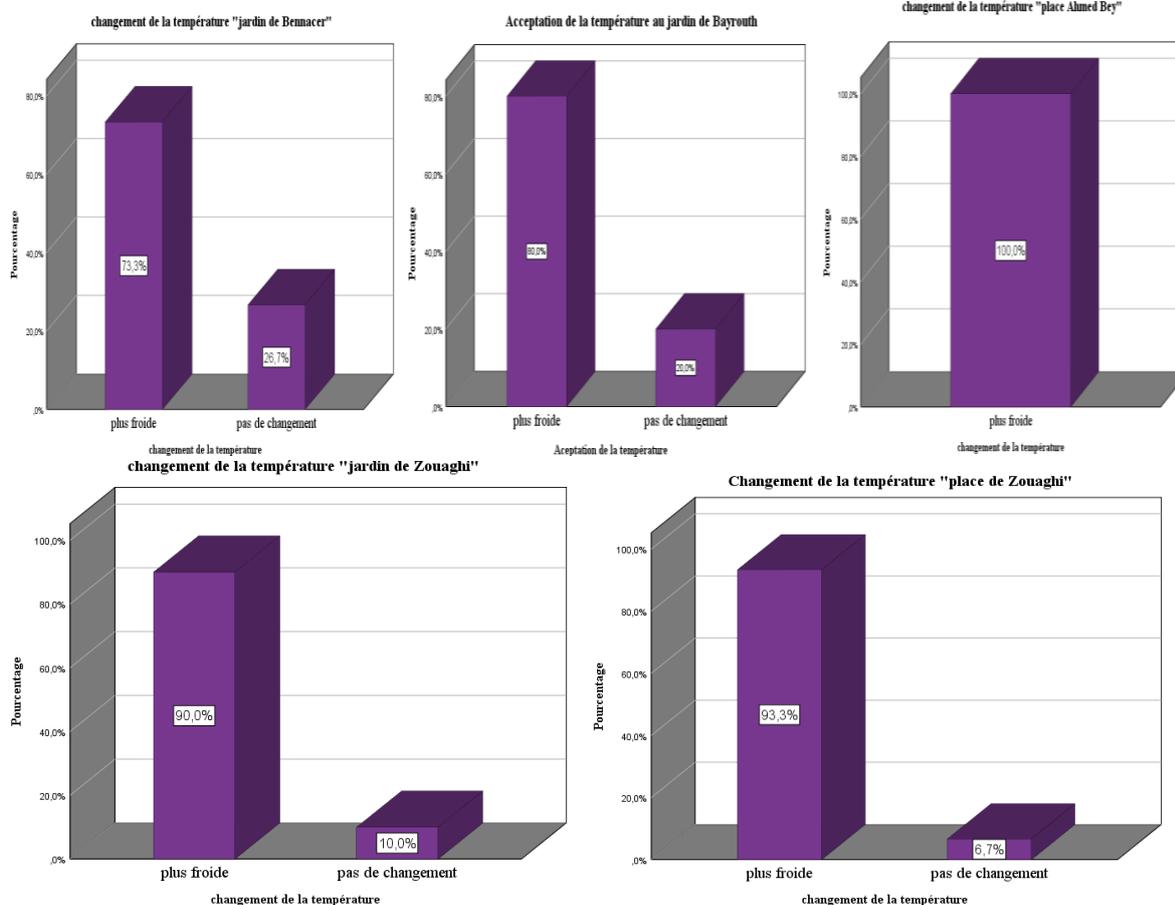
acceptation thermique "jardin de Zouaghi"



