

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Constantine 03

Faculté d'Architecture et d'Urbanisme

Département d'Architecture

N° d'Ordre.....

N° de Série.....

MEMOIRE

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTERE

OPTION : ARCHITECTURE CLIMATIQUE & ENVIRONNEMENT

Présenté par : KHELLAF Dounia

Intitulé

**QUANTIFICATION D'ILOT DE CHALEUR
URBAIN PAR ZONAGE CLIMATIQUE : cas de
Constantine**

Sous la direction du: Pr. ABDOU Saliha

Jury composé de :

- Pr BOURBIA Fatiha Présidente
- Pr SAFFIDINE Djamila.....Membre
- Dr TOUAM NassiraMembre
- Pr ABDOU SalihaRapporteur

Soutenue le : 31/10/2017

A la mémoire de mon frère Sami....

*Le meilleur moyen que j'ai trouvé pour dire
combien je l'aime*

Remerciements...

D'entrée de jeu, je tiens à remercier chaleureusement mon professeur Abdou Saliha pour sa confiance à mon égard et ses nombreuses remarques liées à la démarche de recherche et, pour l'attention qu'elle a portée au suivi de cette thèse. Le présent ouvrage est grandement tributaire de sa disponibilité et la qualité de ses conseils tout au long de ce travail.

Par ailleurs, je tiens à souligner l'apport des membres de l'équipe du laboratoire ABE (Mme. Bourbia Fatiha, Boucheham Yasmina, Touam Nassira). Les échanges nombreux que j'ai eu avec eux sur le processus de recherche, leurs questionnements, leurs commentaires, leurs réflexions, leur bonne humeur communicative ont constitué une aide précieuse et, ont grandement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Pour les conseils et l'aide reçu, je tiens à exprimer ma gratitude à ceux qui m'ont apporté leur soutien. Je remercie, tout particulièrement mes parents pour leur appui quotidien.

Table des matières

Introduction Générale	1
1. Phénomènes thermiques urbains	13
1.1. Introduction.	14
1.2. Le climat urbain.	14
1.2.1. Echelles d'appréhension de climat urbain.	14
1.2.2. Définition de l'îlot de chaleur urbain.	16
1.2.3. Les types d'ICU, les caractéristiques et les processus sous-jacent	17
1.2.3.1. L'ICU surfacique.	17
1.2.3.2. Les ICU atmosphériques.	17
1.2.4. Le bilan énergétique de surface urbaine.	19
1.2.4.1. La couverture du sol.	22
1.2.4.2. La morphologie urbaine.	23
1.2.4.3. Les matériaux urbains.	28
1.2.4.4. Le métabolisme urbain.	32
1.2.5. Genèse de l'îlot de chaleur urbain.	35
1.2.6. Les facteurs de contrôle d'ICU.	36
1.2.7. Effets et solutions.	37
1.3. Conclusion.	40
2. Méthodes d'investigation de l'environnement thermique urbain	43
2.1. Introduction.	44
2.2. Les approches de modélisation de l'environnement thermique urbain.	44
2.2.1. les modèles de simulation numérique.	44
2.2.1.1. Echelle micro et locale.	45
2.2.1.2. Echelle locale et méso-climatique.	46
2.2.2. les modèles empiriques.	47
2.3. Les approches d'observation météorologique.	48
2.3.1. observation des îlots de chaleur urbains de surface.	48
2.3.2. observation des îlots de chaleur urbains atmosphériques.	50
2.3.2.1. Mesures mobiles de température.	52

2.3.2.2. Mesures fixes de température.	52
2.4. Méthodes de Zonage climatique.	53
2.4.1. Quelques classifications des paysages urbain-rural existant dans la littérature.	57
2.4.2. Le système de classification “Zone Climatique Locale”.	64
2.5. Conclusion.	70
3. Analyse du comportement thermique de Constantine en période estivale	73
3.1. Introduction.	74
3.2. Données et méthodes.	74
3.2.1. Le territoire d’étude.	74
3.2.2. Outils et données mobilisés.	76
3.2.3. Acquisition des données.	78
3.3. Prétraitement des images satellitaires.	79
3.3.1. La correction atmosphérique.	79
3.3.2. La correction géométrique.	82
3.4. Traitement des images satellitaires.	83
3.4.1. Extraction de la température de surface LST.	85
3.4.2. Cartographie d’occupation de sol.	86
3.4.2.1. Processus de classification.	86
3.4.2.2. L’analyse en composante principale (ACP).	89
3.4.2.3. L’extraction de l’indice de végétation normalisé (NDVI).	89
3.4.2.4. Extraction de l’indice de bâti (NDBI).	90
3.5. Résultats et discussions.	91
3.6. Conclusion.	106
4. Application de la classification climatique “Zone Climatique Locale” à Constantine.	127
4.1. Introduction.	110
4.2. La délimitation des zones climatiques locales.	110
4.2.1. La zone d’étude.	110
4.2.2. La classification en zones climatiques locales.	110
4.2.2.1. Collecte des métadonnées.	111
4.2.2.2. la zone source.	115

4.2.2.3. Sélection des zones climatiques locales.	119
4.2.3. L'analyse du comportement thermique des classes LCZ.	120
4.2.3.1. Les simulations.	120
4.2.3.2. Les mesures in-situ.	121
4.2.4. Résultats et discussions.	127
4.2.5. Conclusion.	150

Conclusion générale	153
----------------------------	------------

Bibliographie	160
----------------------	------------

Annexes	179
----------------	------------

Résumé	205
---------------	------------

Listes des figures

1.1. Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU)	15
1.2. Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée.	17
1.3. Cycle journalier de l'ICU.	18
1.4. l'approche de 'la moyenne volumétrique' de l'équilibre énergétique urbaine. . .	20
1.5. morphologie urbaine, Couverture urbaine, matériaux urbains et le métabolisme urbain, contribuant dans l'effet d'ICU.	21
1.6. Le piège radiatif des rues.	24
1.7. Profils verticaux de vitesses de vent, en fonction puissance,.	27
1.8. Absorption solaire vs température de surface d'une surface horizontale.	29
1.9. Définition d'un matériau «froid» et «chaud», basé sur les caractéristiques physiques et la valeur d'albédo.. . . .	30
1.10. a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO2. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent-CO2	33
1.11. (A) La distribution spatiale de chaleur anthropique, (B) La répartition spatiale de la consommation d'énergie des bâtiments commerciaux et résidentiels, (C) la température de surface (LST).	34
1.12. Présentation du bilan d'énergie en zone rurale (à gauche) et en zone urbaine (à droite), le jour (en haut) et la nuit (en bas).	35
2.1. Les roses du vent pour définir les zones d'influence (ellipses rouges) pour une température à la hauteur de référence du capteur (point rouge).	52
2.2. la classification d'Auer de la région métropolitaine de st- louis, Missouri.	57
2.3. la classification 'urban terrain zone' (UTZ).	59
2.4. le système de classification 'urban climate zone' (UCZ)	61
2.5. Division logique du paysage en classes.	65
2.6. Structure d'un type LCZ.	69
3.1. Organigramme du processus méthodologique.	75
3.2. l'aire d'étude de territoire de la Willaya de Constantine.	76

3.3. (A) image satellitaire brute (sans correction), en composition colorimétrique naturelle (RGB) du 15 juillet 2015, (B) image satellitaire corrigée, en composition colorimétrique (RGB) du 15 juillet 2015.	81
3.4. (A) le profile spectrale, d'un point (en rouge) avant la correction atmosphérique, et (B) le profile spectrale du même point après la correction atmosphérique. ...	82
3.5. Carte d'occupation du sol de la zone d'étude,	83
3.6. Carte de température de surface de la zone d'étude,	84
3.7. Les modes d'occupation du sol et la répartition spatiale de température dans la région du PRD octobre 1990 et novembre 2000.	85
3.8. image en composition colorimétrique naturelle (RGB=432) de territoire de la willaya de Constantine.	87
3.9. (A) multispectrale, (B) pansharpening.	88
3.10. les valeurs NDVI de territoire de la willaya de Constantine -15/07/2015-. ...	93
3.11. classification de l'NDVI de l'aire d'étude -15/07/2015-.	94
3.12. les valeurs NDBI de l'aire d'étude -15/07/2015-.	96
3.13. Les profiles spectrales de six types d'occupation de sol.	95
3.14. La carte d'occupation du sol de territoire de la Willaya de Constantine.	97
3.15. Carte thermique de Constantine pour le mois de juillet, en degrés Celsius. . . .	99
3.16. (A) carte d'occupation du sol avec les plans de coupes effectués, (B) la carte LST, (C) la carte NDVI, (D) : la carte NDBI. -15/07/2015.	104
3.17. (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Nord-Sud. . .	100
3.18. (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Est-Ouest. .	101
3.19. (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Nord Est-Sud Ouest,	102
3.20. (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Nord Ouest -Sud Est,	103
3.21. Relation entre LST ET NDVI.	105
3.22. Relation entre LST ET NDBI.	105
4.1. Localisation de la zone d'étude.	111

4.2. Classification de la forme urbaine selon la variable densité du bâti.	116
4.3. Classification de la forme urbaine selon la variable Hauteur du bâti.	117
4.4. Classification de la forme urbaine selon la variable Couverture du sol	118
4.5. -a- vue aérienne de la zone source de la zone de type ‘compact midrise’, -b- prise de vue au site de contrôle.	122
4.6. -a- vue aérienne de la zone source de la zone de type ‘Open midrise’, -b- prise de vue au site de contrôle.	123
4.7. Carte numérique d’élévation du site d’étude.	126
4.8. Classification générale de l’aire d’étude selon les Zones Climatiques Locales. . .	128
4.9. (a). La zone source de la LCZ2. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs des indicateurs urbains calculés pour la LCZ2.	131
4.10. (a). La zone source de la LCZ2/3. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs de indicateurs urbains calculés pour la LCZ2/3.	132
4.11. (a). La zone source de la LCZ5. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs de indicateurs urbains calculés pour la LCZ5.	133
4.12. (a). La zone source de la LCZ6. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs de indicateurs urbains calculés pour la LCZ6.	135
4.13. (a). La zone source de la LCZ8. (b) prise de vue à la zone climatique locale. (c) valeurs de indicateurs urbains calculés pour la LCZ8	136
4.14. (a). La zone source de la LCZF. (b) valeurs de indicateurs urbains calculés pour la LCZF.	137
4.15. Simulation du rang des températures journalières selon les LCZ.	142
4.16. Carte des variations de température de surface diurne de l’étendue d’étude en fonction des zones climatiques.	146
4.17. Carte hypothétique des variations de température nocturne de l’air de l’étendue d’étude en fonction des zones climatiques.	148
4.18. Températures de l’air mesurées dans la (LCZ2) et dans la zone (LCZ5).. . . .	149
A. 1.1. LCZ 01 -Compact high-rise-.	180
A. 1.2. LCZ 2 – Compact mid rise-.	181
A. 1.3. LCZ 3 – Compact low-rise-.	182
A. 1.4. LCZ 4 – Open high-rise-.	183

A. 1.5.	LCZ 5 – Open mid-rise-.	184
A. 1.6.	LCZ 6 – Open low-rise-.	185
A. 1.7.	LCZ 7 – Lightweight low-rise-.	186
A. 1.8.	LCZ 8 – Large low-rise-.	187
A. 1.9.	LCZ 9 – Sparsely built-.	188
A. 1.10.	LCZ 10 – Heavy industry-.	189
A. 1.11.	LCZ A – Dense trees-.	190
A. 1.12.	LCZ B – Scattered trees-.	191
A. 1.13.	LCZ C – Bush, scrub-.	192
A. 1.14.	LCZ D – Low plants-.	193
A. 1.15.	LCZ E – Bare rock / paved-.	194
A. 1.16.	LCZ F – Bare Soil / sand-.	195
A. 1.17.	LCZ G – Water-.	196
A.2.1.	Schéma des grandes étapes de la télédétection	200
A.2.2.	Les courbes théoriques de signature spectrale.	201
A.2.3.	Les principales zones du spectre EM.	202

Liste des tableaux :

1.1. Les valeurs typiques d'émissivité des matériaux communs	31
1.2. Valeurs d'effusivité thermique pour différent matériaux urbains et naturels.	31
2.1. Les différentes Caractéristiques des classes ‘urbain terrain zone’	58
2.2. Classification de la rugosité effective de terrain.	60
2.3. Categories and Characteristics of LCZ.	62
2.4. Schémas de classification et critères de validation des différentes approches.	63
2.5. Les dix-sept zones climatiques locales.	66
2.6. Zone properties of LCZ system.	68
3.1. Les satellites Landsat lancés par la NASA.	77
3.2. Caractéristiques des données landsat 8.	78
3.3. Données utilisées dans le cadre du travail	79
3.4. La gamme des valeurs NDBI pour différent types d'occupation de sol	91
4.1. Coordonnées de l'étendue de travail.	110
4.2. Les indicateurs urbains groupés par domaine d'intervention.	112
4.3. Les valeurs typiques proposées pour la classification.	115
4.4. Instrument de mesure.	124
4.5. Types de LCZ utilisés dans l'aire d'étude.	127
4.6. Valeurs des indicateurs urbains. SVF: sky view factor, aspect ratio, H: Height of roughness elements, R: Terrain roughness class, BSF: Building surface fraction, ISF: Impervious surface fraction, PSF: Pervious surface fraction.	129
4.7. Les profils LST pour les six classes retenues dans l'étude.	139
4.8. Écarts moyens nocturnes suggéré par Stewart.	147
A.2.1. Zones du spectre EM mesurées en télédétection.	202
A.2.2. Domaines d'application de la télédétection.	204

Nomenclature :

Abréviation:

AR	Aspect ratio
BSF	Building surface fraction
CFD	Computational Fluid Dynamic
DEM	Degetal Elevation Model
ETM	Enhanced Thematic Mapper
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
ISF	Impervious surface fraction
IISD	International Institute of Sustainable Development
ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
LCZ	Local Climate Zone
LST	Land Surface Temperature
MSS	Multispectral Scanner
NDBI	Normalized Difference building Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
OLI	Operational Land Imager
OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie
ONM	Organisation Nationale de Météorologie
PSF	Pervious surface fraction
SIG	Système d'Information Géographique
SVF	Sky View Factor
REM	Rayonnement électromagnétique
UBL :	Urban Boundary Layer
UCL :	Urban Canopy Layer
TEB	Town Energie Balance
TM	Thematic Mapper
TIRS	Thermal Infrared
UTZ	Urban Terrain Zone
UCZ	Urban Climate Zone
BAC	Basement Area Coefficient
FAC	Floor Area Coefficient
SWIR	Shortwave Infrared
NIR	Near Infrared

PIR Prochain infrarouge

Lettres romaines:

Q* le flux radiatif net
QF le flux de chaleur anthropique,
QH le flux de chaleur sensible
QE le flux de chaleur latente
 Δ QS le flux de chaleur de stockage
 Δ QA le flux de chaleur advective horizontale.
K↓ les flux solaires descendant
K↑ les flux solaires réfléchi
L↓ les flux infrarouge descendant
L↑ les flux infrarouge ascendant
H Hauteur de la rue
W Largeur de la rue
Z0 Longueur de rugosité
ZD Hauteur de déplacement
BT la température de brillance
W la longueur d'onde des rayonnements émis
e indice d'émissivité
M_p Reflectance_mult_band_x
M_L Radiance_mult_band_x,
Q_{cal} la bande spectrale
A_p Reflectance_add_band_
A_L Radiance_add_band_x,
K₂ /K₁ constantes d'unités de flux par des longueurs d'onde
f Fréquence
v vitesse de propagation
TOA top of the atmosphere

Lettres grecques:

ρ_λ la réflectance atmosphérique corrigée
 θ_{SE} Sun elevation
L _{λ} radiance spectrale de l'atmosphère
 λ longueur d'onde

Introduction générale:

La ville représente l'environnement humain le plus important, c'est l'espace central de la production, la vie et les réalisations humaines. Au fil des siècles, *les villes se sont multipliées et sont devenues des organisations de plus en plus complexes*¹. Actuellement, elles n'occupent que 3% de la planète, et abritent plus de la moitié de la population du monde (3,4 milliard d'individus). Selon l'ONU (2008), *Au cours des quatre prochaines décennies, la fraction de la population mondiale vivant dans les zones urbaines devrait atteindre 5 milliard d'individus pour 8 milliard d'habitants sur la terre*, ce qui signifie une densité plus élevée dans les villes existantes et beaucoup plus de nouvelles zones urbaines pour accueillir jusqu'à 2 milliards de nouveaux citoyens.

Dans la perspective du paysage, l'urbanisation -qui est selon (Bechtel B., et al., 2015) *le mouvement des personnes dans les villes, et le processus de transformation de la couverture du sol en formes urbaines-* a considérablement modifié les surfaces attribués au milieu urbain et a entraîné un impact significatif sur les conditions biophysiques de surface et les propriétés atmosphériques à différentes échelles. *Les zones urbaines modifient localement leur propre climat*², ces modifications incluent l'augmentation de la température, les changements de la vitesse du vent, les précipitations, l'irradiation solaires... la modification la plus importante est la création de l'îlot de chaleur urbain qui décrit *'l'excès de chaleur de l'atmosphère urbaine par rapport à l'environnement rural'*³

Le terme « îlot de chaleur urbain » (urban heat island en anglais) est employé pour décrire la spécificité climatique des villes qui, de par leur caractère totalement artificiel, affectent la configuration spatiale de température de l'air. Selon (Leconte F. et al., 2015), l'ICU fait référence à *l'anomalie positive de température d'air existant entre le centre d'une agglomération et les zones non urbanisées alentours*. Il est mieux visualisé comme *un dôme d'air chaud stagnant au-dessus du paysage urbain et entourés progressivement par un air plus frais sur les zones périurbaines / rurales*⁴. Cette augmentation artificielle de température dans les villes peut être détectée à plusieurs échelles temporelles et spatiales.

¹ M, Colombert. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

² (Oke, T.R., 1987) IN T, Houet., G, Pigeon. (2011). *Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors—an application on Toulouse urban area (France)*. Environmental Pollution 159, 2180–2192.

³ T.M, Giannaros., D, Melas. (2012). *Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: the case study of Thessaloniki, Greece*. Atmospheric Research 118, 103–120.

⁴ N.G.R, Perera., K, Samanthilaka.(2014). *Effect of Street Canyon Materials on the Urban Heat Island Phenomenon in Colombo*. In Proceedings of International Conference on Cities, People and Places, pp. 1–12.

A l'échelle microclimatique, L'intensité de l'îlot de chaleur peut être mesurée dans la couche de canopée urbaine, qui est la couche d'air comprise entre le sol et la cime des arbres, ou des toitures des bâtiments. Car c'est là où se situe la plus part des sources de polluants et des récepteurs (hommes, végétations..) ; l'amplitude de l'ICU est pertinente pour les études de la santé humaine, la gestion de confort et des besoins énergétiques des bâtiments...

De nombreuses études ont montré que la forme et le développement de cette anomalie climatique varie spatialement et temporellement, dépendant du climat local (influencé par les paramètres météorologiques), et de plusieurs facteurs de source anthropique. L'augmentation de la chaleur urbaine est due principalement aux changements de la couverture du sol et au comportement physique des matériaux urbains. L'effet de l'artificialisation ou la substitution des surfaces naturelles (végétation, eau,...) avec des vastes surfaces minérales sèches et imperméables (les matériaux de construction, les revêtements du sol..) a largement modifié le bilan énergétique de la surface en diminuant le taux d'évapotranspiration, et en favorisant la rétention de chaleur par le tissu urbain. Aussi important, c'est l'augmentation du piégeage radiatif en raison de la complexe morphologie tridimensionnelle des villes (le stockage et la restitution thermique dans les canyons des bâtiments). La magnitude de l'ICU est intensifié par le dégagement des flux de chaleur anthropique et des polluants dans l'atmosphère à cause des activités humaines (le transport, la climatisation, l'industrie...). Ces contributeurs majeurs provoquent une série de changements dans l'équilibre énergétique naturel de surface, rendant les zones urbaines plus chaudes que les zones rurales avoisinantes.

Une telle augmentation de température aura de graves répercussions sur l'environnement et la santé publique: la détérioration de la qualité de l'air extérieur, la dégradation du confort intérieur, la croissance de la demande énergétique, le stress thermique, les risques de la mortalité....Collectivement, *les villes sont l'un des principaux moteurs du changement environnemental global, et sont uniquement vulnérables aux effets du changement*⁵. Par conséquent, *l'intégration des futures variations climatiques dans les stratégies de planification urbaine devient un défi majeur pour les prochaines décennies*⁶.

⁵ B, Bechtel., et al. (2015a). *Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities*. ISPRS International Journal of Geo-Information 4, 199–219.

⁶ F, Leconte., et al. (2015a). *Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements*. Building and Environment 83, 39–49.

Dans ce contexte, l'adaptation des villes à l'augmentation des températures nécessite une compréhension approfondie du climat urbain. Le rôle des architectes et des urbanistes est sans doute primordiale car leurs décisions peuvent faciliter la provision d'un microclimat confortable, ou au contraire, contribuer à la formation de l'effet de réchauffement local. Les concepteurs doivent comprendre et maîtriser les contributeurs à l'origine des ICUs, car ils seront dans l'obligation de prendre en compte, ce phénomène lors des processus d'urbanisme et d'aménagement urbain. Mais *''le manque d'informations utiles qui décrivent en détails les aspects de forme et de fonction des villes, dans le domaine de climatologie urbaine, a strictement limité la communication entre les disciplines et le transfert des connaissances climatiques en langage de conception''*⁷. Les normes sont donc nécessaires pour combler les lacunes entre la climatologie urbaine, l'urbanisme et le design urbain, et assurer l'échange cohérent et significatif des données entre les régions, et les cultures.

Dans la littérature du climat urbain, l'effet de l'ICU –connu au sens large comme la différence de température entre l'urbain et le rural– est l'indicateur qui est largement documenté, mesuré et rapporté d'abord par Luck Howard au début du XIX siècle, et il reste encore un sujet des recherches récentes dans les différentes villes et climats. Pendant de nombreuses décennies, il a été la préoccupation des chercheurs à mesurer la magnitude de l'ICU à travers la méthode classique qui repose sur des descripteurs simplistes comme « urbain » et « rural ». Ces descripteurs qui pourraient décrire les paramètres régionaux d'une investigation, ne transmettent rien de propriétés de site qui réellement affectent le climat local. Les investigateurs ont soulevé des inquiétudes quant à l'authenticité de ces études, surtout en ce qui concerne les mesures, la définition et les rapports des amplitudes de l'ICU.

Afin d'examiner la qualité méthodologique des études de l'ICU, Stewart I.D. (2011a), dans une enquête mondiale des sites de mesures d'îlot de chaleur et leur environnement, a évalué un échantillon de 190 études (entre 1950 et 2007), en se basant sur des critères de conception expérimentales et de communication. Il a constaté que plus de la moitié de toutes les amplitudes rapportées sont jugées scientifiquement indéfendable. Il a noté aussi que plus de 3/4 de la littérature empirique de l'ICU ont échoués à fournir les métadonnées quantitatives de base des sites de mesure. Ces statistiques exposent la lacune

⁷ B, Bechtel., et al. (2015a). *Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities*. ISPRS International Journal of Geo-Information 4, 199–219.

dans la représentation des sites, et l'absence d'un protocole pour recueillir et rapporter les observations de l'ICU, qui est attribuée d'après Stewart aux « faiblesses universelles » des méthodes courantes et aux « mauvaises pratiques scientifiques ».

Le problème dans l'approche traditionnelle qui crée des obstacles dans les études urbaines est l'ambiguïté des définitions de la terminologie en plus de la difficulté de déterminer un effet 'urbain/rural' précisément⁸. Le terme 'urbain/rural' n'a pas un sens objectif unique qui peut décrire suffisamment le paysage. Par exemple un site urbain peut être un parc, terrain de collège, rue canyon...Ce qui décrit comme 'urbain/rural' dans une ville ou une région diffère de celui d'une autre ville. Par conséquent, il est difficile de définir le terme universellement et standardiser l'échange des observations de température urbaine dans le monde entier.

En vue de cette analyse bibliographique critique, la méthodologie classique d'ICU reposant sur les descripteurs urbain/rural a été remise en cause par le chercheur. Selon (Leconte F., 2014), *La redéfinition de l'amplitude de l'ICU d'une part et des critères de classement d'autre part sont nécessaires, pour améliorer la communication et le transfert des informations entre les domaines et les disciplines*. Pour cela les scientifiques ont développé plusieurs systèmes de classification standardisés pour différentes échelles spatiales et temporelles, afin d'améliorer la compréhension globale du microclimat urbain, améliorer la cohérence et l'exactitude des rapports de climat urbain et fournir des informations et des recommandations en matière de planification et d'urbanisme.

Récemment, sur la base des travaux antérieurs tel que: Auer Jr A.H. (1978), Ellefsen R. (1991), Davenport A.G. (2000)... Oke T.R. (2004) a développé le système de classification « Urbain Climate Zone » pour la caractérisation de l'environnement urbain, ce système inclus dans les directives de l'organisation mondiale de la météorologie, fournit les bases nécessaires pour un système plus universel proposé par Stewart I.D et Oke T.R après (2009). Cette approche est devenue le système de classification par zone climatique locale (local climate zone (LCZ)).

Stewart I.D. et Oke T.R (2012) définissent les « zones climatiques locales » comme une « logical division of the landscape 'universe' into a hierarchy of sub-classes, each differentiated on the principles of surface cover (built fraction, albedo...), surface

⁸ L.W, Siu., M.A, Hart. (2013). *Quantifying urban heat island intensity in Hong Kong SAR, China*. Environmental Monitoring and Assessment 185, 4383–4398.

structure (SVF, roughness height), and cultural activity (anthropogenic heat flux). Suivant les deux chercheurs, Cette méthode repose sur les propriétés du milieu urbain (les données d'observation de la couverture de surface, la structure de surface, et le métabolisme urbain) qui donnent lieu à des différences de températures de l'air, pour la différenciation des zones climatiques. *La quantification d'ICU, s'exprime plus objectivement à travers les différences de température interzones que par le biais des différences arbitraires urbain/rural*⁹. La classification par « zone climatique locale » vise à fournir à la communauté scientifique un protocole objectif, suffisamment générique, et universellement compris, pour les études de microclimat urbain, afin d'unifier le langage des études de climat urbain et faciliter la communication interdisciplinaire. La compréhensibilité de cette classification permet la comparaison entre les régions du monde quels que soient les paramètres physiques ou culturels.

Problématique:

Certes, le phénomène de la hausse des températures a été observé pratiquement partout dans le monde, et l'Algérie ne fait pas exception. Selon l'institut international de développement durable (IISD), les données climatiques relevées au Maghreb indiquent que son climat se réchauffe progressivement. *“On est passé d'une sécheresse tous les dix ans au début de siècle, à cinq à six années en dix ans actuellement”* constate l'IISD. L'augmentation de température moyenne en Algérie, est de l'ordre de 1°C à 2°C sur l'ensemble du territoire, avec un recule de 12% de la pluviométrie entre 1990 et 2005 a déclaré le directeur général de l'organisation nationale de météorologie (ONM). Ce réchauffement observé va accroître le phénomène spécifique au milieu urbain : l'Ilot de Chaleur, qui est accentué par l'urbanisation effrénée, que connaît notre pays.

La lecture de nos paysages urbains, après un demi-siècle passé depuis l'indépendance, révèle une image dépréciée d'une *“mosaïque socio-spatiale sans harmonie*¹⁰”, d'un dysfonctionnement multiple et d'une anarchie totale. Ce constat est la conséquence de processus d'urbanisation spectaculaire, souvent mal ou pas du tout contrôlée, caractérisé par l'urgence due à la reconstruction du pays, et le rattrapage des

⁹ I.D, Stewart., T.R, Oke. (2010). *1.1 thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites*. In Ninth Symp. on Urban Environment, Keystone, CO, Amer. Meteor. Soc.

¹⁰ G, Berrahail. (2014). *La problématique du développement durable d'une ville minière Ouenza, une ville de l'est algérien*. Thèse de Magistère, Université Badji Mokhtar.

besoins essentiels d'une population en progression rapide. Au dernier recensement de 2008, 63 % des algériens sont des citoyens, ils seront environ 80 % en 2025. La réponse à la forte demande sociale s'est traduite par des programmes à grande échelle, prise en charge par l'Etat, de logements, d'infrastructure.... et depuis peu des villes nouvelles. Ces interventions étatiques rapides qui n'ont pas été orientées vers des objectifs de développement, ont davantage généré des problématiques complexes et rendu la gestion urbaine extrêmement difficile.

La wilaya de Constantine, à l'instar des autres wilayas du pays, est concernée tout autant par cette situation. Située à l'Est de l'Algérie, cette agglomération est considérée comme le troisième pôle dans l'armature urbaine algérienne, elle a connu, depuis l'indépendance une forte urbanisation horizontale dans tous les sens, *'non maîtrisée car non contrôlée, ce qui engendre bien des dysfonctionnements de telle manière que les situations s'aggravent et se compliquent avec le temps'*.¹¹

La question environnementale devient, face à l'urgence des programmes de constructions, rapidement secondaire. Les ressources naturelles continuent à se dégrader, le béton a pris la place du couvert végétale, les terres agricoles fertiles situées aux alentours de la ville, sont loties et urbanisées parce que les décideurs ont pris la décision de lancer un projet d'urbanisme.

Les pratiques actuelles d'urbanisme posent problèmes sur le plan de la qualité du cadre bâti dont le niveau apparent est généralement dégradé, avec l'absence totale de qualité architecturale. On assiste à une production massive de tissus ouverts faits de barres et de tours, une standardisation des types des logements suivis de certains équipements, sans que la phase de construction soit pour autant achevée.

Les modes d'appropriation spontanée de l'espace par différentes catégories sociales en dehors de toute intervention administrative, contribue à la production du cadre bâti informel par le biais d'auto-construction, ce qui a engendré des formes urbaines difficiles à changer: la prolifération des zones d'habitats et d'activités illicites, des bidonvilles,...etc. ces pratiques anarchiques sont en réaction aux attitudes de repli des communes qui, face aux manques de moyens techniques et logistiques, et l'absence de stratégie globale, se révèlent impuissantes à répondre aux besoins exprimés par leur population.

¹¹ F, Benidir. (2007). *Urbanisme et Planification Urbaine, Le Cas de Constantine*. Thèse de doctorat d'état, université Mentouri de Constantine.

Cette croissance urbaine et la conjugaison de plusieurs autres facteurs (actions anthropiques, minéralisation des sols...) a largement influencé le climat urbain et plus précisément l'augmentation de la température. De ce constat découle l'urgence nécessaire pour revoir nos aléas d'urbanisme et d'aménagement des villes dans une perspective d'adaptation aux anomalies positives de température, puisque « *Le défi majeur de l'urbanisme pour les prochaines décennies, est de trouver un compromis entre un développement inévitable des villes, et un environnement urbain de grande qualité* »¹².

En partant de ce constat, diverses questions peuvent être émergées :

- D'abord, il convient de s'interroger sur la situation de l'environnement thermique urbain au sein de la ville de Constantine -surtout en absence total des études menant sur ce sujet-, et dans quelle mesure les attributs de surface contribuent-ils aux variations spatiales de température ?
- Les considérations climatiques (thermiques) restent encore peu abordées par les différents acteurs de conception et d'aménagement, qui ont tendance à minimiser l'importance de leurs décisions sur l'altération de climat dans la ville. Pour cela il est important de fournir des connaissances pour mieux intégrer la problématique climatique. Deux questions peuvent être posées :
 - *Comment, adapter nos villes, avec tous leurs problèmes antécédents d'urbanisme, de planification, et d'environnement, à l'augmentation des températures ?*
 - *Comment favoriser une meilleure intégration des contributeurs à l'origine d'ICU dans les stratégies d'aménagement urbain pour faire face au réchauffement local?*

Objectifs :

Deux objectifs visés dans le cadre de ce travail :

- Comme il n'ya pas eu d'étude passé concernant les ICUs à Constantine, notre premier objectif est d'analyser le comportement thermique au sein de la ville et mettre en évidence son lien avec les différents types d'occupation du sol.

¹² (Ali-Toudert, F., 2001) IN N, Achour-Bouakkaz. (2006). *La Relation Entre L'ilot de Chaleur Urbain, Phénomène Du Changement Climatique et La Densité Du Plan Bâti*. Thèse de Magistère, université de Constantine.

- Le deuxième vise à quantifier l'îlot de chaleur urbain dans la ville de Constantine, en se basant sur un système de classification par Zonage Climatique. Ce système a été testé partout dans le monde, en particulier dans les pays développés. L'idée derrière ce travail est d'adopter cette approche dans d'un pays en voie de développement, avec tous ses problèmes de planification urbaine et d'environnement.

Hypothèses :

- La première hypothèse de recherche consiste à démontrer que la classification de la ville en zones à l'échelle locale, en fonction des comportements thermiques, via l'utilisation de l'approche LCZ, permet de structurer les études d'ICU.
- Nous avons aussi comme prémisse que Le système de classification Zone climatique locale pourrait fournir un ensemble d'information de bases en matière de climat urbain et des paramètres à son origine, pour les architectes, les urbanistes...

Méthodes et outils :

La méthodologie suivie pour valider les hypothèses proposées et répondre aux objectifs visés, s'est structurée en deux parties :

- Dans la première partie, les températures de surface au sein de l'agglomération de Constantine seront simulées via l'approche de télédétection liée à l'utilisation des données issues des images satellitaires. Pour cela, le logiciel de télédétection Envi 5.1 et le système d'information géographique ArcMap 10.3 seront mobilisés.
- La deuxième partie qui vise à quantifier l'ICU, s'appuie sur une combinaison de méthodes : la classification par LCZ et les mesures de températures. Dans la première phase, la construction des LCZ s'est basée sur la méthodologie proposée dans les lignes directrices de l'approche de Stewart et Oke. La deuxième phase consistera à simuler le comportement thermique au sein des différents LCZ via l'utilisation des données de télédétection intégrées dans GIS. Des mesures expérimentales *in-situ*, qui permettent d'enregistrer les températures de l'air seront aussi effectuées.

Structure de la thèse:

La thèse s'organise en plusieurs chapitres :

Dans le premier chapitre, ce sont les différents aspects d'ICU qui constituent l'axe de réflexion. Il présente d'abord, un aperçu des principaux concepts et échelles d'appréhension de climat de la ville, il s'agit de s'attarder sur les différents paramètres intervenants dans la création des phénomènes thermiques urbains. En outre, une approche basée sur le bilan énergétique de surface sera utilisée pour expliquer les dynamiques thermiques et les échanges énergétiques entre la surface urbaine et l'atmosphère. Ce chapitre se terminera par une présentation des conséquences de réchauffement local, ainsi que certains travaux menant sur les stratégies d'atténuation de ce phénomène.

Le deuxième chapitre fait la synthèse des méthodes utilisées dans l'investigation de l'environnement thermique urbain, à savoir les modèles de simulations et les méthodes d'observation couramment employées dans le domaine de climatologie urbaine. Une approche conceptuelle permet de décrire certains systèmes de classification climatique, en détaillant celui développé récemment par Stewart, I.D et Oke, T.R : « Zone Climatique Locale ».

Le troisième chapitre s'attache plus précisément à analyser les variations thermiques de la ville de Constantine, par le biais des données de télédétection. Tout d'abord, le travail a consisté en la présentation de la ville. Ensuite, les étapes nécessaires pour l'extraction des cartes d'occupation du sol et de température de surface ont été détaillées.

Le quatrième chapitre s'intéresse d'abord, à l'approche de construction des zones climatiques locale de l'aire d'étude. Ensuite, nous avons présenté une investigation quantitative concernant les variations de température dans les LCZs, qui a été mené in-situ et porte sur des mesures de température de l'air. La stabilité et l'homogénéité spatiale de température à l'intérieur des LCZs a été aussi l'objet de simulation à l'aide des images thermiques.

Premier chapitre :
Phénomènes thermiques urbains

1.1. Introduction :

Dans le contexte des deux phénomènes environnementaux les plus graves au 21^{ème} siècle : le réchauffement planétaire et la croissance démographique, l'effet global et local de l'anomalie positive de température (ICU) interpelle. Le présent chapitre passe en revue cet élément principal de microclimat des villes. On présentera alors dans un premier temps la notion d'ICU ainsi que ses échelles spatiales. La structure via l'utilisation des échelles conduit à une classification des différents types d'ICU, nous allons se focaliser sur celui de la couche limite de canopée urbaine qui sera l'objet de ce chapitre et du reste de la thèse. Nous nous intéressons aussi à présenter les différentes causes de cette anomalie en caractérisant les échanges d'énergie pour une surface urbaine, l'accent sera mis aussi sur la présentation des processus qui conduisent à la mise en place du microclimat thermique. Enfin, Nous consacrons une partie aux conséquences de cette problématique et les dispositifs basiques proposés aux concepteurs pour l'atténuer.

1.2. Le climat urbain :

Selon (Colombert M., 2008), « *la ville évolue au sein d'un environnement naturel avec lequel elle interagit en permanence* ». Sa présence physique a pour corolaire directe des perturbations locales dans tous types d'échanges entre la surface et l'atmosphère, engendrant un climat *spécifiquement* urbain. Ce dernier est défini selon L'organisation mondiale de la météorologie (OMM) comme *un climat local modifié par les interactions entre les zones bâties et le climat régional*¹³. *Les villes modifient localement leur propre climat*¹⁴, les signes de ces modifications proviennent de multiples paramètres, parmi lesquelles figure l'anomalie thermique liée à la température de l'air, c'est la manifestation climatique la plus employée par les scientifiques du monde entier pour qualifier le climat généré dans les zones urbaines, nommé Ilot de Chaleur Urbain (ICU).

1.2.1. Echelles d'appréhension de climat urbain:

La structure spatiale de l'atmosphère terrestre est formée de plusieurs couches, leur interaction avec les propriétés biophysiques de surface impose diverses échelles, en

¹³ J, Unger., et al.. (2014). *Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged*. Hungarian Geographical Bulletin 63, 29–41.