ANNEXE 4

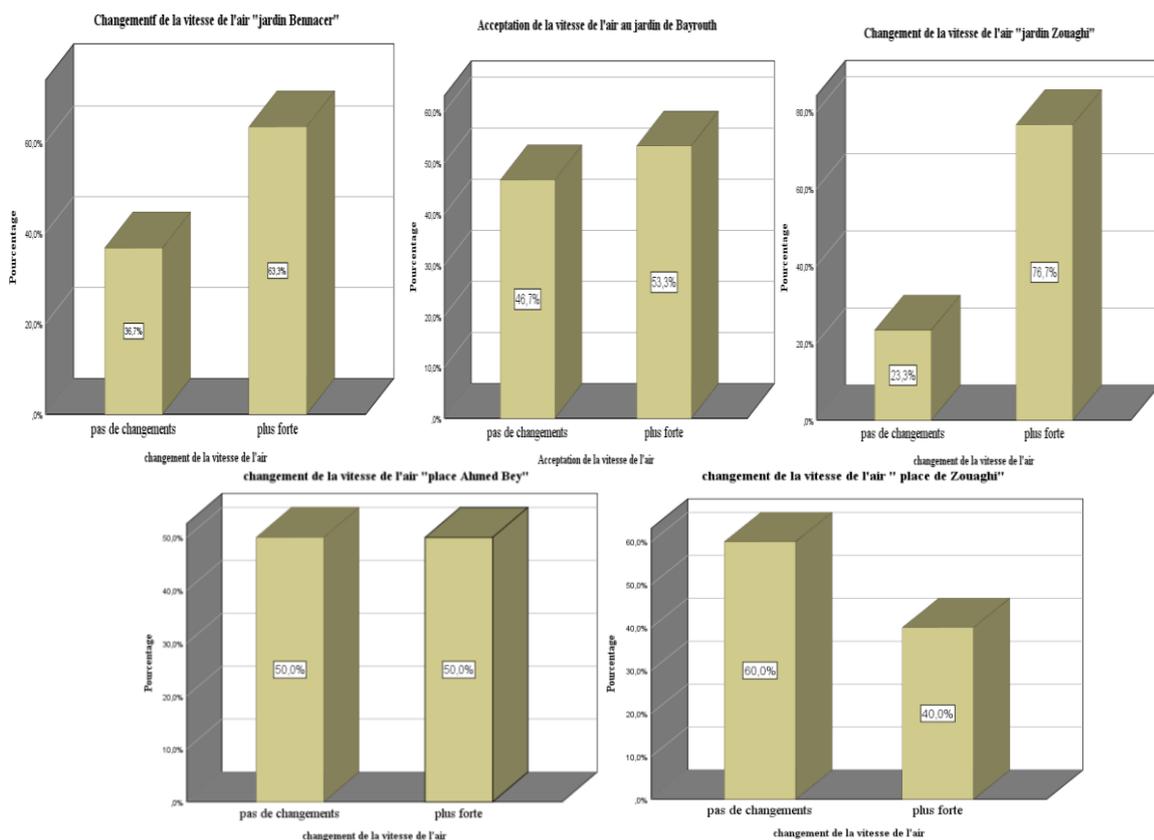


7- Changement de la température de l'air

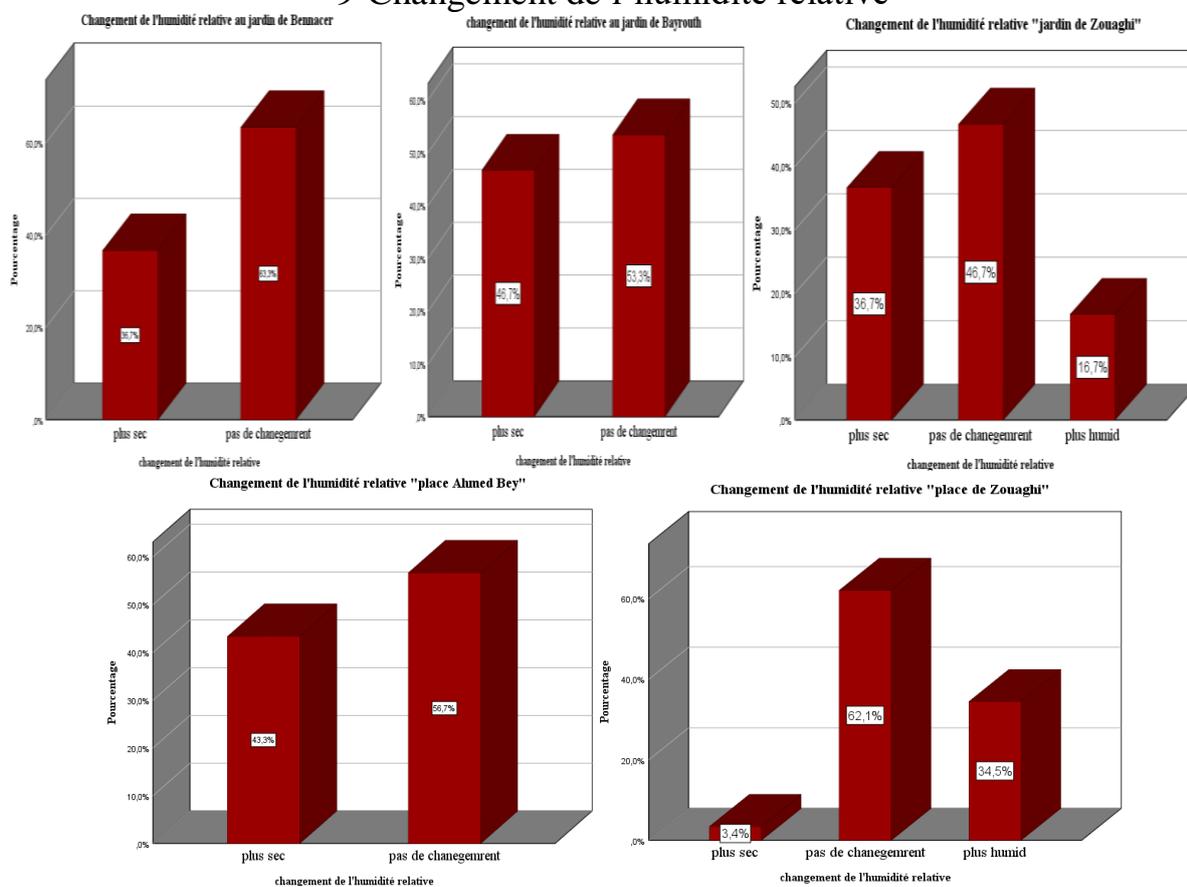


8- Changement de la vitesse de l'air

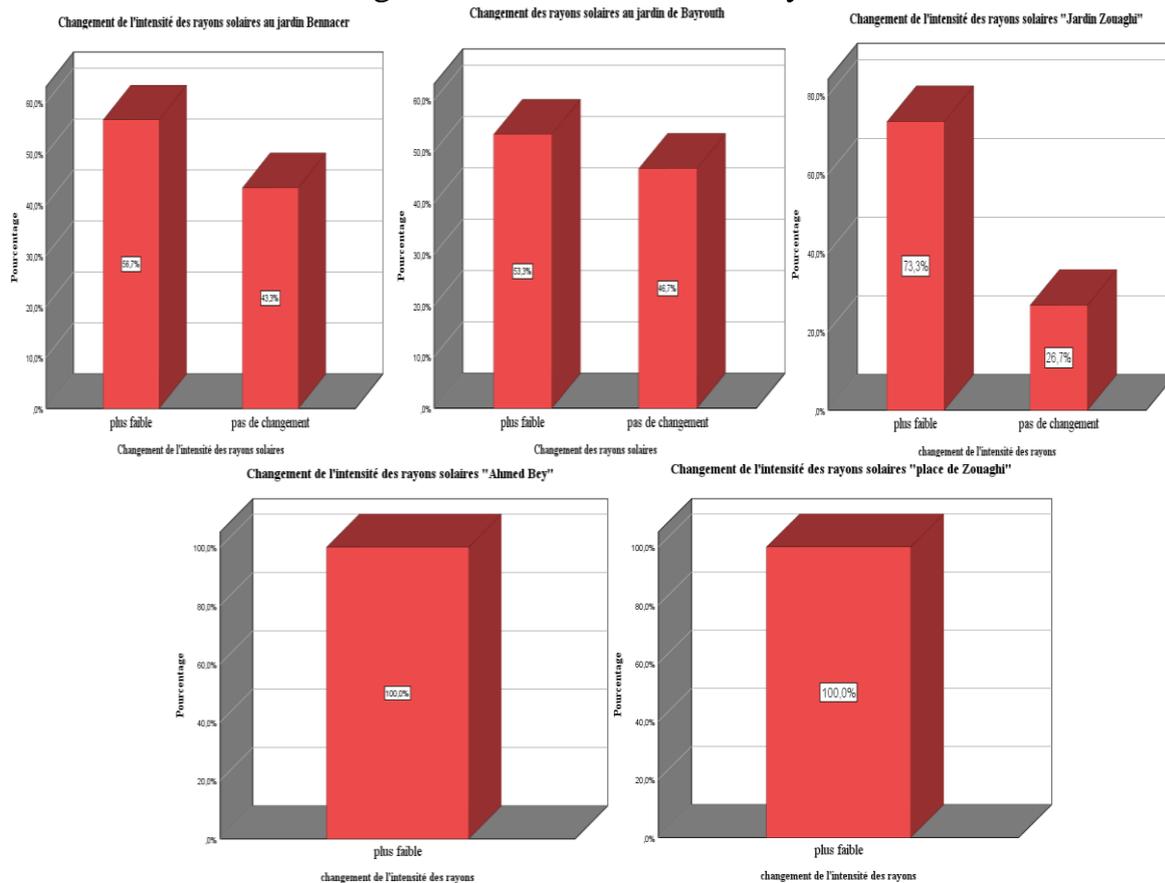
ANNEXE 4



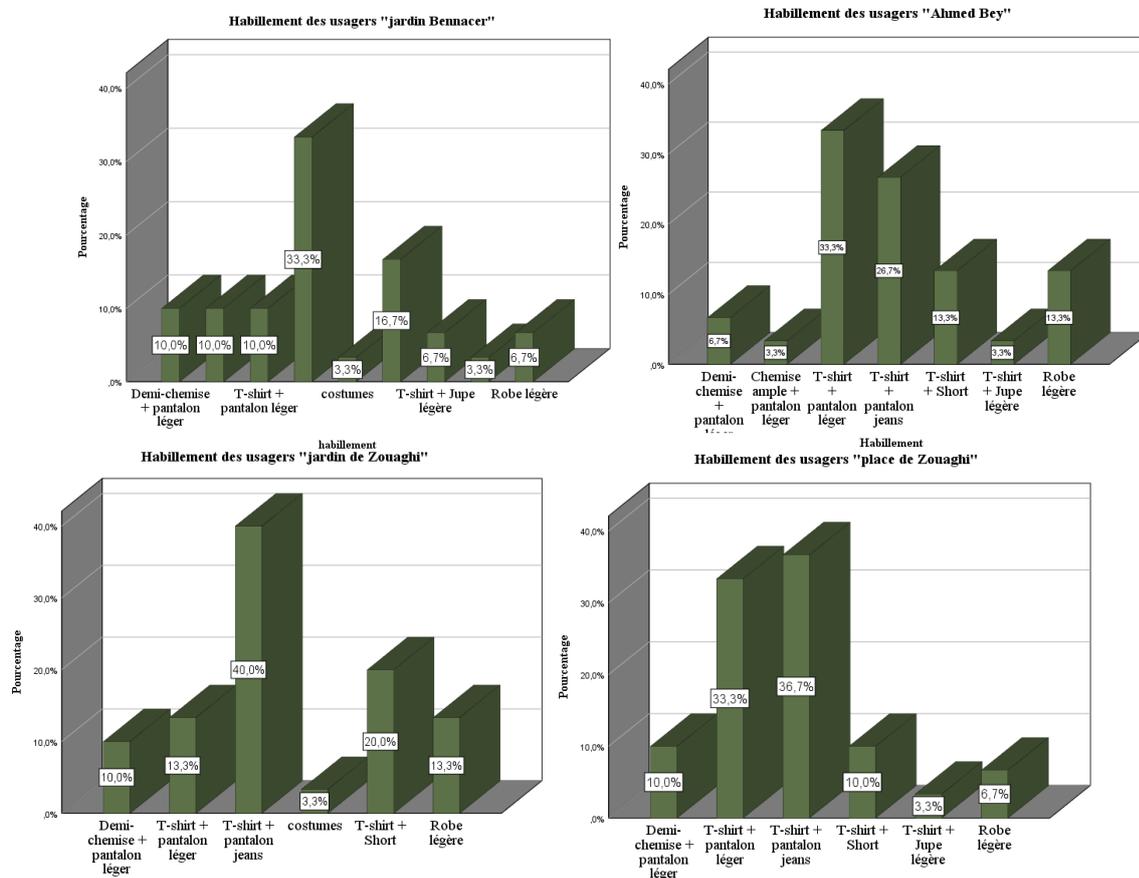
9-Changement de l'humidité relative



10-Changement de l'intensité des rayons solaires

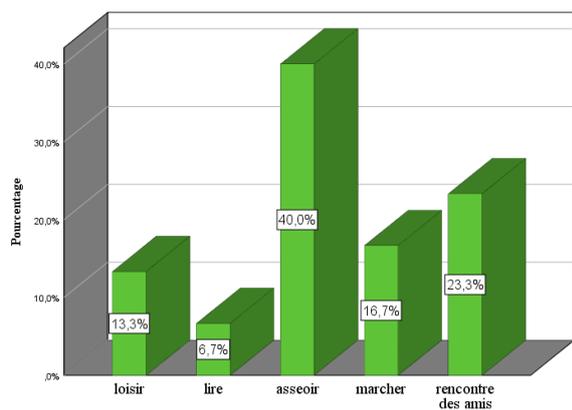


11-Habillement

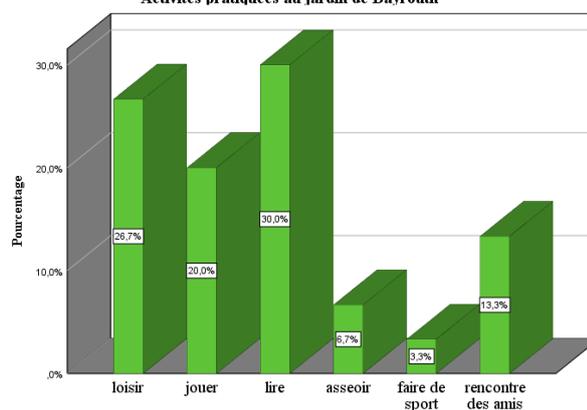


12-Activités pratiquées

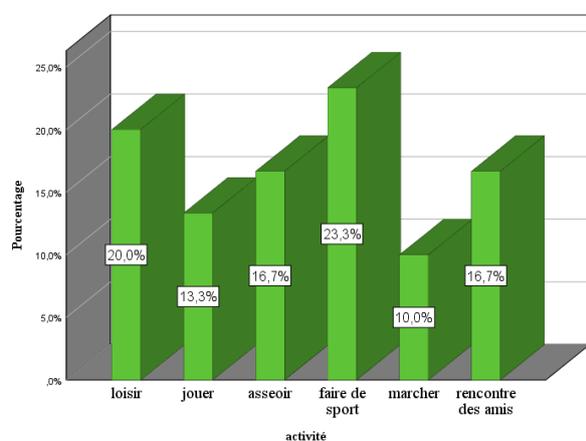