¹⁴ (Oke, T.R., 1987) *IN* T, Houet, G, Pigeon. (2011). *Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors—an application on Toulouse urban area (France)*. Environmental Pollution 159, 2180–2192.

fonction de celles-ci, on peut examiner les processus (aérodynamiques, thermiques, hydriques,...etc.) qui s'y produisent, et qui ne sont pas forcément les mêmes ; ou n'ont pas les même répercussions. Selon (Oke T.R., 2004), *L'étude de climat urbain nécessite de distinguer différentes échelles horizontales et verticales.*

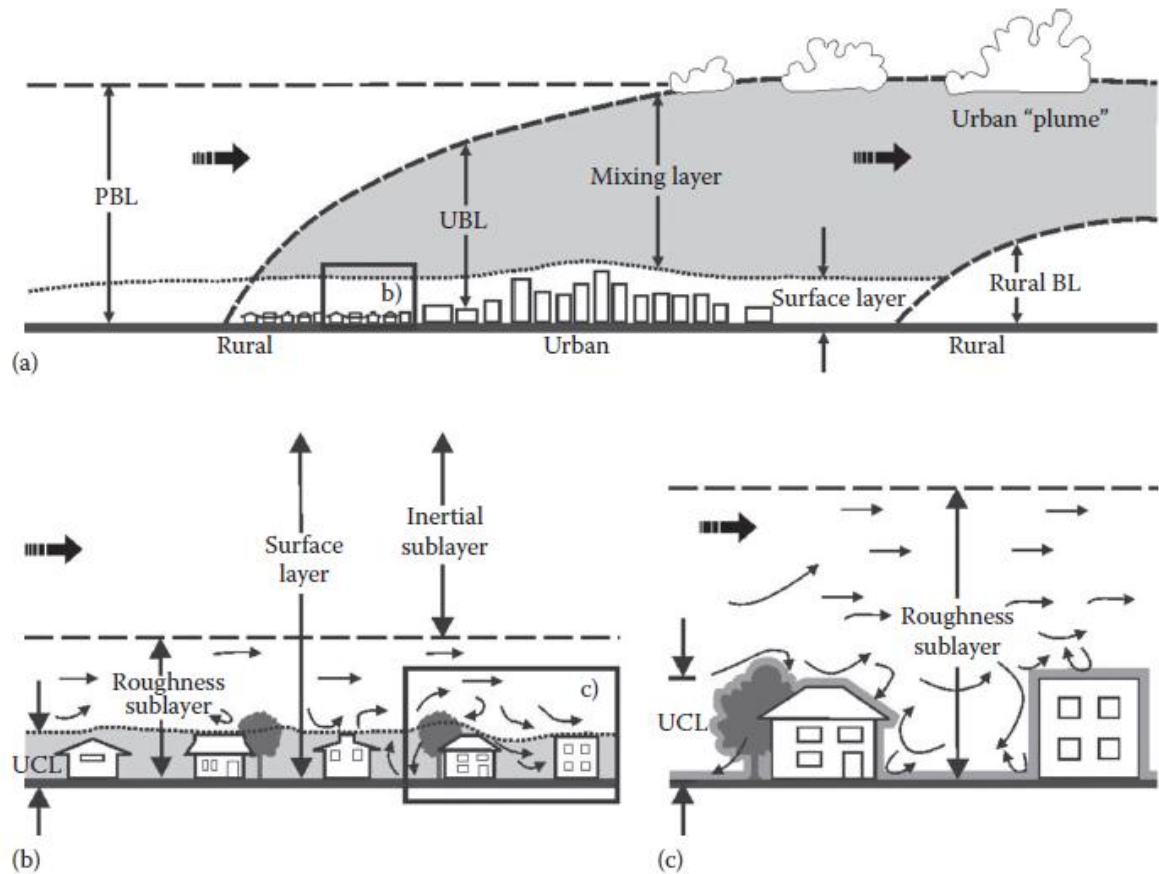


Figure 1.1 : Représentation schématique de la couche limite urbaine (CLU) à méso-échelle (a), à l'échelle locale (b) et à micro-échelle (c). *Source: (Fernando H.J., 2012)*

A l'horizontal, trois échelles spatiales sont généralement utilisées (figure 1.1):

- *La micro-échelle* : permet de caractériser les phénomènes climatiques qui existent au niveau d'un bâtiment, d'une rue, d'un jardin...etc. cette échelle fait référence à une zone s'étend de 0,01 à 1000m.
- *L'échelle locale* : se concentre sur les effets climatiques qui se produisent dans une dimension spatiale allant de 100m à 50 Km, dont les formes urbaines considérées sont les quartiers, les parcs....Selon (Oke T.R., 2004) elle correspond à l'échelle pour laquelle les stations météorologiques sont conçues.

- *La méso-échelle* : concerne le comportement climatique au niveau d'une agglomération et ses périphéries, elle s'étend sur plusieurs dizaines de kilomètres (de 10 à 200 Km).

A l'échelle verticale, les climatologues reconnaissent deux couches d'interactions différentes, distinguées d'abord par Oke T.R. (1976) :

- *La couche limite de canopée urbaine (UCL –urban canopy layer)* : c'est le volume d'air situé immédiatement au-dessus de la surface active du sol, avec sa limite supérieure approximativement au niveau des toits, elle est non homogène et turbulente par la présence des différents éléments de rugosité (bâtiment, végétation.etc.), c'est dans l'UCL ou se situe la plupart des sources des polluants et des récepteurs (hommes, végétation, matériaux.etc).
- *La couche limite urbaine (UBL –urban boundary layer)* : C'est la couche atmosphérique qui se superpose à la couche UCL, défini par Stull R.B. (1988), *comme la partie de l'atmosphère qui est directement influencée par la présence de la surface de la terre.*¹⁵ Elle est largement affectée par les processus de la macro-échelle et est modifiée par la présence des actions anthropiques.

1.2.2. Définition de l'îlot de chaleur urbain:

L'existence d'un climat "*spécifiquement urbain*" a été mis en évidence d'abord par Luck Howard à plus d'un siècle (1818), à la suite d'une étude scientifique de température de l'air dans et autour la ville de Londres. Howard reportait que les zones urbaines sont soumises à un microclimat particulier caractérisé par des températures souvent plus élevées qu'en zones rurales, ce qu'on appelle aujourd'hui îlot de chaleur urbain. Le profil de température représenté dans la figure (1.2) illustre une distribution très généralisée de la température de l'air près de surface.

L'ICU fait référence à la manifestation climatique la plus connue attribuable à l'urbanisation. Il décrit selon (Voogt J.A., Oke T.R., 2003), *l'excès de chaleur de l'atmosphère urbain par rapport à l'environnement rural*. Oke T.R. (1987) a noté que l'intensité d'ICU peut aller de 2°C à 12°C en fonction de la taille de la ville et de la densité d'habitants.

¹⁵ I.N, Harman. (2003). *The energy balance of urban areas*. PhD thesis, University of Reading.

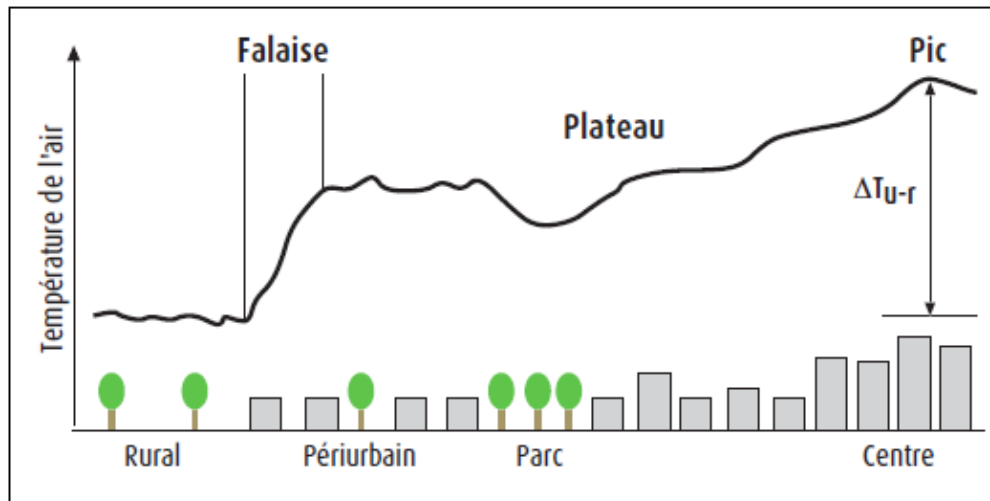


Figure 1.2 : Variation spatiale de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée. *Source : (Pigeon G., et al., 2008)*

1.2.3. Les types d'ICU, les caractéristiques et les processus sous-jacent :

Selon (Fernando H.J. 2012 ; Stewart I.D., 2011a), différents types d'ICU peuvent être distingués par leurs échelles (spatiales et temporelles) et les processus responsables de leur formation, ou par leurs méthodes d'investigation. *La chaleur urbaine peut être mesurée comme des phénomènes surfaciques ou atmosphériques*¹⁶.

1.2.3.1. L'ICU surfacique :

Il traduit le réchauffement proprement dit de surface, défini par les températures de la couche radiative qui se prolonge au-dessus du sol, et qui peuvent être observées en utilisant la télédétection thermique des rayons infrarouges émis ou réfléchis par la surface terrestre. L'ICU de surface est affecté par les flux radiatifs solaires, donc son ampleur –qui dépend de la différence de température entre les matériaux urbains et les matériaux ruraux – est mieux visualisée pendant la période diurne.

1.2.3.2. Les ICU atmosphériques :

Il s'agit de réchauffement de l'atmosphère au-dessus de la surface, ils peuvent être distingués selon (Oke T.R., 1976) en deux types:

¹⁶ B, Stone Jr., M.O, Rodgers. (2001). *Urban form and thermal efficiency: how the design of cities influences the urban heat island effect*. Journal of the American Planning Association 67, 186–198.

- le premier correspond à l'échange de chaleur entre la surface et le volume d'air au sein de la couche limite de canopée urbaine. Son amplitude -noté $\Delta T_{(u-r)}$ - est la plus documentée dans la littérature, s'exprime comme étant la différence de température de l'air entre les villes et les zones rurales périphériques, elle se distingue mieux en dehors de la période chaude de la journée lorsque la chaleur emmagasinée dans la structure urbaine est restituée dans l'atmosphère. Le profil des variations diurne et nocturne de la magnitude d'ICU est caractérisé dans la figure 1.3.

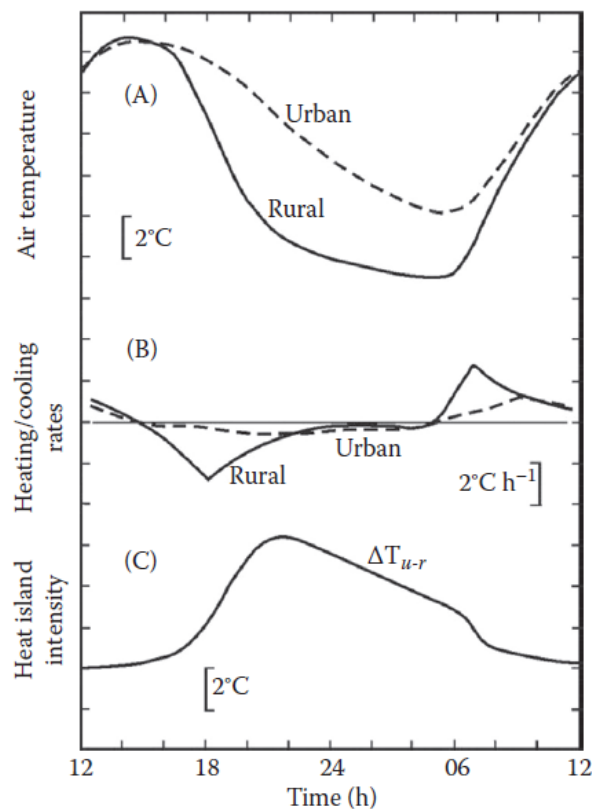


Figure 1.3 : Cycle journalier de l'ICU. (A) température de l'air urbaine et rurale. (B) taux de rafraîchissement urbain et rural. (C) l'amplitude de l'ICU. *Source: (Fernando H.J., 2012)*

- Le deuxième concerne les variations de température de l'air à une échelle plus grande, la couche limite urbaine. Selon (Leconte F., 2014), dans le cas du vent régional faible, il prend la forme d'un dôme d'air chaud situé au dessus de l'agglomération. Cependant, ce type d'ICU a reçu moins d'attention que son homologue de canopée urbain, en raison des difficultés expérimentales à mesurer la température à de grandes hauteurs.

1.2.4. Le bilan énergétique de surface urbaine :

La définition communément admise de l'ICU est la différence de température entre une zone urbaine et sa campagne environnante. L'existence de cet écart de température découle de la différence des caractéristiques biophysiques de surface entre les deux paysages, qui réagissent différemment avec le climat. Ces interactions ont largement affecté les processus radiatifs, thermiques, aérodynamiques et hydriques de l'atmosphère.

Les ICUs –conséquence thermique de ces modifications– *se développent en raison de différences de budget énergétique en paysage urbain et rural*¹⁷. Comprendre l'équilibre énergétique et la nature de répartition des flux de chaleur, ainsi leur relation avec les propriétés de surface, permet d'expliquer-en grande partie- les environnements thermiques engendrés dans ces milieux. Une approche largement utilisée est d'établir le bilan énergétique de la surface urbaine, dont la magnitude de ses termes varie en fonction de plusieurs facteurs de sources naturelles et anthropiques, et de le comparer avec celui de l'environnement rural, dont ce milieu représente selon (Leconte F., 2014), *l'arrière plan climatique à partir duquel l'amplitude d'ICU est habituellement calculée*.

La ville de par sa nature rugueuse et non homogène est conventionnellement représentée par une surface fictive lors de l'établissement de son bilan d'énergie. Oke T.R., (1987) *a adopté une approche plus macroscopique et a proposé d'établir le bilan d'énergie pour un volume de contrôle allant du sol au sommet des bâtiments*¹⁸, (figure 1.4). La limite haute du volume constituée par la hauteur moyenne des toitures (ABCD) est appelée canopée urbaine. L'analyse du comportement thermique au sein d'une rue canyon est souvent utilisée pour étudier la ville, dont l'équation énergétique a été formulée par (Oke T.R., 1987), exprimée en w/m^2 :

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta Q \dots \dots \dots (1.1)$$

L'équation (1.1) exprime la quantité d'énergie échangée au sein d'une surface, '*elle traduit l'équilibre entre les sources et les puits d'énergie*'¹⁹. Les termes sources représentent les apports d'énergie nette reçue par une entité de la surface urbaine, alors que

¹⁷ T.M, Giannaros., D, Melas. (2012). *Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: the case study of Thessaloniki, Greece*. Atmospheric Research 118, 103–120.

¹⁸ G, Pigeon, et al., (2008). *De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville*. Météorologie 39–47.

¹⁹ Ibid. p, 42.

la somme d'énergie dissipée et d'énergie stockée par ce même élément exprime les termes puits.

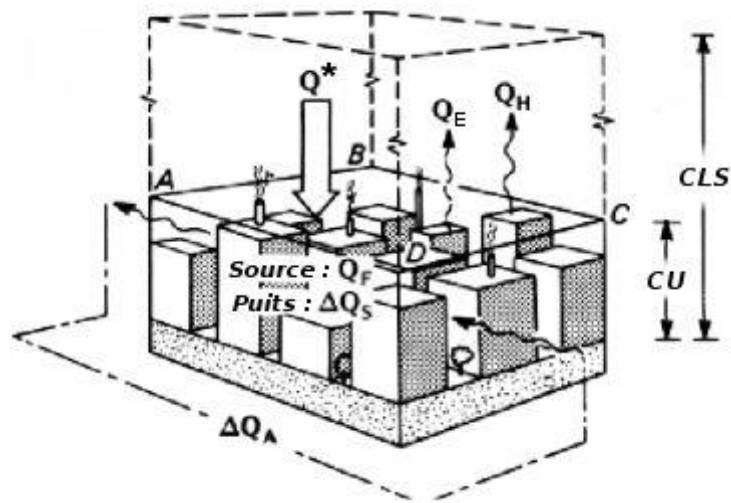


Figure 1.4 : l'approche de "la moyenne volumétrique" de l'équilibre énergétique urbaine. Notant les différents notations: Q^* le flux radiatif net ; toutes longueurs d'onde confondues, reçu par la surface, Q_F le flux de chaleur anthropique, Q_H le flux de chaleur sensible, Q_E le flux de chaleur latente, ΔQ_S le flux de chaleur de stockage, ΔQ_A le flux de chaleur advective horizontale. *Source :* (Bouyer J., et al., 2009)

- Le rayonnement net global incident Q^* fait référence à l'apport principal d'énergie de surface terrestre, provient initialement du soleil et de l'atmosphère. Q^* est compté, par convention, positivement pendant la journée (gains de l'énergie), et négativement la période nocturne (perte), c'est le résultat du bilan radiatif dans le visible et l'infrarouge :

$$Q^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \dots \dots \dots (1.2)$$

Où: K_{\downarrow} et K_{\uparrow} sont les flux solaires descendant (incident) et réfléchi, respectivement.

L_{\downarrow} et L_{\uparrow} sont les flux infrarouge descendant (incident),(émis par les particules en suspension dans l'atmosphère) et ascendant (émis par la surface).

- Q_F désigne le dégagement de chaleur anthropique produite par l'ensemble des activités humaines (transport, chauffage/climatisation, activités industrielles). C'est un terme toujours positif.
- Q_H/Q_E sont respectivement les flux turbulent de chaleur sensible et latente, qui correspond au transfert d'énergie qui s'établi entre la surface et l'atmosphère.

- ΔQ_S représente l'absorption nette et la libération de l'énergie à partir d'un système urbain. Il est généralement positif pendant la journée avec l'accumulation de presque la moitié du rayonnement net du jour dans le tissu urbain (terme puits), et négatif la nuit lorsqu'il restitue la chaleur stockée (terme source).
- ΔQ_A exprime les flux de chaleur perdus par advection, lorsque l'air circule à travers l'ensemble des interfaces verticales du volume de contrôle. Il est généralement considéré comme négligeable pour les sites ayant une étendue de forme horizontale.

Les termes de l'équation (1.1) dépendent de la localisation et les caractéristiques de milieu urbain, par conséquent le bilan énergétique est modifié lorsque ces termes sont variables.

Les paragraphes suivants se sont focalisés sur la présentation des facteurs à l'origine du microclimat thermique urbain, qui présentent toute une modification urbaine des bilans radiatifs et énergétique des surfaces. Oke T.R. (2004) a déclaré que l'excès des températures de l'air que l'on observe régulièrement, près du sol, dans les villes, résultent de la modification en : morphologie urbaine, Couverture urbaine, matériaux urbains et les activités humaines (figure 1.5).

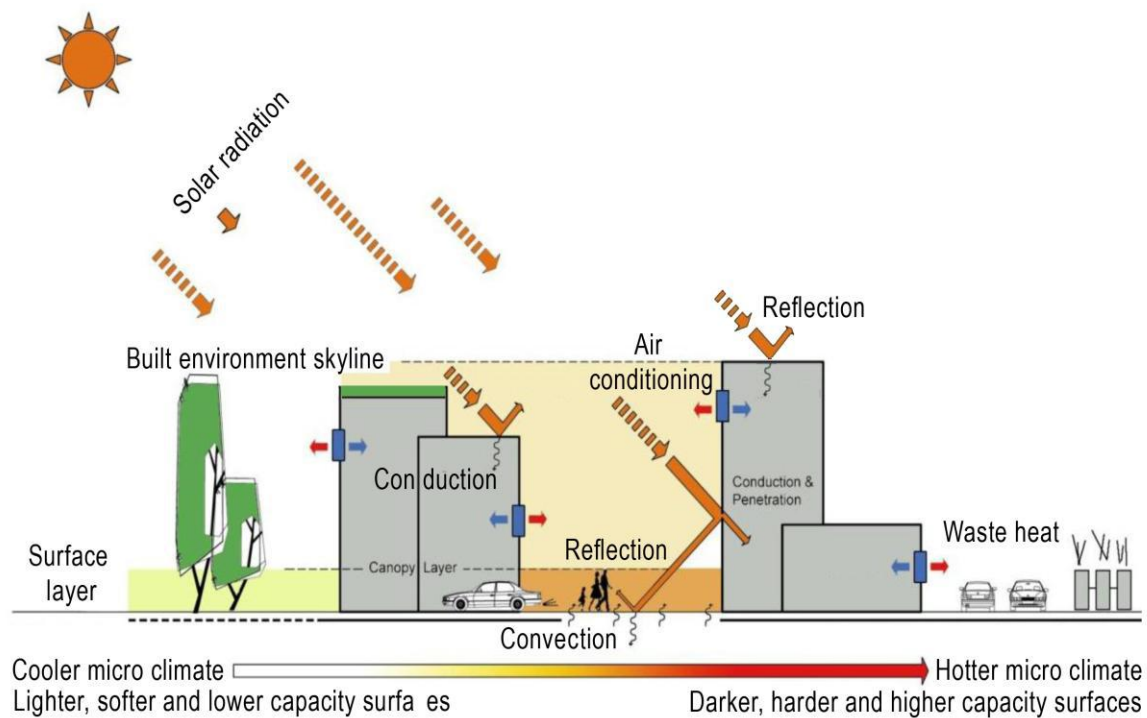


Figure 1.5: morphologie urbaine, Couverture urbaine, matériaux urbains et le métabolisme urbain ont contribué dans l'effet d'ICU. *Source : (Lehmann S., Sharifi E., 2014)*

1.2.4.1. La couverture du sol :

‘ ‘ *Fait référence aux matériaux physiques spécifiques à la surface de la Terre* ’ ’²⁰, qu’il s’agisse selon (Oke T.R., 2004) de la végétation, d’infrastructure urbain, d’eau, du sol nue...etc. Elle affecte l’environnement thermique local en modifiant le potentiel de chauffage/ refroidissement du sol, la disponibilité d’humidité ; l’albedo de surface...etc.

*L’environnement urbain, modelé et habité par l’homme est en grande majorité imperméable du fait de l’urbanisation qui est le processus de transformation de la couverture du sol en formes urbaines*²¹. De la perméabilité (la fraction du sol avec une couverture naturelle perméable) et l’imperméabilité (la fraction du sol pavée avec des matériaux imperméables) dépend selon (Stewart I.D., 2011a), la quantité d’eau disponible dans le sol, donc le potentiel d’évapotranspiration. Il est donc cruciale d’expliquer comment la place donnée à l’eau et à la végétation –source principale d’humidité- pèse sur le climat. De manière générale la plus part des études portant sur ces deux éléments mettent en évidence leur effet positif en termes d’amélioration de climat urbain, on cite :

Taha H. (1997) qui s’est intéressé dans son revu, –entre autre- à l’influence du système d’évaporation sol-végétation sur l’environnement thermique urbain. Les données d’observation et de simulation numérique ont indiqué qu’une augmentation du taux de végétation dans la ville peut entraîner une diminution de 2°C dans la température de l’air, et peut atteindre à 4°C dans des conditions météorologiques favorables.

Dans (Chen X.-L, et al., 2006), en s’appuyant sur les données de télédétection, les chercheurs ont utilisé -entre autre- l’indice de végétation (NDVI) et l’indice d’eau (NDWI) pour quantifier la relation entre la température de surface et l’occupation de sol de la ville de Pearl River Delta –chine-. Les résultats ont démontré la forte corrélation négative entre la présence du couvert végétal ou d’eau et les Ilots de chaleur. L’étude permet d’identifier ces deux facteurs comme des stratégies pertinentes pour lutter contre le réchauffement local.

Dans la même ligne, Zhang Y., et al. (2012) ont combiné entre l’utilisation des images Landsat TM et le système d’information géographique (SIG), pour estimer l’indice

²⁰ J.P, Connors., et al (2013). *Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona.* Landscape Ecology 28, 271–283.

²¹ B, Bechtel., et al. (2015a). *Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities.* ISPRS International Journal of Geo-Information 4, 199–219.

de végétation normalisé (NDVI), et la température de surface (LST) de la ville de Wuhan (China). En produisant des cartes thermiques de cette région, Ils ont mis en évidence l'existence d'une corrélation inverse entre la présence de la végétation et la distribution spatiale de l'ICU.

Le potentiel rafraichissant de végétation-eau a fait l'objet de plusieurs d'autres publications, citant (Gomez F., et al., 1998; Rosheidat A., 2014; Vinet J., 2000)

En termes de bilan thermique, l'utilisation abondante des matériaux artificiels (asphalte, béton, etc.) et par conséquent le remplacement des plantes et des sols humides par des surfaces revêtus et imperméables, a grandement altéré l'équilibre énergétique de surface en réduisant le taux des flux de chaleur dit latente "QE" dispenser pour dégager la vapeur d'eau rafraichissante. Le déficit de l'eau pour le flux de chaleur latente est en raison:

- D'une part, de la minéralisation des espaces urbains qui n'assure pas la filtration et l'absorption des eaux de précipitations. Ces eaux sont rejetées directement vers les réseaux souterrains d'évacuation, ainsi, l'évaporation est fortement diminuée dans l'atmosphère.
- s'ajoute à cette imperméabilisation, la faible présence de la couverture végétale et donc la diminution de la capacité de paysage à baisser les températures journalières par évapotranspiration et par ombre portée.

La modification du bilan énergétique due à la faible disponibilité de l'eau et le manque de la végétation se traduit par une baisse des flux turbulents de chaleur latente QE nécessaire pour prélever de la chaleur dans l'environnement urbain.

1.2.4.2. La morphologie urbaine :

Selon (Giguère M., 2009) *La morphologie urbaine décrit la forme tridimensionnelle, l'orientation et l'espacement des bâtiments dans la ville.* Se caractérise généralement par un élément répétitif appelé "canyon urbain", c'est un élément structurel de base, introduit universellement pour décrire les arrangements géométriques bâtiment-rue, et les conséquences radiatifs qui en découlent. La morphologie urbaine est un modificateur important dans le système d'équilibre radiatif de l'environnement bâti, elle affecte la quantité d'énergie reçue et émise des surfaces des infrastructures.

Pendant la journée, les flux radiatifs descendants, en atteignant les surfaces actives du canyon, sont piégés par un processus d'inter-réflexion et de multiple absorption avec l'ensemble des surfaces de la rue. En outre, la part des flux radiatifs réfléchis par les parois ne parviennent à ressortir vers l'atmosphère que partiellement. Ce phénomène porte le nom de "piégeage radiatif" (figure 1.6).

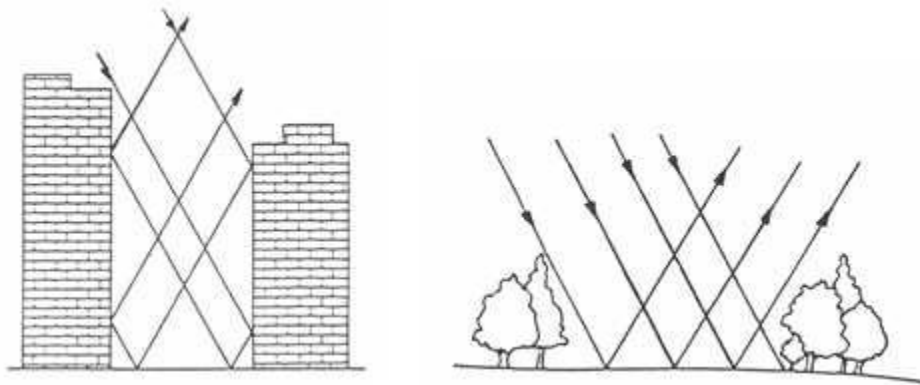


Figure 1.6 : Le piège radiatif des rues. *Source: (Colombert M., 2008)*

Le canyon urbain est aussi un exemple de piégeage du rayonnement infrarouge libéré (pour refroidissement) la nuit par les surfaces. La dissipation de rayonnement infrarouge est fortement contrainte du fait de la quantité réduite du ciel observable depuis l'espace urbain. *La réduction associée du refroidissement radiatif nocturne est une raison principale des différences de température nocturnes entre les zones urbaines et rurales*²².

Deux paramètres largement utilisés pour quantifier la relation entre la géométrie urbaine et les variations nocturnes de température de l'air dans la ville :

Selon (Oke T.R., 1987) *le SVF est le paramètre le plus approprié pour décrire la géométrie urbaine*²³. Le facteur vue de ciel (Sky view factor en anglais), est la portion de ciel observable depuis le niveau du sol, défini par Watson I.D., et Johnson G.T., (1987) - cité dans (Chen L., et al., 2012; Colombert M., 2008; Gal T., et al., 2009; Skarbit N., Gál T., 2015)- comme le rapport entre le rayonnement reçu (ou émis) par une surface plane à celui émis (ou reçu) par la totalité de l'environnement radiatif sphérique. Le SVF est une

²²(Oke T.R., 1987; Oke T.R., et al., 1991) IN I.N, Harman. (2003). *The energy balance of urban areas*. PhD thesis, University of Reading.

²³ S, Juuso., et al., (2012). *Effects of scale on modelling the urban heat island in Turku, SW Finland*. Climate Research 55, 105–118.

mesure sans dimension, exprimé en unité de proportion, *varie entre 0 et 1 qui représentent des espaces totalement obstrués ou libres respectivement*²⁴.

Une approche de simulation a été établie par (Chen L., et al., 2012) pour étudier le rapport entre les variations diurne de température intra-urbaine, dans les zones à haute densité à Hong Kong, et la géométrie du canyon exprimée en fonction du SVF. Les résultats ont révélé une corrélation inverse entre les valeurs moyennes spatiales du SVF et les températures de l'air intra-urbain. Selon l'étude une diminution de 0,15 dans les valeurs SVF pour une surface de 100m de diamètre, peut conduire à une élévation d'un degré Celsius de température.

Trois méthodes sont souvent utilisées pour estimer les valeurs SVF en milieu urbain (voir article (Chen L., et al., 2012))

Il pourrait être obtenu par les méthodes analytiques (géométriques), développées d'abord par (Oke, 1981), basées sur le ratio entre la hauteur et la largeur du canyon (H/W). Dans le cas un canyon parfait, le SVF est calculé dans le point centre des murs, se définit de la façon suivante :

$$SVF = \cos B \quad \dots \dots \dots (1.3)$$

Avec : B est l'angle d'élévation et,

$$B = \tan^{-1}(H/0,5W) \quad \dots \dots \dots (1.4)$$

Selon (Debbage N., 2013), ces premières équations négligent souvent la végétation et d'autres obstacles, ce qui dans certains cas peuvent produire des valeurs de SVF non valides.

Une autre option pour déterminer les valeurs SVF est d'adopter une visualisation du ciel avec un appareil photographique 'fish-eye', qui a l'avantage d'exprimer la géométrie urbaine dans une vision de perspective (3D), en projetant la voûte céleste sur un plan circulaire. Le fish-eye permet d'estimer la proportion entre la fraction obstruée et la fraction dégagée sur le ciel.

²⁴ (Oke T.R., 1988) IN T, Gal., et al., (2009). *Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate*. Theoretical and Applied Climatology 95, 111–123

L'apparition de nouvelles technologies telles que les algorithmes informatiques permet d'ouvrir de nouvelles possibilités pour obtenir des valeurs SVF plus fiable, applicables dans les recherches sur les ICUs. Ces méthodes s'appuient sur l'utilisation d'une base de données (3D) de surface, elles peuvent être séparées selon les données utilisées Raster ou Vecteur. (Thomas G., et al., 2014) ont comparé entre l'application de ces deux approches dans la dérivation des moyennes surfaciques du SVF dans l'ensemble de la zone urbaine de Szeged (Hongrie), ils ont révélé que les deux méthodes ont fourni des valeurs similaire, mais le modèle Raster est significativement plus rapide que le modèle Vecteur.

Le second indicateur est Le rapport d'aspect, *c'est la hauteur moyenne des principaux éléments de rugosité (arbres, bâtiments) divisé par leur espacement moyenne*²⁵, on le note H/W. (Ali-Toudert F., Mayer H., 2006) font appel à la simulation numérique pour l'étude de la dépendance de la configuration des rues (aspect ratio) et leurs orientations sur le développement du microclimat thermique. Ils ont constaté que la température de l'air au sein d'un canyon diminue avec l'augmentation du rapport d'aspect. Selon (Leconte F., 2014), *A l'échelle de la ville, où la hauteur ainsi l'espacement varient, les valeurs (H/W) peut être obtenu par la relation suivante proposé dans* (Masson V., 2000) :

$$H/W = 0,5 (S_{\text{vertical}}/S_a - S_{\text{bâti}}) \dots\dots\dots (1.5)$$

Avec : S_{vertical} la somme de toutes les surfaces verticales de l'aire de calcul, S_a la surface de la zone de calcul et $S_{\text{bâti}}$ la somme de toutes les zones occupées par des constructions dans la zone de calcul. (Houet T., Pigeon G, 2011) ont utilisé cette équation pour dériver les valeurs (H/W) dans la ville de Toulouse (France).

La rugosité effective aérodynamique est un autre paramètre lié aux effets de la morphologie urbaine sur l'écoulement de l'air.

Le paysage urbain avec sa structure tridimensionnelle des bâtiments a fortement perturbé les écoulements du vent en modifiant leurs profils logarithmiques (figure 1.7). Il constitue un obstacle qui entraîne une réduction dans les vitesses moyennes du vent atteignant selon (Bouyer J., 2009) à 50% par rapport à celles mesurées dans les surfaces

²⁵ T.R, Oke. (2004). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. Rapport technique 81, World Meteorological Organization.

libres. Le ralentissement des masses d'air est due selon (Villadiego Bernal K., 2014) à la force du frottement en contact avec les aires urbaines. Ce facteur est connu en tant que rugosité.

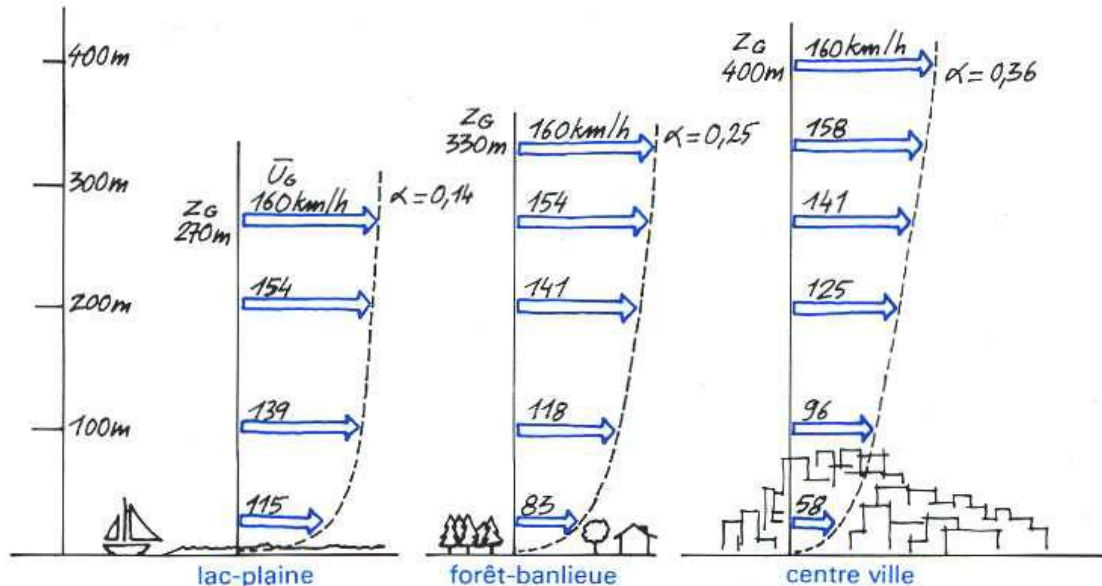


Figure 1.7: Profils verticaux de vitesses de vent, en fonction puissance, au dessus de 3 terrains de rugosités différentes. Source : (Bouyer J., 2009)

Deux paramètres clés sont utilisés pour caractériser la rugosité à savoir : la longueur de rugosité (Z_0) et la hauteur de déplacement (Z_D). La détermination de ces deux facteurs n'est pas une tâche facile. (Skarbit N., Gál T., 2015) ont résumé qu'il existe trois méthodes de calcul :

- les méthodes basées sur les observations in situ des vents et des turbulences, dites les méthodes de la micro-météorologie.
- Les méthodes de classification de rugosité en catégories et l'estimation visuelle, dans ce contexte (Davenport A.G., et al., 2000) ont établi une corrélation entre la morphologie rurale et urbaine et les valeurs de rugosité effective (voir tableau 2.2, chapitre 02).
- Enfin les méthodes de la morphométrie utilisant les données de la géométrie de surface, basées sur des relations empiriques issues des études de souffleries concernant les écoulements sur des constructions régulières.

Les deux chercheurs ont développé une nouvelle méthode informatique, automatique, pour le calcul des indicateurs de rugosité, s'appuyant sur des bases de données détaillées sur les bâtiments et des photographies aériennes de haute résolution. La méthode a été testée à Debrecen, Hongrie.

En terme de bilan énergétique, La nature rugueuse de l'environnement urbain a limité les échanges thermiques des flux de chaleur sensible QH par convection – *échange associé aux transferts aérodynamiques de chaleur entre les surfaces solides et les masses d'air*²⁶ – en modifiant la production des turbulences mécaniques ce qui favorise la stagnation de l'air chaud en ville. L'excès de chaleurs sensible engendre un réchauffement de l'air urbain, cet air va générer des flux convectifs : *l'air chaud de la ville va s'élever, produisant –si le vent est faible- des cellules convectives (dôme urbain) se formant dans la couche limite urbaine.*²⁷

1.2.4.3. Les matériaux urbains :

L'environnement urbain connaît des modifications frappantes et continues, d'origine humaine, dans les caractéristiques physiques de surface telle que ses matériaux, *en particulier ceux constituant les revêtements de sols, de façades et des autres éléments de mobilier urbain, qui ont la propriété de modifier directement les températures de surface de la ville et indirectement les températures d'air*²⁸. Tout changement a pour corolaire directe une modification dans l'équilibre du bilan énergétique. Selon (Champiat C., et al., 2008), *les propriétés optiques et thermiques des matériaux utilisés dans la construction des bâtiments et des revêtements du sol favorisent la rétention de chaleur par le tissu urbain.* Ces propriétés sont largement différenciées de celles de l'environnement rural qui emmagasine beaucoup moins de chaleur.

La réflectivité (albédo) des matériaux vis-à-vis du rayonnement solaire, tout comme leur émissivité, sont les paramètres radiatifs les plus importants pour étudier les perturbations thermiques engendrées dans ces milieux. Selon (Colombert M., 2008), *Les matériaux ayant un albédo et une émissivité élevés s'échauffent moins vite quand ils sont exposés au soleil et réduisent ainsi le transfert de chaleur à l'air environnant.*

²⁶ J, Bouyer. (2009). *Modélisation et Simulation Des Microclimats Urbains-Étude de L'impact de L'aménagement Urbain Sur Les Consommations Énergétiques Des Bâtiments*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.

²⁷ A, Sakhy., et al., (2011). *Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris)*. In Dixièmes Rencontres de Théo Quant.

²⁸ J, Bouyer. (2009). Op.cit. p, 24.

L'albédo exprime le pourcentage d'énergie réfléchi par une surface par rapport à l'énergie solaire reçue par la même surface, dépend de la couleur et la rugosité des matériaux utilisés. Les zones urbaines contiennent un pourcentage élevé de surfaces non-réfléchissantes où leur albédo se situe selon (Taha H., 1997) dans l'intervalle de 0.1 à 0.2 plus faible que celui des zones moins urbanisées. *Le pouvoir de réflectivité affecte le potentiel de surface au réchauffement radiatif*²⁹, moins le rayonnement solaire est renvoyé, plus il sert à chauffer l'environnement. Comme le montre la figure 1.8, un écart de température de 45 K est constaté entre les revêtements blancs et noirs et, 20 K entre le béton et l'asphalte.