Activités pratiquées au jardin Bennacer



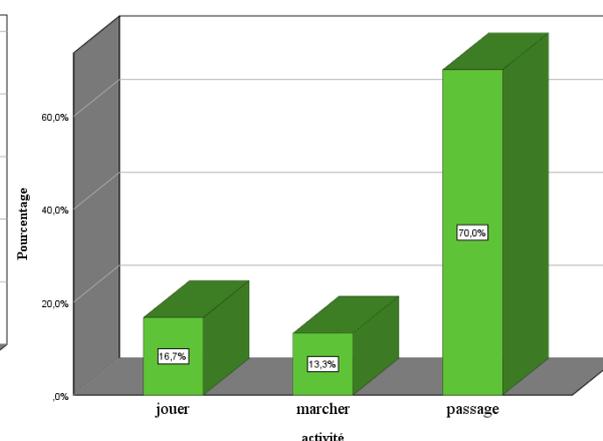
Activités pratiquées au jardin de Bayrouth



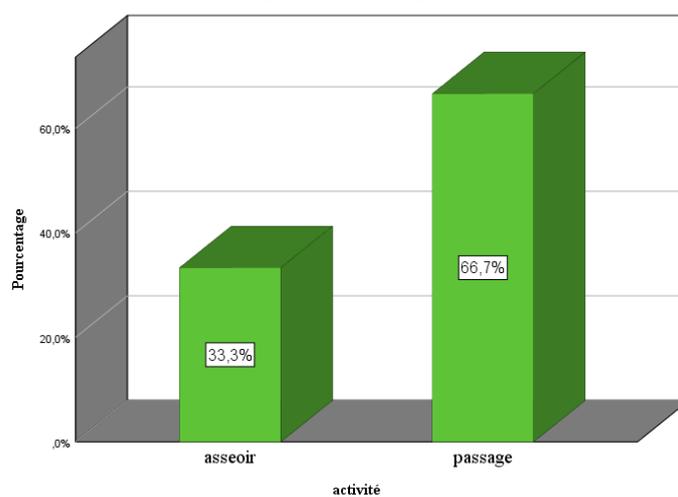
Activités pratiquées "jardin de Zouaghi"



Activités pratiquées "place Ahmed Bey"



Activités pratiquées dans la place de Zouaghi



Résumé

Les espaces verts dans les zones urbaines ont un effet positif sur le climat et le microclimat. Ils aident à réguler le climat urbain et à atténuer l'îlot de chaleur urbain (ICU) en créant un effet de refroidissement par l'ombre et l'évapotranspiration. De