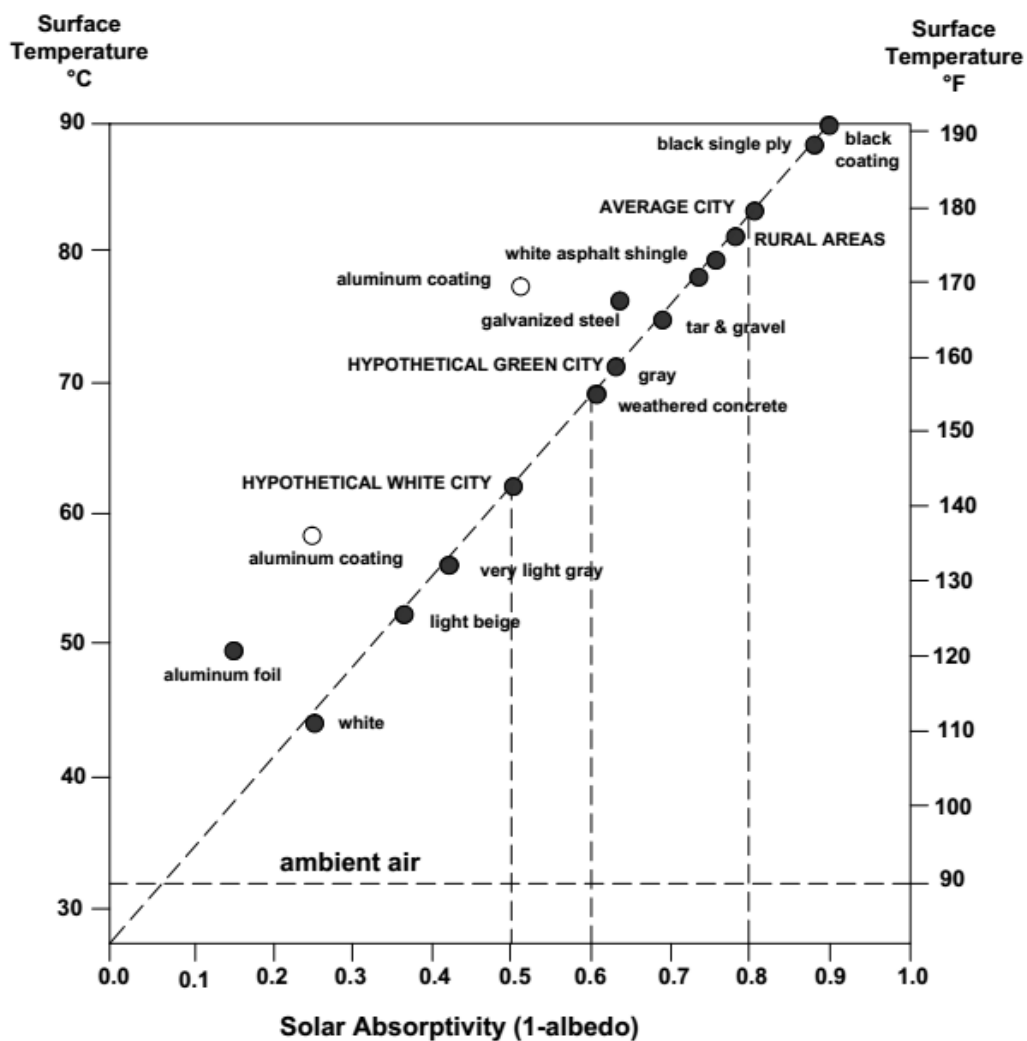


Figure 1.8: Absorption solaire vs température de surface d'une surface horizontale. Les données se réfèrent à une mi-journée d'été clair, sans vent à Austin, TX, ETATS-UNIS. *Source: adaptation de (Santamouris M., 2004)*

²⁹ I.D, Stewart. (2011). Redefining the Urban Heat Island. PhD thesis, University of British Columbia.

(Tukiran J.M., et al., 2015) ont avancé qu'un matériau est considéré comme étant "froid", si 25% du rayonnement solaire est réfléchi dans la surface (figure 1.9). Ils ont recommandé d'utiliser des matériaux à pouvoir réfléchissant élevé, en tenant compte en même temps de ne pas condamner le confort visuel par éblouissement, en contrôlant la luminance des matériaux. Dans la même ligne, (Mansouri O., 2008) a analysé l'influence de l'albédo sur le microclimat urbain et le confort thermique en simulant le climat à l'échelle d'une rue canyon –Coudiat- ville de Constantine d'un climat semi-aride. Il a été trouvé que les matériaux de haute réflectivité peuvent offrir un microclimat agréable.

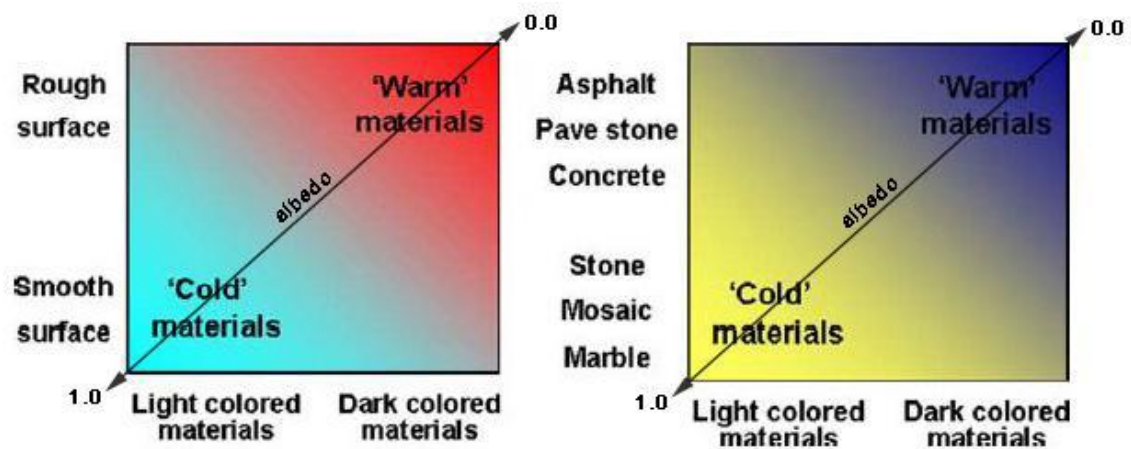


Figure 1.9 : Définition d'un matériau «froid» et «chaud», basé sur les caractéristiques physiques (couleur, texture de surface et de matériaux) et la valeur d'albédo. *Source :* (Tukiran J.M., et al., 2015)

Les surfaces minéralisées ont tendance à retenir la chaleur qui sera restituée à l'environnement la nuit sous forme de rayonnement infrarouge. Cela dépend de l'émissivité des matériaux. Les différents matériaux ont des capacités différentes à émettre le rayonnement thermique en raison de la quantité de rayonnement solaire incident, qu'ils absorbent, la capacité d'emmagasiner de la chaleur et de la longueur d'onde de l'énergie émise. Selon (Oke T.R., 1987), La plupart des matériaux (urbain et rural) rayonnent plus 90% de l'énergie radiante accumulée (tableau 1.1).

L'effusivité thermique est une autre propriété de surface qui affecte le stockage de chaleur dans les matériaux. Elle exprime la capacité thermique d'une surface à absorber une énergie et la restituer plus ou moins rapidement. Les matériaux d'un paysage urbains sont plus effusifs que les matériaux naturels (tableau 1.2), cependant, ces valeurs dépendent –généralement- de la disponibilité de l'humidité de surface : les sols humides ou

saturés ont une grande capacité d'accumulation et de dégagement de puissance thermique. Stewart I.D., (2011a) a considéré cet indicateur comme étant un facteur de control de la magnitude d'ICU. Cette dernière varie en fonction de la température de référence (rurale) obtenue au dessus d'une surface sèche ou humide.

Tableau 1.1: les valeurs typiques d'émissivité des matériaux communs. *Source:(Harris R., Couatts A., 2011)*

Matériaux	Émissivité moyenne typique (over 8-14 µm)
Neige humide	0.98 – 0.99
Végétation verte saine	0.96 – 0.99
Sol humide	0.95 – 0.98
Brique	0.93 – 0.94
Bois	0.93 – 0.94
Végétation sèche	0.88 – 0.94
Neige sèche	0.85 – 0.90
Verre	0.77 – 0.81
Papier d'aluminium	0.03 – 0.07

Tableau 1.2 : valeurs d'effusivité thermique pour différent matériaux urbains et naturels. *Source :* (Garland L.M., 2008)

Matériau	Effusivités thermique ($J.m^{-2}.s^{-0.5}.K^{-1}$)
Brique	1066
Verre	1108
Asphalte	1206
Tuile d'argile	1219
Béton dense	1785
Pierre	2220
Acier	14473
Sol argileux sec	596
Sol sableux sec	620
Eau	1543
Sol argileux humide	2213
Sol sableux humide	2552

1.2.4.4. Le métabolisme urbain :

Le terme ‘‘chaleur anthropique QF’’ représente les rejets de chaleur latente et sensible et les émissions des polluants dans l’atmosphère urbain, induit par les activités humaines. Ces activités quelque soient leur nature sont tributaire de la consommation énergétique.

(Sailor D.J., 2011) dans son revue, a identifié les trois secteurs de base consommateurs d’énergie, évoqués comme étant les contributeurs essentiels dans les actions anthropiques à savoir : le transport (combustion de pétrole des transports urbains), le bâtiment (chauffage et refroidissement des espaces habités) et l’industrie. Un quatrième secteur a été également discuté, liée aux émissions du métabolisme humain, mais il s'agit généralement d'un élément mineur dans la plupart des villes, car il représente moins de 10% du QF total, comme a indiqué (Sailor D.J., Lu L., 2004) cité dans (Stewart I.D., Kennedy C., 2016)

Il convient de noter que QF total correspond à la somme algébrique de l’ensemble des dégagements de chaleurs produits de ces secteurs, elle est plus importante en villes qu’en zones rurales du fait de la concentration des activités et des résidents, et est largement influencée par la latitude (les pays nordiques possèdent un taux élevé de production anthropique), la saison (l’utilisation de chauffage en période hivernale et la généralisation de climatisation pendant la période estivale), et la densité de population.

QF est un terme clé dans l’équation d’équilibre énergétique de surface urbaine, cette chaleur supplémentaire additionnée dans l’atmosphère urbaine « peut affecter la température de l’air près de surface et potentiellement jouer un rôle dans la création d’ICU »³⁰. En outre les actions anthropiques produisent plus de pollutions, de GES et des aérosols (figure 1.10). *Selon Escourrou (1981), l’atmosphère des villes, par rapport aux milieux ruraux, peut contenir dix fois plus de particules de poussières et jusqu’à 25% de molécules de gaz, modifiant ainsi la transparence de l’air et certains caractères du climat urbain*³¹. Le cinquième rapport de GIEC (2013/2014) a affirmé que la moitié de l’augmentation observée de la température moyenne à la surface du globe entre 1951 et 2010 est due à l’augmentation anthropique des concentrations de gaz à effet de serre et à

³⁰ H, Taha. (1997). *Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat*. Energy and Buildings 25, 99–103.

³¹M, Colombert. (2008). *Contribution à l’analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d’intervention sur la ville*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

d'autres forçages anthropiques conjugués. La pollution atmosphérique urbaine est responsable, d'une part, de la diminution du flux direct du soleil, car elle constitue un rempart au rayonnement, et d'autre part la transformation du rayonnement direct en infrarouges provoquant une élévation de la température.

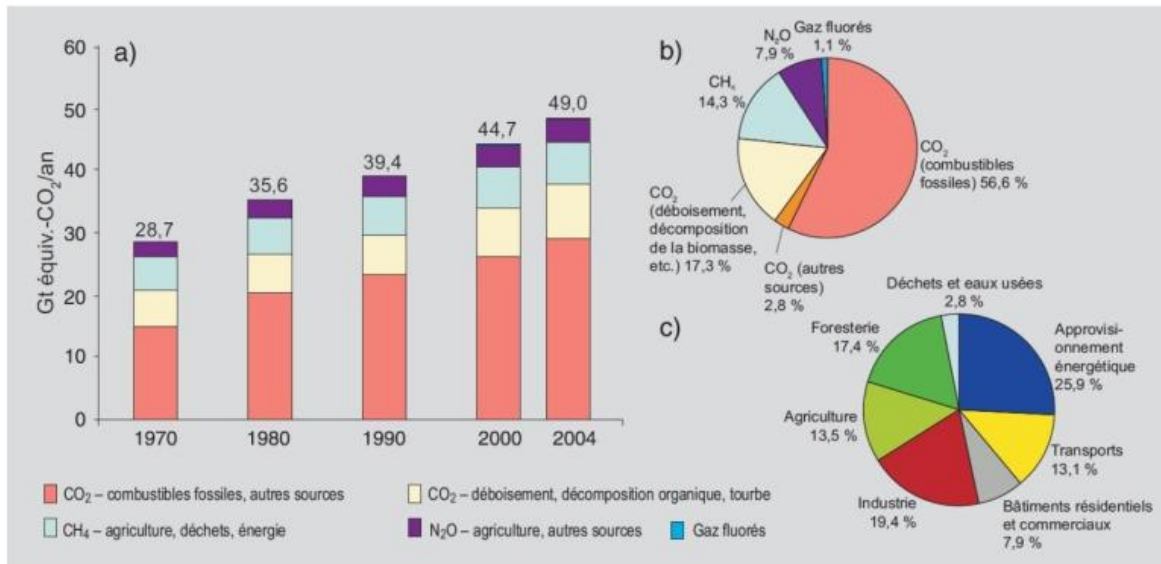


Figure 1.10 : a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO₂. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent-CO₂. (La foresterie inclut le déboisement). *Source : (Villadiego Bernal K., 2014)*

Dans (Taha H., 1992) (le travail est présenté dans (Taha H., 1997)), un profil de chaleur anthropique journalière a été élaboré, en se basant sur les scénarios de rejets de chaleur du secteur du bâtiment et du transport. Ce profil est ensuite couplé à un modèle météorologique, vise à estimer l'impact de QF sur la température de l'air. Les résultats de simulation ont révélé que la chaleur anthropique dans le centre d'une grande ville peut contribuer à la création d'un îlot de chaleur à hauteur de 2 à 3°C.

L'étude de (Zhou Y., et al., 2012) a pour finalité d'examiner la corrélation entre les émissions de chaleur anthropique et la consommation énergétique des bâtiments, dans la ville d'Indiana (États-Unis). QF est estimé à travers un modèle de bilan énergétique de surface, basé sur l'approche de télédétection, tandis que l'énergie des bâtiments par des données intégrées dans le système d'information géographique SIG. Les cartes de température de surface LST, d'albédo, et d'occupation de sol ont été aussi générées à partir

des images satellitaires Landsat 7, servent à estimer les paramètres de l'équation du bilan énergétique. Les images résultantes sont représentées dans la figure 1.11. Les résultats de l'analyse comparative et quantitative ont suggéré que QF est compatible avec la consommation énergétique des bâtiments. Il est clair aussi que les zones de fortes émissions anthropiques représentent les parties les plus vulnérables à la chaleur.

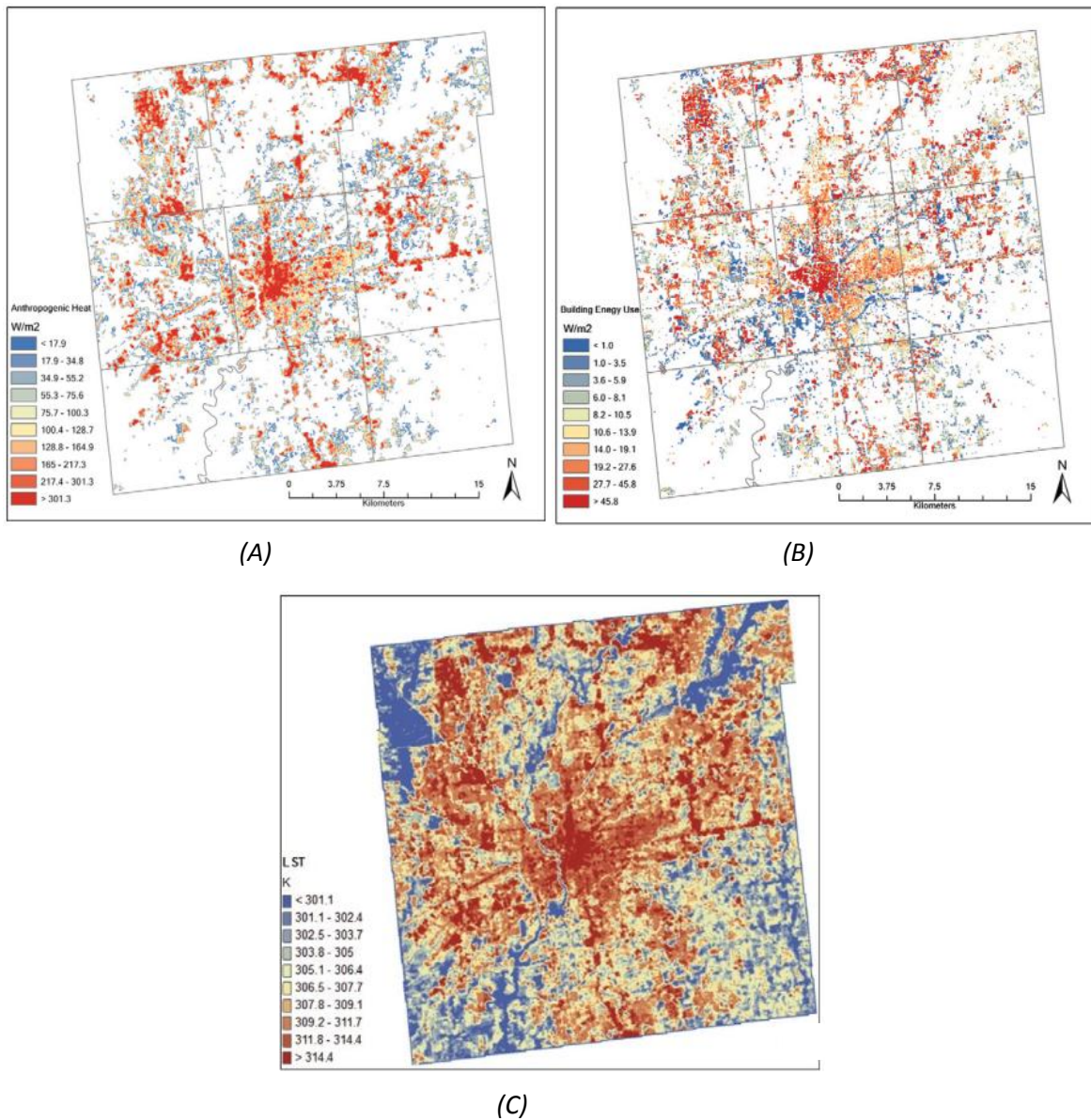


Figure 1.11: (A) La distribution spatiale de chaleur anthropique, (B) La répartition spatiale de la consommation d'énergie des bâtiments commerciaux et résidentiels, (C) la température de surface (LST). *Source: (Zhou Y., et al., 2012)*

Quantifier la part de responsabilité des activités humaines dans le développement des ICUs est complexe car il n'est pas possible d'estimer QF total directement. Le travail de

Sailor D.J., (2011) s'intéresse à la méthodologie et les modèles de calcul de ce flux anthropique, il a étudié plusieurs approches utilisées précédemment et a mentionné leurs limitations correspondantes. Sailor a proposé une feuille de route pour prendre en considération QF dans la modélisation de l'environnement urbain.

1.2.5. Genèse de l'îlot de chaleur urbain :

Les particularités du climat thermique urbain peuvent être évaluées par l'étude du cycle journalier du phénomène d'ICU, en comparant les modifications diurnes et nocturnes du bilan énergétique des surfaces : urbaine et rurale (Figure 1.12).

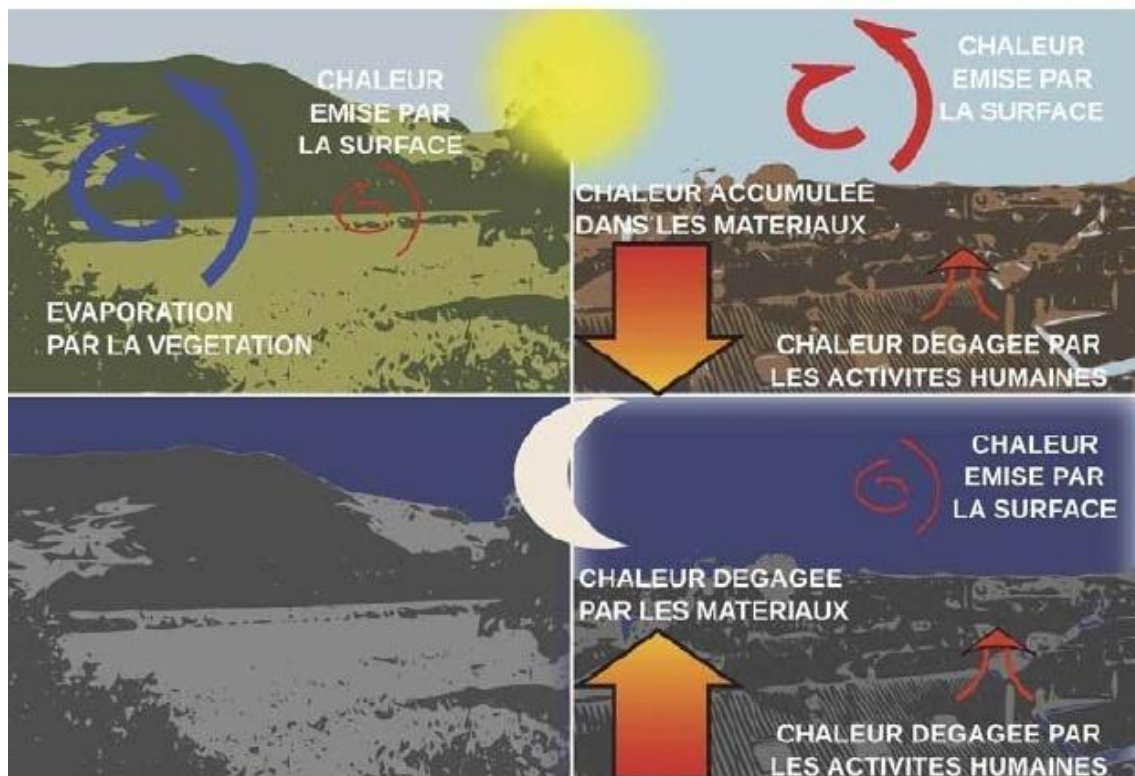


Figure 1.12 : Présentation du bilan d'énergie en zone rurale (à gauche) et en zone urbaine (à droite), le jour (en haut) et la nuit (en bas). *Source : (Pigeon G., et al., 2008)*

Pendant la journée, deux phénomènes s'additionnent pour la formation d'ICU : les radiations solaires qui participent à l'échauffement des surfaces et la chaleur anthropique. La configuration géométrique 3D de surface urbaine est en partie responsable de l'augmentation du potentiel de stockage thermique des flux solaires incidents Q^* , elle est propice au phénomène de piégeage radiatif en intégrant un processus d'inter-réflexion, et offre de grande surface d'échange. Q_s (le stockage des flux) est accentué par le caractère

totallement artificiel de la ville qui affecte la quantité d'énergie absorbée ou réfléchis dans l'environnement, par ses propriétés thermiques et radiatives (faible réflectivité, forte absorption...), ce qui favorise la rétention de chaleur dans le tissu urbain. La nature rugueuse de la ville favorise la stagnation de l'air chaud, et limite les évacuations de chaleur par convection. De plus les flux de chaleur latente Q_E nécessaires pour prélever de réchauffement dans la ville est fortement réduit du fait du déficit de l'eau et de végétation en surface pour l'évaporation et l'évapotranspiration. En fin les actions anthropiques produisent de la chaleur supplémentaire dans l'atmosphère urbaine qui participe à chauffer artificiellement la ville.

Pendant la nuit, la charge thermique de stockage Q_S emmagasinée pendant la journée, dans des conditions idéales d'ICU (nuit : $k^*=0$, calme $Q_H+Q_E\approx 0$), constitue la source principale d'énergie. La perte de rayonnement infrarouge est compensée par le retrait des flux de stockage et de chaleur anthropique. Q_S est restitué lentement vers l'atmosphère sous forme de rayonnement infrarouge qui sont eux-mêmes piégés dans la géométrie encaissée des rues, donc Le refroidissement de l'air par les pertes radiatif net est considérablement réduit en raison de la faible portion du ciel visible. A l'inverse, les échanges d'énergie sont très faibles en zone rurale, les pertes radiatifs net vers le ciel sont très développées et rapide, du fait des valeurs SVF élevées. Les caractéristiques physiques des matériaux naturelles ont favorisé la restitution facile de chaleur accumulée.

En conclusion, « *La distinction entre les milieux urbains et non urbains est alors due à la vitesse de refroidissement nocturne* »³², et l'anomalie positive de température se réfère à la différence des processus de refroidissement nocturne entre le milieu urbain et rural.

1.2.6. Les facteurs de contrôle d'ICU:

Les facteurs de contrôle sont des paramètres qui influent sur l'ampleur de réchauffement local, et qui diffèrent, selon (Stewart I.D, 2011a), des causes en ce qu'ils ne font pas –en eux même- générer de la chaleur de la ville. La plupart des études acceptent que l'amplitude d'ICU soit fortement sensible à la présence de certaines conditions météorologiques, ceux-ci font référence à la vitesse du vent, la nébulosité et les précipitations. Arnfield A.J (2003) résume l'influence de ces facteurs sur la magnitude de

³² (Mills G., 2008) IN P.J, Alexander., G, Mills. (2014). *Local climate classification and Dublin's urban heat island*. Atmosphere 5, 755–774.

l'écart de température comme suit : la diminution de la nébulosité ou de la vitesse du vent aura tendance à augmenter cette magnitude. Plusieurs travaux ont rapporté que les ICUs sont plus fréquents en présence de certaines conditions idéal : un ciel clair (absence des nuages), et calme (vent légère), et absence des précipitations (Exp: Leconte F., et al., 2015; Ng Y.X., 2015; Oke T.R, 2004; Stewart I.D, 2011a)

L'échelle temporelle (heure, jour, saison) est lui aussi un facteur de contrôle. l'ICU à une variabilité journalière récurrente, son intensité s'amplifie, en général, durant la période nocturne qu'en période diurne (quelques heures après le coucher du soleil). A l'échelle de la saison, l'amplitude d'ICU fluctue en fonction d'un cycle chaud et froid, ou sec et humide³³.

L'environnement rural ainsi que ses propriétés physiques sont également deux facteurs qui exercent un fort contrôle sur l'amplitude d'ICU. L'espace rural est pris comme l'arrière plan pour déterminer la température de référence à partir duquel la magnitude d'ICU est habituellement déterminée, donc toutes fluctuations dans ses propriétés (thermique, radiatifs ou hydriques) sera largement affecté l'ampleur de l'écart de température. En citant comme exemple la capacité d'absorption et de restitution de la chaleur (effusivité thermique) d'un site rural qui dépend largement de taux d'humidité. En fin, la magnitude d'ICU est liée à la taille et la morphologie de la ville (Fernando H.J., 2012), le nombre de population (Oke T.R., 1973), la forme et la fonction de la ville (Stewart I.D., 2011a) et le climat générale (Leconte F., 2014).

1.2.7. Effets et solutions :

Les perturbations climatiques thermiques au sein des zones urbaines sont conjuguées avec de multiples conséquences graves à différents niveaux. *Les ICUs contribuent au réchauffement global, ceci est* réaffirmé par le cinquième rapport d'évaluation GIEC (2013/2014) qui préside pour la période 1880/2012, une hausse de température de surface de 0,85°C à l'échelle planétaire.

« Les villes en modifiant le climat agissent directement sur les problèmes de la santé liées à la pollution et aux vagues de chaleur »³⁴. Les zones urbaines sont exposées à une

³³ I.D, Stewart. (2011a). *Redefining the Urban Heat Island*. PhD thesis, University of British Columbia,

³⁴ J, Vinet. (2000). *Contribution À La Modélisation Thermo-Aéroulque Du Microclimat Urbain. Caractérisation de L'impact de L'eau et de La Végétation Sur Les Conditions de Confort En Espaces Extérieurs*. Thèse de Doctorat, Université de Nantes.

pollution atmosphérique attribuée à la teneur de l'atmosphère des GES (émissions locales des polluants). Elles ont pour conséquence une dégradation de la qualité de l'air, et engendrent un environnement climatique propice au développement des maladies.

Aussi, « *les vagues de chaleurs dans un temps anticyclonique stable favorise la formation des ICUs avec des températures nocturnes élevées* »³⁵. Elles peuvent avoir des répercussions importantes sur la santé publique, la consommation énergétique et le confort thermique extérieur³⁶. Un tel stress de chaleur implique une demande d'énergie accrue (destinée –principalement– à la climatisation), qui pourrait atteindre selon (Doya M., 2010) 90% dans les secteurs résidentiels et tertiaires en 2030, conduisant à son tour à des pertes économiques importantes.

Les scientifiques ont pu apercevoir une augmentation de taux de mortalité pendant les épisodes de canicules. L'étude de (Cadot E., Spira A., 2006) citée dans (Sakhy A., et al., 2011), soulignant l'effet important des ICUs et des vagues de chaleurs dans l'accroissement du taux de surmortalité en France pendant la canicule de 2003, il a été enregistré une augmentation d'environ 60% par rapport à la mortalité attendue.

La vulnérabilité des villes au réchauffement local mis en évidence le besoin de se positionner face de cette problématique. Il convient donc de poser la question de lutte contre les ICUs par l'identification des stratégies d'atténuation et les interventions destinées à contrer le phénomène. La partie suivante présente quelques travaux de recherches menant sur ce sujet.

(Bouyer J., et al., 2009) se sont intéressés aux stratégies d'atténuation de phénomène d'ICU par la conception urbaine. Son article présente la synthèse de trois travaux de recherches, qui ont prouvé l'impact de la forme urbaine sur les paramètres climatiques et la consommation énergétique d'un bâtiment.

Le premier travail propose une méthode pour décrire les formes urbaines et leurs performances énergétiques. Un cadre de travail a été mis en avant, vise à classer ces formes en fonction d'échelles (d'un bâtiment unique au bloc urbain), selon plusieurs indicateurs morphologiques choisis par rapport à leur capacité à caractériser les

³⁵ A, Sakhy., et al., (2011). *Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris)*. In Dixièmes Rencontres de Théo Quant.

³⁶ F, Leconte., et al. (2015a). *Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements*. Building and Environment 83, 39–49.

performances énergétiques des différentes classes. Les résultats de recherches sont traduits en lignes directrices (typologies de formes urbaines et les indicateurs de performances climatiques développées) pour aider au design urbain.

Dans le deuxième travail, les chercheurs ont développé ‘‘l’indice d’Albédo (A)’’, c’est un indicateur de formulation simple utilisé pour caractériser la contribution radiative d’un district à l’effet d’ICU. Il est construit à partir d’une corrélation entre les caractéristiques des matériaux urbains (albedo) et les paramètres morphologiques urbaines. Il est défini selon l’équation suivante :

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{nbFacets} \rho_i S_i SVF_i}{\sum_{i=1}^{nbFacets} S_i} \dots\dots\dots (1.6)$$

Dont: ρ_i , SVF_i et S_i , l’albedo, le facteur vue du ciel et la surface de la facette numéro i respectivement.

Cet indice est appliqué dans le projet ‘‘ the Lyon Confluence’’ en France, et est validé en comparant les résultats avec les valeurs d’albedo obtenues par simulation informatique (Solene). (Bouyer J., et al. 2009) ont ajouté que Cet indicateur est un outil d’aide à la décision pour les premières étapes d’un projet, développé pour assister les concepteurs, les urbanistes et les décideurs dans leur évaluation et leur choix des matériaux de revêtement, de pavage et de toitures.

Le dernier travail propose un outil de simulation qui permet d’examiner les phénomènes thermiques qui se produisent dans l’environnement urbain et d’analyser l’effet des différentes conceptions urbaines sur le microclimat et sur la consommation énergétique d’un bâtiment. Le modèle permet de simuler les flux d’air, les effets thermiques et hydriques et d’évaluer le bilan énergétique dans le bâtiment en tenant compte du climat local.

(Lehmann S., Sharifi E., 2014) se sont intéressés aux stratégies à mettre en œuvre pour améliorer la qualité climatique dans les villes de climat chaud et humide. Les stratégies comprenant: la ventilation naturelle, la végétation, l’ombre et les matériaux de surface. Trois villes représentatives du climat chaud et humide dont deux historiques (Sana’a- Yemen et Bushehr- Iran), et une contemporaine (Dubai Marina- Émirats arabes

unis), ont été choisis pour effectuer une étude comparative des différentes stratégies d'atténuation d'ICU, l'objectif est de proposer des lignes directrices de conception qui peuvent être utilisés dans les villes sollicitées par le même climat. La synthèse du travail est présentée dans les points suivants :

- Augmenter l'ombre permanente et continue sur l'espace public pour diminuer l'exposition des matériaux de surface au soleil en été.
- Concevoir des espaces publics sensibles aux vents pour modérer l'effet d'ICU en été.
- Augmenter l'utilisation de matériaux clairs et perméables avec une haute capacité calorifique et une faible conductivité thermique dans l'espace public.
- Éviter l'utilisation d'une grande quantité d'eau de surface sans fournir l'ombre appropriée
- Maximisation du pourcentage de la végétation urbaine par habitant pour atténuer la chaleur résiduelle anthropique dans l'espace public
- Amélioration de la mobilité de l'espace public et de la ventilation naturelle pour réduire les émissions de carbone.

Une grande famille de solutions pour lutter contre l'ICU est abordée dans de multiples revus de littérature, couvrant divers domaines professionnelles, on cite comme exemple: la climatisation et la végétation (De Munck C., 2013), l'eau et la végétation (Vinet J, 2000), les parcs urbains (Feyisa G.L., et al., 2014), végétation urbain (Bellara S., and Abdou S., 2012), l'albedo de surface (Yang J., et al., 2015), l'eau, l'ombre, les arbres et les espaces vert, les matériaux à albédo élevé (Santamouris M., 2004). Les travaux présentés plus haut ne sont que l'illustrant de toutes peuvent exister sur ce sujet. Cependant, il faut rappeler que chaque ville possède des perspectives climatiques uniques, largement dictées par ses spécificités territoriales (taille, nombre de population, une configuration et une conception unique), donc les mesures d'atténuation d'ICU l'est tout autant aussi.

1.3. Conclusion:

Le présent chapitre s'est penché sur la compréhension des spécificités climatiques dans les zones urbaines, qui révèlent généralement des conditions atmosphériques différentes par rapport à leur environnement rural, dont le phénomène d'ICU est le plus

perceptible. L'influence de cette anomalie positive de température a été envisagée à l'échelle de canopée urbaine, là où les perturbations thermiques ont une influence immédiate sur l'homme.

Le comportement d'ICU est régi par une sévérité de facteurs de source naturelle et anthropique, dont les quatre paramètres de surface urbaine à savoir : la morphologie urbaine, la couverture urbaine, le tissu urbain et le métabolisme urbain, qui ont une influence prédominante dans l'altération du système climatique. L'approche théorique qui consiste en l'utilisation du bilan énergétique de surface s'avère pertinente pour traiter l'ensemble des mécanismes physiques qu'entretiennent ces paramètres avec le climat dans la ville, elle permet d'expliquer notamment la genèse de l'îlot de chaleur urbain.

La situation climatique au sein des villes, caractérisée par une surchauffe notable (chaleur accablante, pollution atmosphérique...etc.), agit directement sur les problèmes de la santé, de l'environnement...etc. De fait de ses conséquences, plusieurs leviers d'atténuation visant à diminuer la vulnérabilité des villes aux ICUs ont été modélisés par les chercheurs y compris : l'utilisation de la végétation, l'eau, la conception urbaine, l'ombre, les matériaux à forte réflectivité, etc. bien qu'il existe un grand nombre de dispositifs dans la littérature auxquels on peut se référer, mais ceux-ci restent contextuelles (dépendant de climat, formes urbains...etc.).

Deuxième chapitre :
Méthodes d'investigation de l'environnement
thermique urbain

2.1. Introduction :

L'adaptation des villes à l'augmentation des températures nécessite une compréhension approfondie du climat urbain changeant. *Le développement des connaissances sur la climatologie urbaine est l'une des composantes clés pour la maîtrise de ses effets négatifs*³⁷. Ce chapitre dresse le panorama sommaire des différentes démarches utilisées pour l'investigation de l'environnement thermique urbain. Nous aborderons alors, dans un premier temps, les modèles climatiques de simulation développés pour l'étude des processus responsables de la formation et le caractère de la météorologie urbaine, ou plus précisément les différents phénomènes physiques à son origine, conscient que ces modèles se diversifient selon le domaine et les échelles d'application. Les approches méthodologiques d'observation utilisées pour identifier la température urbaine seront ensuite examinées. Enfin, les systèmes de classification climatique seront aussi traités. L'accent sera mis sur l'approche méthodologique « Zone Climatique Locale (LCZ) » adoptée dans le cadre de ce mémoire.

2.2. Les approches de modélisation de l'environnement thermique urbain:

Pour améliorer la compréhension de climat urbain, et dans le contexte actuel ou les conséquences des perturbations climatiques des formes et usages de la ville - en particulier les îlots de chaleur urbains (ICUs) - doivent être maîtrisés, la communauté scientifique a développé plusieurs modèles de simulation des phénomènes physiques urbains qui sont à l'œuvre. Ces modèles peuvent être un outil d'évaluation et de test des différentes hypothèses d'aménagement, des différents scénarii architecturaux et urbanistiques, actuels et futurs, ce qui peuvent donc constituer « *un outil d'aide à la décision, pour la prise en compte de l'environnement dans les politiques d'aménagement urbain* »³⁸.

2.2.1. les modèles de simulation numérique :

Pour répondre au besoin d'analyse et l'évaluation des processus de formation et de changements spatio-temporelles de réchauffement local, *il est nécessaire de comprendre quel est qualitativement et quantitativement la contribution des différents facteurs au*

³⁷ «Modélisation Urbaine: De La Représentation Au Projet - Ministère de L'environnement, de L'énergie et de La Mer,» <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Modelisation-urbaine-de-la.html>.

³⁸ Ibid. p 16.

*climat urbain*³⁹. Les interactions entre ces facteurs sont complexes et ne peuvent pas se vérifier séparément, pour ce faire plusieurs modèles de simulation numériques utilisés par les climatologues, tentent selon (Leconte F., 2014), de « reproduire tout ou partie du fonctionnement de climat urbain », et permettent de décrire avec de plus en plus de précision les phénomènes physiques en jeux sur les différentes échelles de description spatiales et temporelle (mésos, local et micro échelle).

Les modèles de simulation numérique peuvent être classés en fonction des échelles d'appréhension des phénomènes physiques qui sont à l'œuvre.

2.2.1.1. Echelle micro et locale :

Aux échelles micro et locales, les modèles de simulation ont la vocation à représenter explicitement les qualités climatiques entre l'atmosphère et les différents éléments de surface, à l'échelle d'un bâtiment, d'une rue ou d'un quartier. Une des approches largement utilisée pour illustrer cette échelle est le modèle ENVI-met.

ENVI-met (Bruse M., Fler H., 1998) s'appuie sur une modélisation tridimensionnelle des volumes construits, intègre à la fois les calculs de la mécanique des fluides et les processus de la thermodynamique. Il peut contribuer à paramétrer « les interactions à petite échelle entre les bâtiments, la surface du sol et la végétation »⁴⁰. Le logiciel est capable de simuler le confort thermique extérieur (Ali-Toudert F., Mayer H., 2006), les flux radiatifs (ombres, réflexion, évaporation de la végétation, la dispersion des polluants, le taux d'humidité.etc) (Bruse M., and Fler H., 1998), les écoulements des vents (Rosheidat A., et al., 2008), et ainsi plusieurs autres paramètres nécessaires pour l'étude du microclimat et de confort.

Ce modèle se caractérise par une très haute résolution spatiale (varie entre 0.5m et 10m) et temporelle (10 secondes), d'où il est possible de prendre en compte des détails complexes en plus des interactions atmosphériques compliquées. Cependant, ENVI-Met se limite selon (Fernando H.J, 2012; Leconte F., 2014) à des domaines d'une étendue qui n'excède pas un kilomètre, donc il est impossible de modéliser la ville entière.

³⁹ M, Colombert. (2008). *Contribution À L'analyse de La Prise En Compte Du Climat Urbain Dans Les Différents Moyens D'intervention Sur La Ville*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.

⁴⁰ M, Bruse., H, Fler. (1988). *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model*. Environmental Modelling & Software 13, 373-384.