plus, ils libèrent de l'oxygène, absorbent le dioxyde de carbone, génèrent de l'ombre, ainsi que la consommation d'énergie et les émissions polluantes. Le but de cette étude est d'évaluer l'impact de la couverture végétale sur le climat urbain et le microclimat à Constantine et l'usage des espaces extérieur. Pour cela, nous avons fait appel à plusieurs méthodes afin d'atteindre l'objectif visé à savoir :

- La Cartographie a été impliquée pour faire un inventaire de l'espace vert de Constantine, dont le but est de calculer le déficit en espace vert par rapport à la norme Algérienne.
- La télédétection et la théorie des métriques paysagères nous ont offert des moyens pertinents pour analyser l'impact de la couverture végétale de la ville de Constantine sur la température de surface du sol (LST). Pour matérialiser cet effet, des images Google Earth Pro, Landsat 5TM et Landsat 8 OLI / TIRS de plusieurs années ont été acquises, traitées et analysées pour générer des cartes d'utilisation des terres, les cartes d'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et des cartes de LST. Ainsi, des nombreuses métriques paysagères (PLAND, CA, PD, NP, LPI, LSI, MPS, AI, PR, SHAPE MN) ont été choisies afin d'analyser la relation entre la configuration spatiale de la végétation et la distribution spatiale du LST.
- L'évaluation de confort thermique des usagers au sein de quelques espaces public de différents types par le biais de la simulation via le logiciel Rayman et Skyhelios, cette évaluation a été associée par une enquête sur terrain pour acquérir la perception thermique des usagers de ces espaces.