Le logiciel de simulation CFD (Computational Fluid Dynamic) concerne également ces échelles, développé initialement pour traiter les problématiques de l'influence de la forme urbaine sur les écoulements du vent, et simuler les dispersions des polluants dans l'air. Cette approche est utilisée aussi pour « *obtenir des informations plus précises sur la distribution des ICUs dans et au-dessus la canopée des bâtiments* »⁴¹. Les modèles du vent CFD sont limités par les exigences de calcul. *Prendre en considération des détails complexes, en plus des interactions atmosphériques compliquées est néanmoins informatiquement et théoriquement un problème difficile*⁴², et qui peut être couteux et non faisable dans une application à plus grande échelle (échelle de la ville).

2.2.1.2. Echelle locale et méso-climatique :

Les modèles numériques s'intéressant aux échelles locales et méso-climatiques s'appuient sur un couplage de ces outils à des modèles atmosphériques globaux. En reproduisant les principaux processus physiques intervenant à plus grande échelle, *ils sont capables de simuler, non seulement, l'intensité d'ICU mais aussi sa structure spatiale et ses dynamiques temporelles*⁴³. Ils permettent également la prévision du temps et des caractéristiques environnementales des zones urbaines. Masson V. (2006) classe les modèles qui décrivent les altérations créées par le paysage urbain en trois grandes catégories:

D'abord les modèles basés sur les observations de bilan énergétique de surface dont l'objectif, *est de reproduire les énergétiques de la canopée en utilisant des relations statistiques dérivées des observations*⁴⁴. D'autres modèles dit d'espaces végétalisées, adaptés et modifiés pour inclure les physiques de canopée urbaine. La méthode de prise en compte de ces espaces change d'un modèle à un autre. Plusieurs approches n'incluent pas la végétation dans les simulations du milieu urbain, et la considère comme étant séparée du reste de la ville, pour cela elle est modélisée indépendamment. Plusieurs d'autres modèles l'ont prise en considération afin de traiter les échanges végétation-bâtiment.

En fin, Les modèles de canopée urbaine, développés pour simuler les échanges surface-atmosphère au sein d'une rue canyon. *Ils visent à résoudre le bilan énergétique de*

⁴¹ P.A, Mirzaei., F, Haghighat. (2010). *Approaches to study urban heat island-abilities and limitations*. Building and Environment 45, 2192–2201.

⁴² Ibid. p 2195

⁴³ V, Masson. (2006). *Urban Surface Modeling and the Meso-Scale Impact of Cities*. Theoretical and Applied Climatology 84, no. 1–3 35–45.

⁴⁴ Ibid. p 36

*surface pour la canopée urbaine 3D réel*⁴⁵. Selon (Masson V., 2006) la construction de ses modèles se basant sur trois paramètres : les bâtiments sont en 3D, l'équation énergétique est calculée pour chacune des surfaces élémentaires (toit, mur, route), et les interactions entre la route et les murs sont explicitement traités. Ces modèles peuvent être séparés en deux catégories à savoir : les modèles à simple couche qui modélisent les échanges radiatifs qui se produisent uniquement au sommet des toits, et à plusieurs niveaux atmosphériques dans les modèles multi couches.

Town energy balance (TEB) est un des modèles simple couche de canopée urbaine, développé par Masson V. (2000), permet de paramétrer les flux turbulents en milieu urbain. Il utilise la rue canyon comme une unité de base pour représenter de manière simple le paysage urbain. Le modèle n'est applicable que pour les zones fortement urbanisées. Les surfaces végétales, hydriques, naturelles pourront exister en villes n'ont pas été prises en compte. Pour traiter les échanges entre ces surfaces et l'atmosphère, d'autres modèles tels ISBA (Noilhan J., and Mahfouf J., 1996) peut utiliser en parallèle avec TEB.

2.2.2. les modèles empiriques :

Développés pour étudier –principalement- la relation entre le milieu urbain et l'amplitude maximale d'ICU. Ces modèles se basant sur des approches statistiques, sont souvent des régressions linaires des grandeurs modélisés (écart maximal de température) en fonction des indicateurs utilisés (morphologie urbaine, occupation de sol, population.etc).

Les formulations de ces modèles sont diverses, certain modèles présentent des équations simples, comme le logarithme de population (P) proposé par (Oke T.R., 1973), qui permet de mettre en évidence l'influence de la taille de la ville et la croissance urbaine sur le développement de l'ICU. Ce rapport s'exprime ainsi :

$$\Delta T_{(u-r)_{\max}} = a. \text{Log} (P) + b \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Les paramètres de cette régression diffèrent en fonction des régions climatiques. (Oke T.R., 1973) suggèrent la relation suivante pour les villes Nord-Américaines

$$\Delta T_{(u-r)_{\max}} = 2,96 \text{ Log} (P) - 6,41 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

⁴⁵ Ibid. p 38

Et une autre équation pour les villes Européennes :

$$\Delta T_{(u-r)\max} = 2,01 \text{ Log (P)} - 4,06 \dots\dots\dots (2.3)$$

(Fernando H.J, 2012) a signalé que l'équation (1) est « *purement empirique et dimensionnellement incorrecte* ». Il a ajouté aussi que l'utilisation des indicateurs physiques (au lieu d'utiliser la population) comme celle de la morphologie urbaine (qui peu influencer le comportement du vent et du rayonnement) est préférable. (Oke T.R., 1981) a établi une corrélation entre l'amplitude maximale de différence de température et la géométrie du canyon exprimée en fonction de l'aspect ratio H/W, dont H et W représentent successivement la hauteur d'un bâtiment et la largeur d'une rue. :

$$\Delta T_{(u-r)\max} = 7,45 + 3,97. \text{ Ln (H/W)} \dots\dots\dots (2.4)$$

Et en fonction aussi du facteur vue du ciel (SVF) :

$$\Delta T_{(u-r)\max} = 15,27 - 13,88. \text{ SVF} \dots\dots\dots (2.5)$$

L'ampleur de l'ICU dépend d'un grand nombre de facteurs en interactions. Certains autres modèles statistiques présentent des formulations complexes qui prennent en compte de nombreux paramètres pour aboutir à un indicateur composé comme dans (Unger J., et al., 2011)

2.3. Les approches d'observation météorologique :

« *Les îlots de chaleur urbains peuvent être défini pour différente couche de l'atmosphère urbaine et pour diverse surface et même sub-surface* »⁴⁶. Il est important de faire la distinction entre les méthodes d'observations météorologique qui sont, selon (Gartland L.M., 2012), particulières à chaque type d'ICU. On aborde dans cette partie celles relatives à la couche de canopée urbaine.

2.3.1. observation des îlots de chaleur urbains de surface :

L'investigation des anomalies de température de la couche radiative qui s'étend au-dessus des éléments de surface, permet d'analyser le comportement des îlots de chaleur de surface. Elle s'effectue généralement via l'approche de télédétection thermique (thermal

⁴⁶ (Oke T.R., 1995; Voogt J.A., Oke T.R., 1997) IN J.A, Voogt., T.R, Oke. (2003). *Thermal remote sensing of urban climates*. Remote Sensing of Environment 86, 370–384.

remote sensing) ; liée à l'utilisation des satellites et des plateformes aéroportées. « *La télédétection regroupe à la fois les techniques qui permettent d'acquérir à distance les informations sur un élément de surface* »⁴⁷, à travers le captage et l'enregistrement de l'infra-rouge thermique de l'énergie radiante ascendante (réfléchis ou émis), en provenance de surface terrestre.

Les données de la télédétection peuvent être profitables pour « *répondre à des objectifs divers, allant de la représentation de l'espace urbaine à sa modélisation* »⁴⁸. Voogt J.A., et Oke T.R., (2003), dans leur revue, ont étudié les différents travaux portant sur la l'utilisation de la télédétection pour examiner le climat thermique urbain, depuis 1989. Ils ont fait le point sur trois applications majeures:

- Premièrement, *pour examiner le comportement d'ICU et sa relation avec les caractéristiques de surface*. Dans ce contexte, Des images satellitaires MODIS ont été utilisées par (Li H., Liu Q., 2008) pour étudier le lien entre l'indice de végétation (NDVI), l'indice de bâti (NDBI) et le comportement thermique de la surface urbaine (land surface temperature (LST)), dans la région métropolitaine Changsha-Zhuzhou-Xiangtan (Chine). (Kuşçu Ç., Şengezer B., 2011) ont également basé sur des images thermiques Landsat TM 5 pour l'investigation de l'effet de la géométrie sur la température de surface à Istanbul (Türkiye), en calculant les valeurs de deux coefficients : BAC (Basement Area Coefficient) et FAC (Floor Area Coefficient). Les images obtenues par télédétection sont aussi utilisées pour évaluer le rapport entre l'ICU et l'occupation de sol/couverture du sol (Chen X.-L et al., 2006), la végétation (Harris R., Coutts A., 2011), le NDVI (Kumar K.S., et al., 2012; Lo C.P., et al., 1997).
- Deuxièmement, *étudier la relation entre les ICUs de surface et les ICUs atmosphérique*. L'étude de (Mohan M., et al., 2012) concernant la ville de Delhi (Inde) se focalise sur l'évaluation des ICUs, par l'étude des variations spatiales de température pour plusieurs occupations de sol. Les données recueillis par le biais de mesures in-situ sont comparées avec celles obtenues par télédétection et des cartes des isothermes de la température de l'air et de la température de surface de la région, dans les deux périodes (nocturne et diurne), sont dérivées des observations de la campagne de mesure, et des images thermiques MODIS-Terra, respectivement. Les

⁴⁷ C, Weber. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Hermès. Paris. p39.

⁴⁸ Ibid. p, 7.

résultats ont révélés que les points chauds dans la ville sont comparables pendant la nuit, et moins satisfaisants pendant la journée.

- Troisièmement, pour étudier le bilan énergétique de surface urbaine, où *Les applications s'appuient sur un couplage des modèles climatiques de l'atmosphère urbaine avec les observations de la télédétection*⁴⁹.

De multiples revues de la littérature portant de la télédétection thermique, ont mis en évidence certaines limitations importantes qui devraient être considérées:

La température de surface est liée à l'énergie radiante ascendante détectée –à distance- par les capteurs thermiques. Si on prend en considération les différentes échelles spatiale et temporelle où les processus thermique se produisent, et comme l'ont déjà signalé plusieurs chercheurs (Arnfield A.J., 2003; Fernando H.J., 2012; Leconte F., 2014; Mirzaei P.A., and Haghigat F., 2010; Stone Jr B., Rodgers M.O., 2001; Voogt J.A., Oke T.R., 2003), un phénomène surfacique ne doit pas être similaire à un phénomène atmosphérique affecté par de nombreux facteurs de source naturel et anthropique.

Il faut noter aussi que l'approche de télédétection ne prend pas en considération les émissions radiatives des éléments verticaux –« *qui constitue la véritable surface active de la ville* »⁵⁰ - dans les images thermiques détectées. Ces images permettent d'acquérir des informations relatives aux propriétés thermiques des surfaces horizontales de la ville. Par conséquence une température de surface représentative qui nécessite selon (Oke T.R., 2004; Fernando H.J., 2012) « *averaging un adéquat sample of many surfaces, vertical as well as horizontal comprizing an urban area* » est compliquée à dériver.

D'autre limitations sont avancées dans (Weber C., 1995), parmi lesquelles, les coûts, la sophistication de traitement et la nécessité d'une qualification particulière.

2.3.2. observation des îlots de chaleur urbains atmosphériques :

L'acquisition des données météorologiques s'est –traditionnellement- effectuée via l'approche *in-situ*, qui consiste à utiliser des stations météorologiques fixes ou mobiles. Elle permet selon (Leconte F., 2014) « *une mesure directe, précise et instantanée des grandeurs physiques* ». L'approche *in-situ* a été principalement utilisée pour quantifier

⁴⁹ J.A, Voogt., T.R, Oke. (2003). *Thermal remote sensing of urban climates*. Remote Sensing of Environment 86, 370–384.

⁵⁰ (Roth M., 1989) **IN** J.A, Arnfield. (2003). *Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island*. International Journal of Climatology 23, 1–26.

les ICUs dans la couche limite de canopée urbaine. Elle est aussi essentielle pour « l'évaluation des modèles climatiques (statistiques/numérique) développées pour la prédiction des ICUs »⁵¹.

Stewart I.D. (2007) et Stewart I.D. (2011b) a avancé qu'il existe, principalement, trois approches méthodologiques pour l'interprétation des données de température issues de stations météorologiques fixes ou mobiles :

- la première approche consiste à examiner la différence de température entre le point le plus "chaud" et le point le plus "froid", au sein d'un réseau de stations fixes, ou le long d'un itinéraire de mesure mobile.
- La deuxième vise à comparer la température maximale entre deux points quelconques (généralement, une paire urbain-rural)
- La troisième approche étudie la différence de température entre les moyennes spatiales de plusieurs points urbains et ruraux, au sein d'un réseau de stations fixes, ou le long d'un itinéraire de mesure mobile.

Les effets cumulés induit par l'urbain, enregistrés au niveau des stations météorologiques, se réfèrent à l'état de l'environnement d'un échantillon spatial dont le rayon n'excède pas selon (Oke T.R., 2004) quelques centaines de mètres autour du point de mesure, appelé « Zone Source », « Footprint » ou encore « le cercle d'influence de la sonde ».

« La zone source thermique est la surface totale vue par un capteur »⁵². Ses propriétés thermiques apportées à la sonde (via turbulence) sont à l'origine de la température détectée. Idéalement sa dimension spatiale peut être estimée par un modèle "footprint" comme celui proposé dans (Schmid H.P, 2002), mais elle n'a guère été quantifiée scientifiquement puisque « sa taille, sa forme et son orientation évoluent au cours du temps »⁵³ (Figure 2.1), dépendant de plusieurs paramètres y compris : la hauteur de l'instrument, la densité des bâtiments, les conditions de la couche limite, a mentionné (Oke T.R., 2004).

⁵¹ H.J, Fernando. (2012). *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements*. Crc Press.

⁵² I.D, Stewart., T.R, Oke. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 1879–1900.

⁵³ Ibid. p 1890.

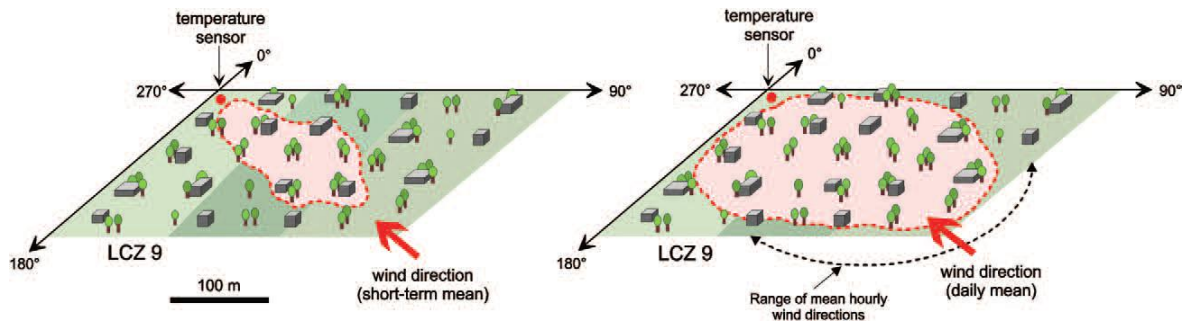


Figure 2.1 : Les roses du vent pour définir les zones d'influence (ellipses rouges) pour une température à la hauteur de référence du capteur (point rouge). (À gauche) la zone source à court terme ($< 1\text{ h}$), (à droite) la zone source moyenne du jour. *Source :* (Stewart I.D., Oke T.R., 2012)

2.3.2.1. Mesures mobiles de température :

Il s'agissait de réaliser des itinéraires de mesures au sein de diverses zones de l'agglomération à travers des capteurs embarqués à bord des véhicules instrumentés (vélo, voiture, tramway,...). Plusieurs travaux se basent sur cette approche expérimentale portent sur l'étude de l'évolution spatiale des anomalies de température de l'air dans la couche de canopée urbaine, tel qu'à Nancy (France) (Leconte F., et al., 2015), Köchi (Inde) (Tomas G., et al., 2014), Dublin (Irlande) (Alexander P.J., Mills G., 2014).

Terjung W.H., (1970)⁵⁴ a affirmé que les compagnes mobiles ont permis une meilleure compréhension des processus importants en espace urbain, en particulier le bilan énergétique. Leconte F. (2015) montre à travers son étude que « *cette approche est avantageuse pour fournir des données météorologiques de haute résolution* » à différents points de l'agglomération. Cependant cette méthode ne permet pas de mesurer les températures utilisées pour quantifier la magnitude d'ICU de façon synchrone. Stewart I.D. (2011b) a souligné l'importance d'effectuer des corrections de température-temps en ajustant temporellement les données recueillies.

2.3.2.2. Mesures fixes de température :

Une approche alternative à la méthode mobile consiste à réaliser des mesures ponctuelles, en utilisant deux ou plusieurs stations météorologiques, installées de façon permanente dans certains fragments de l'agglomération étudiée, afin d'en tirer des

⁵⁴ (Terjung W.H., 1970) IN M, Vysoudil. (2015). *urban space and climate: Introduction to the Special Issue*. Moravian Geographical Reports 23, 2–7.

données et des renseignements généraux sur les évolutions du comportement temporelle de température, ainsi que plusieurs autres phénomènes physiques.

Afin de garantir une mesure de la température homogène, Il est important de positionner les sondes thermiques de façon pertinente. Ceci est souvent difficile, vue de la complexité et l'hétérogénéité des milieux urbains. Oke T.R. (2004) dans sa publication intitulée « Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites », -adopté par l'organisation mondiale de la météorologie (OMM)- a proposé un protocole de climat urbain, qui fournit des recommandations spécifique pour la sélection des sites, l'installation des instruments de mesures et l'interprétation des données. Il a proposé d'effectuer les mesures dans un site homogène de point de vue des propriétés de surfaces (couverture urbaine, structure urbaine, matériaux et activités) et du climat local : « une zone source ».

D'après le guide, La hauteur requise pour obtenir des valeurs moyennes de température de l'air est 1,25 à 2m au-dessus du sol, dans la couche de canopée urbaine (éviter de placer les stations sur les toits). Il faut veiller à ce que les capteurs thermiques ne soient pas influencés par des courants d'air et des ombres portées. Il est aussi recommandé de les mettre en place au centre, dans un espace qui a un aspect ratio représentatif de la zone, et de les éloigner des murs des constructions, des arbres... susceptibles de fausser la mesure.

Cependant, L'approche de mesure fixe présente certaines limitations liées selon (Mirzaei P.A., Haghighat F., 2010) aux exigences financières et organisationnelles des mesures, qui rendent difficile l'obtention d'une meilleure résolution spatiale de distribution de l'ICU dans l'agglomération, à cause de l'utilisation d'un nombre limité de station météorologique.

2.4. Méthodes de Zonage climatique

"Un bon environnement de construction devrait avoir un bon climat"⁵⁵.

Il est crucial de développer les connaissances sur la microclimatologie urbaine et de les mobiliser pour un large éventail d'utilisateurs, particulièrement les architectes et les

⁵⁵ I, Eliasson. (2000). *The use of climate knowledge in urban planning*. Landscape and Urban Planning 48, 31-44.

urbanistes, dont le rôle est primordial dans la maîtrise des effets négatifs du climat, et l'identification des actions nécessaires d'adaptation. Pour avoir accès à ces connaissances, les aménageurs se trouvent face à deux problèmes majeurs :

- Le premier a été souligné dans la septième conférence internationale de climat urbain (ICCU) 2009, Yokohama (Japon) : le manque des données adéquates pour fournir les informations convenables de climat urbain. C'est une zone de faiblesse universelle liée selon Stewart I.D. (2011b), Stewart I.D. (2010) au "completeness of reporting", la tendance des investigateurs à attacher des descriptions inappropriées ou insuffisantes à leurs rapports.
- L'autre enjeu méthodologique que beaucoup de chercheurs soulèvent (Eliasson I., 2000; Fernando J.H., 2012; King V.J., Davis C., 2007; Stewart I.D., 2011a) est d'assurer le transfert des aspects théoriques de ces connaissances en outils applicables pour la planification urbaine. Ce transfert n'a pas réussi car selon Oke T.R. (2006), Oke T.R. (1986), Mills G. (2006) citées dans (Stewart I.D., Oke T.R., 2012), « *la climatologie urbaine a progressé lentement autour des questions d'échelle et de communication* »⁵⁶.