Nos résultats ont montré qu'il existe une relation négative entre le NDVI et le LST pendant la période d'étude. Ainsi, l'augmentation des valeurs NDVI a provoqué une diminution des valeurs LST. Un espace vert dense possède les valeurs de NDVI les plus élevées et l'effet de refroidissement le plus élevé. Par conséquent, notre étude a confirmé que le type, la densité, la taille et la forme de la végétation sont des facteurs importants pour déterminer son effet de refroidissement. Les résultats obtenus ont également montré qu'un paysage vert simple, homogène et agrégé est plus efficace. La grande tache verte dominante a un impact significatif sur la distribution spatiale de LST, alors que les patches verts fragmentés qui possèdent des formes compliquées résultent une augmentation de la LST.

Les résultats de l'évaluation des indices de confort énoncent que l'effet modérateur de la végétation a été enregistré au niveau de jardin Bennacer, jardin de Bayrouth et la rue de Belouezdad. Un stress thermique extrême a été enregistré au niveau de la place d'Ahmed Bey, la place et le jardin de Zouaghi surtout après midi.

Mots clés : espaces verts, les indices de végétation, le confort thermique, la température de surface du sol, l'îlot de fraîcheur de l'espace vert, l'îlot de fraîcheur urbain, les métriques paysagères.

Abstract

Green spaces in urban areas have a positive effect on the climate and microclimate. They help regulate the urban climate and mitigate the urban heat island (UHI) by creating a cooling effect through shade and evapotranspiration. In addition, they release they give oxygen, absorb carbon dioxide, generate shade, as well as energy usage and pollution emissions. The aim of this study is to assess the impact of plant cover on the urban climate and microclimate in Constantine and the use of outdoor spaces. To do this, we have used several methods to achieve the objective, namely:

-The Cartography was involved in making an inventory of the green space in Constantine, the aim of which is to calculate the deficit in green space compared to the Algerian standard.

-Remote sensing and the theory of landscape metrics have offered us relevant means to analyze the impact of the vegetation cover of the city of Constantine on the land surface temperature (LST). To materialize this effect, multi-year Google Earth Pro, Landsat 5TM and Landsat 8 OLI / TIRS images were acquired, processed and analyzed to generate land use maps, normalized difference vegetation index maps (NDVI) and LST maps. Thus, many landscape metrics (PLAND, CA, PD, NP, LPI, LSI, MPS, AI, PR, SHAPE MN) were chosen in order to analyze the relationship between the spatial configuration of the vegetation and the spatial distribution of the LST.

-Evaluation of the thermal comfort of users in a few public spaces of different types through simulation via Rayman and Skyhelios software, this evaluation was associated with a field survey to acquire the thermal perception of users of these spaces.

Our results showed that there is a negative relationship between NDVI and LST during the study period. Thus, the increase in NDVI values caused a decrease in LST values. Dense green space with the highest values of NDVI had the highest cooling effect. Therefore, our study confirmed that the type, density, size and the shape of vegetation are important factors in determining its cooling effect. The obtained results showed also that a simple, homogeneous and aggregated green landscape is more effective. The large dominant green patch has the highest impact on LST distribution, whereas the fragmented green patches which have complicated shapes result in an increase in LST.

The results of the evaluation of the outdoor comfort state that the cooling effect of vegetation was recorded at the level of the Bennacer square, the Bayrouth square and the rue of Belouezdad. An extreme heat stress was recorded at Place d'Ahmed Bey, Zouaghi Square and place, especially in the afternoon.

Keywords: Green Cover, Vegetation Index, Land Surface Temperature, thermal comfort, Green Cool Island, Urban Cool Island, Landscape Metrics.

الملخص :

للمساحات الخضراء في المناطق الحضرية تأثير إيجابي على المناخ الحضري والمناخ المحلي. إنها تساعد في تنظيم المناخ الحضري وتخفيف جزيرة الحرارة الحضرية (UHI) من خلال خلق تأثير تبريد الظل والتبخر. بالإضافة إلى ذلك ، فإنها تطلق الأكسجين ، وتمتص ثاني أكسيد الكربون ، وتولد الظل ، فضلاً عن استهلاك الطاقة والانبعاثات الملوثة.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير الغطاء النباتي على المناخ الحضري والمناخ المحلي في قسنطينة واستخدام المساحات الخارجية. للقيام بذلك استخدمنا عدة طرق منهجية لتحقيق الهدف المسطر وهي:

1- استعملت تقنية رسم الخرائط في جرد المساحات الخضراء في مدينة قسنطينة بهدف حساب العجز في هذه المساحات الخضراء مقارنة بالمعيار الجزائري.

2- لقد أتاحت لنا تقنية الاستشعار عن بعد ونظرية قياسات المناظر الطبيعية وسائل مناسبة لتحليل تأثير الغطاء النباتي لمدينة قسنطينة على درجة حرارة سطح الأرض (LST) ولتقييم هذا التأثير ، تم الحصول على صور Google Earth Pro و Landsat 5 TM و Landsat 8 OLI / TIRS لعدة سنوات ومعالجتها وتحليلها لإنشاء خرائط استخدام الأراضي وخرائط مؤشر الفرق الطبيعي للغطاء النباتي (NDVI) وخرائط درجة حرارة سطح الأرض LST . وبالتالي ، تم اختيار العديد من مقاييس المناظر الطبيعية (SHAP ، PR ، AI ، MPS ، LSI ، LPI ، NP ، PD ، CA ، PLAND) من أجل تحليل العلاقة بين التكوين المكاني للغطاء النباتي والتوزيع المكاني لدرجة حرارة الأرض.

3- تقييم الراحة الحرارية للمستخدمين في عدد من الأماكن العامة من خلال المحاكاة عبر برنامجي Rayman و Skyhelios ، وقد ارتبط هذا التقييم بدراسة ميدانية لاكتساب التصور الحراري لمستخدمي هذه المساحات.

أظهرت نتائجنا أن هناك علاقة سلبية بين مؤشر الغطاء النباتي NDVI و درجة حرارة سطح الأرض LST خلال فترة الدراسة. وبالتالي ، أدت الزيادة في قيم NDVI إلى انخفاض قيم LST. المساحات الخضراء ذات الكثافة العالية لها أعلى قيم NDVI أكبر قيمة لمعامل التبريد (UCI). و أكدت دراستنا أن نوع الغطاء النباتي وكثافته وحجمه وشكله عوامل مهمة في تحديد تأثير التبريد. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أيضاً أن المناظر الطبيعية الخضراء البسيطة والمتجانسة والمجمعة أكثر كفاءة و لها معامل تبريد أكبر، حيث أن البقعة الخضراء الكبيرة المهيمنة لها التأثير الأكبر على توزيع درجة حرارة سطح الأرض، في حين أن البقع الخضراء المجزأة ذات أشكال معقدة تؤدي إلى زيادة درجة حرارة سطح الأرض.

- تشير نتائج تقييم مؤشرات الراحة الحرارية إلى أن التأثير للنباتات قد سجل على مستوى حديقة بن ناصر وحديقة البيروث وشارع بلوزداد. تم تسجيل إجهاد حراري شديد في ساحة أحمد باي وساحة وحديقة زواغي ، خاصة في فترة ما بعد الظهر

الكلمات المفتاحية : المساحات الخضراء ، مؤشر الغطاء النباتي ، درجة حرارة سطح الأرض ، الراحة الحرارية ، جزيرة التبريد للغطاء النباتي ، جزيرة التبريد العمرانية ، مقاييس المناظر الطبيعية.