La littérature de climat urbain bénéficie d'un remarquable investissement intellectuel dans les études observationnelles d'ICU, la raison pour laquelle certains chercheurs ont remis en question la validité et l'authenticité des approches méthodologiques utilisées pour rapporter la magnitude d'ICU. La méthodologie classique de l'ICU reposant sur la dichotomie urbain-rural (différence de température entre l'urbain et le rural), a été l'objet de dissection par plusieurs chercheurs :

Lowry W.P. (1977), dans une évaluation de multiples approches d'observations communes utilisées précédemment par les climatologues, a déclaré qu'il existe des doutes dans les estimations déjà présentées dans la littérature des effets d'urbanisation sur le climat. Il a décrit quatre méthodes observationnelles et a discuté leurs restrictions correspondantes. Lowry a initié le mouvement vers une redéfinition de l'intensité d'ICU en proposant une interprétation différente de $\Delta T (u-r)$ comme une différence de température entre l'urbain et le préurbain (un terrain adjacent à la ville mais toujours intact⁵⁷).

⁵⁶ I.D, Stewart., T.R, Oke. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 1879–1900.

⁵⁷ I.D, Stewart. (2011a). Redefining the Urban Heat Island. PhD thesis, University of British Columbia.

Arnfield A.J. (2003) s'est intéressé au progrès en climatologie urbaine depuis le travail de Lowry W.P. (1977). Son revue aborde à la fois, les études concernant les processus climatiques urbains (les turbulences, les échanges d'énergie et d'eau), et explore ainsi la littérature dans le domaine de température urbaine. Dans ce contexte, Arnfield a déclaré que les méthodes utilisées pour décrire les ICUs dans ces deux dernières décennies ne diffèrent pas significativement de celles utilisées précédemment, et que toutes possèdent les mêmes restrictions mentionnées par Lowry W.P. (1977) dans l'identification ambiguë des effets urbains.

Dans une analyse critique (Stewart I.D., 2007; Stewart I.D., Oke T.R., 2006) avancé des arguments d'ordre scientifique et urbanistique afin de mettre en cause l'utilisation de $\Delta T(u-r)$ comme une mesure de confiance de la magnitude d'ICU. Les deux chercheurs ont critiqué l'absence d'une *définition objective* et unique de la dichotomie urbain-rural. L'ambiguïté de ces concepts donne une grande liberté aux investigateurs dans la manipulation et l'interprétation de leurs sites de mesure, ce qui crée des confusions dans la représentation des paysages, dans la littérature d'ICU.

Le terme « urbain » -en fonction d'étude- peut être utilisé pour définir une rue canyon, un parking... tandis que le site rural peut être un forêt, un champ... le plus occupant, selon (Leconte F., 2014) des sites comme l'aéroport et les cours des écoles qui sont considérés comme "urbain" dans des études et "rural" dans d'autres études. Ces concepts sont utilisés par les chercheurs sans plus de justification en s'appuyant sur l'hypothèse erronée que urbain et rural sont universellement compris.

Ces descripteurs –largement simplifiés- qui pourraient décrire les paramètres régionaux d'une investigation, n'ont pas une *base opérationnelle*, ce qui empêche le transfert des résultats entre les régions, car elles sont rarement justifiées par les propriétés physiques de surface qui réellement affecte le climat local d'une ville.

Stewart I.D. (2007) a ajouté aussi que la classification dichotomique urbain-rural s'avère moins adaptable aux villes d'aujourd'hui du caractère dispersé et décentralisé, surtout en Asie où la distinction entre l'urbain et le rural est de plus en plus ambigu.

Une enquête récente mondiale menée par Stewart I.D. (2011b) a pour objectif d'examiner la qualité méthodologique et la fiabilité des études observationnelles d'ICU, de la littérature moderne durant la période 1950-2007. Neuf critères de conception

expérimentale et de communication sont utilisés pour évaluer un échantillon de 190 études. Stewart a conclu que la moitié de toutes les magnitudes d'ICU rapportées dans la littérature sont jugées scientifiquement indéfendables. Les statistiques ont montré deux zones de faiblesses universelles :

- ¾ des études n'ont pas réussi à quantifier –adéquatement- l'intensité d'ICU, car les enquêteurs ne parviennent pas à rattacher les métadonnées quantitatives de base des sites urbain-rural à leurs rapports
- ½ des études échouent à effectuer un contrôle expérimental suffisant des effets 'non urbain' (relief, temps) sur l'ampleur de l'ICU.

Les études présentées plus haut ont exposé des lacunes importantes dans les connaissances existantes d'ICU, attribuées –principalement- selon (Stewart I.D. 2011b) aux *mauvaises pratiques scientifiques*. Luck Howard a indiqué, avant deux siècles, qu'un « *langage commun entre les météorologues est nécessaire pour un progrès scientifique rapide* »⁵⁸. La redéfinition de la magnitude d'ICU, en adoptant une approche méthodologique structurée et unifiée, est maintenant cruciale, afin d'assurer la cohérence et l'exactitude des rapports de climat urbain ainsi que le transfert des résultats inter-villes et inter-disciplines.

Pour répondre à ces problématiques, les scientifiques ont développé la classification du paysage, qui vise à mettre en évidence l'influence de l'environnement urbain sur le climat local. Dans la section suivante, nous allons présenter succinctement certains systèmes de classification existant dans la littérature de climat urbain, chacun d'eux s'appuie sur ses propres indicateurs de classements et possède son propre objectif. Le choix du système de classification présenté dans le chapitre méthodologique suivant, s'est appuyé sur une comparaison entre ces différentes approches. Pour le sélectionner, plusieurs critères ont été utilisés en relation avec leur capacité à quantifier les indicateurs physiques à l'origine de la formation du climat urbain.

⁵⁸ I.D, Stewart., T.R, Oke. (2010). *1.1 thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites*. In Ninth Symp. on Urban Environment, Keystone, CO, Amer. Meteor. Soc.

2.4.1. Quelques classifications des paysages urbain-rural existant dans la littérature :

Auer Jr, A.H. (1978) a développé le premier système de classification des paysages, adapté à la recherche sur le climat urbain, où il incorpore des critères d'occupation de sol et de couverture végétale pour caractériser les anomalies météorologiques de la ville de Saint Louis, Missouri. Douze classes significatives de point de vue météorologique ont été identifiées comme on peut le voir dans la figure 2.2.

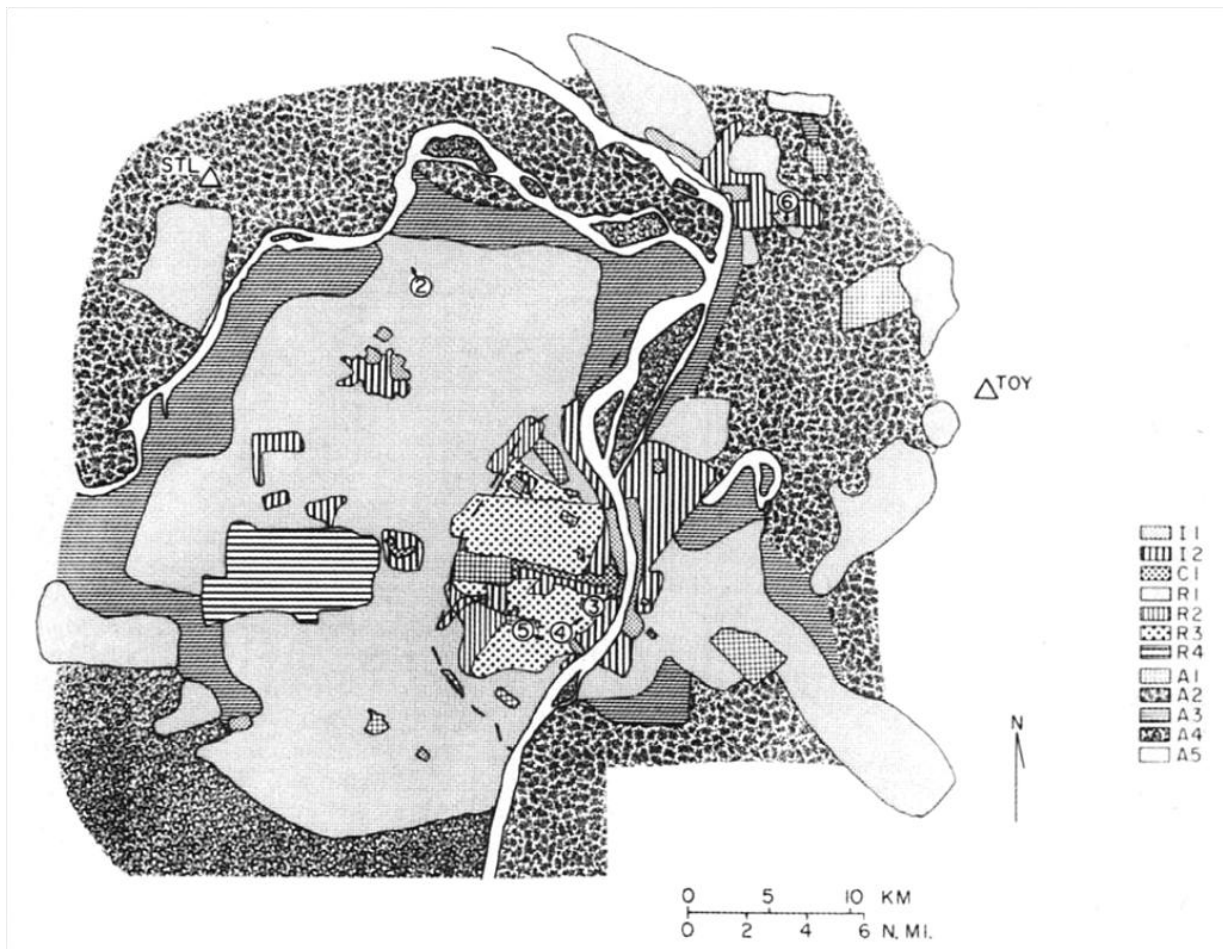


Figure 2.2 : la classification d'Auer de la région métropolitaine de st- louis, Missouri (I1= industrie lourde, I2= industrie légère-moderée, CI= zone commerciale, R1= résidences collectives, R2/R3= résidences compactes, R4= domaine résidentiel, A1, A2, A3, A4 = zones rurales, A5= surface d'eau). *Source : (Auer Jr, A.H., 1978)*

Dans la même ligne, Ellefsen R. (1991) a proposé « Urban terrain Zone (UTZ)» dont l'objectif est de fournir les métadonnées essentielles sur les aspects morphologiques et physiques de l'environnement urbain. Dix villes américaines ont été caractérisées sur la base des indicateurs de morphologie urbaine et des matériaux. Les résultats permettent de distinguer dix-sept catégories de formes urbaines (tableau 2.1), présentées sous forme de fiches illustrant les différentes caractéristiques des zones (UTZ), Figure (2.3).

Tableau 2.1: Les différentes Caractéristiques des classes ‘ ‘ urbain terrain zone’’. *Source: (Ellefsen R., 1990/1991)*

‘UTZ’ à bâtiments attachés	‘UTZ’ à bâtiments détachés (fermés)
<p>A1 - Bâtiments attachés; bureaux commerciaux, etc., Zone centrale; hauteur faible à élevée; construction massive</p> <p>A2 - Bâtiments attachés; appartements / hôtels; près de la zone centrale; >4 étages</p> <p>A3 - Bâtiments attachés; les appartements et les maisons (muraille contiguë); adjacent à la zone centrale; < 4 étages.</p> <p>A4 - Bâtiments attachés; industriel / stockage; près de la zone centrale, construction massive;</p> <p>A5 - Bâtiments attachés; développement de rubans commerciaux; sur certaines artères vers l'extérieur de la zone centrale et ailleurs; à moyenne hausse</p>	<p>Dc1- Bâtiments détachés (fermés); bureau commercial; gratte-ciel;</p> <p>Dc2- Bâtiments détachés (fermés); appartements résidentiels / maisons en rangée; emplacements largement distribués;</p> <p>Dc3 - Bâtiments détachés (fermés); maisons résidentielles; emplacements largement distribués</p> <p>Dc4 - Bâtiments détachés (fermés); industriel / stockage; construction linéaire; chemin de fer; faible élévation</p> <p>Dc5 - Bâtiments détachés (fermés); rubans commerciaux plus anciens; peu élevé (moins de 5 étages)</p> <p>DC6 - Bâtiments détachés (fermés); commercial (ville extérieure); à la périphérie de la zone métropolitaine; gratte-ciel;</p>

‘UTZ’ à bâtiments détaché (ouverts)	
<p>Do1- Bâtiments détachés (ouverts); Centres commerciaux; au-delà du centre; peu élevé; construction massive</p>	<p>Do4 Bâtiments détachés (ouverts); industriel / stockage; emplacements largement distribués; modèle ordonné (bâtiments assez régulièrement espacés, séparés par des parcs de stationnement,</p>

<p>Do2 - Bâtiments détachés (ouverts); appartements résidentiels et maisons en rangée; hauteur de faible à moyenne; emplacements largement distribués;</p> <p>Do3 - Bâtiments détachés (ouverts); Maisons; faible élévation; emplacements largement distribués</p>	<p>aires de stockage); bas.</p> <p>Do5 - Bâtiments détachés (ouverts); développement de rubans commerciaux modernes; le long des nouvelles artères principales; modèle ouvert (bâtiments séparés par des parcs de stationnement et des zones de stockage ouvertes); bas (moins de 5 étages)</p> <p>Do6 Bâtiments détachés (ouverts); administratif / culturel (écoles, complexes hospitaliers); hauteur faible à moyenne; emplacements largement distribués; modèle de construction ordonné;</p>
--	--

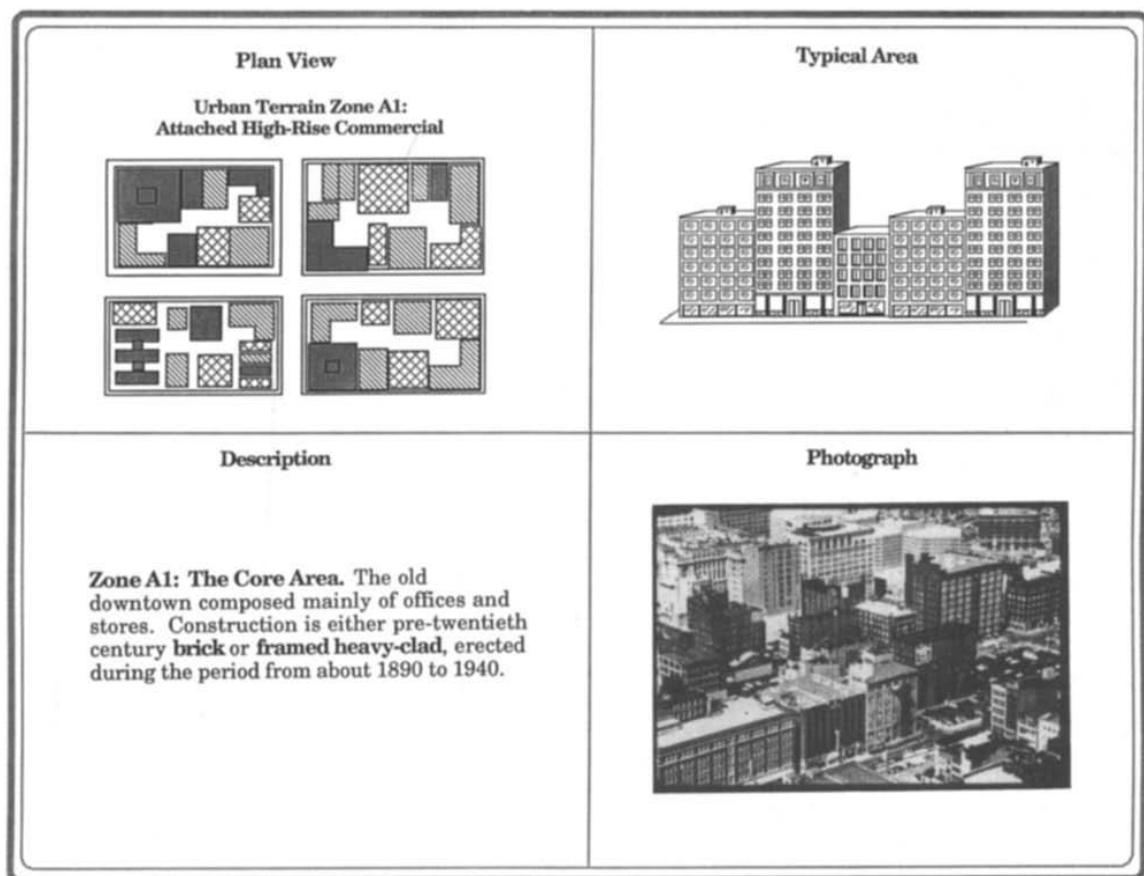


Figure 2.3: la classification ‘‘urban terrain zone’’ (UTZ). *Source: (Ellefsen R., 1990/1991)*

Le développement d’un outil fiable pour l’estimation de la rugosité aérodynamique effective a été l’objet d’étude de (Davenport A.G., et al., 2000). Ils se sont intéressés à la rugosité urbaine comme un facteur de classification des paysages urbain-rural. Le tableau 2.2 présente les huit classes produites qui se diffèrent selon la forme de surface.

Tableau 2.2: classification de la rugosité effective de terrain. *Source adaptation du (Davenport A.G., et al., 2000).*

Classe de Davenport	Longueur de rugosité z_0 (m)	Description du paysage
1 : mer	0,0002	Mer ou lac dégagé, estran, plaine couverte de neige, désert sans relief, goudron et béton.
2 : Lisse	0,005	Surface terrestre sans relief, sans obstacles notables et pratiquement sans végétation, par exemple une plage ou un marais.
3: ouvert	0,03	Paysage présentant une végétation basse et des obstacles isolés, séparés entre eux d'environ 50 fois la hauteur des obstacles (herbe, aéroport).
4 : à peu près rugueux	0,10	Zone naturelle ou cultivée comprenant des plantes ou des cultures de faible hauteur. Zone relativement dégagée présentant des obstacles occasionnels (des haies de faible hauteur, des bâtiments bas ou des arbres) séparés d'environ 20 fois la hauteur des obstacles.
5: rugueux	0,25	Zone naturelle ou cultivée comprenant des cultures hautes ou de hauteurs variées, et des obstacles épars, séparés de 8 à 15 fois la hauteur des obstacles selon la porosité (bâtiments, des brise-vent végétaux)
6 : très rugueux	0,5	Paysage cultivé de façon intensive avec de nombreux groupes d'obstacles de taille importante séparés par des espaces dégagés d'environ 8 fois la hauteur des obstacles. Zone partiellement couverte par des bâtiments bas espacés d'environ 3 à 7 fois la hauteur des bâtiments, et sans grands arbres.
7 : frôlement (skimming)	1,0	Paysage couvert de façon régulière par de grands obstacles de taille similaire, avec des espaces dégagés du même ordre de grandeur que la hauteur des obstacles (par exemple une forêt régulière à maturité). Zone densément bâtie sans variation importante du point de vue de la hauteur de bâtiments.
8: chaotique	≥ 2	Centre ville alternant bâtiments hauts et bâtiments bas. Grandes forêts comprenant des arbres de tailles variées et des clairières.

En incorporant les éléments de classifications d’Auer Jr, A.H. (1978), Ellefsen R. (1991), Davenport A.G. (2000), Oke T.R. (2004) a avancé un schéma de Zonage climatique, vise à standardiser l’implantation des instruments météorologiques dans les zones urbaines, à travers un répertoire de sept catégories homogènes « urban climate zone (UCZ) ». Chaque catégorie est déterminée par une classe représentative de rugosité, d’aspect ratio (morphologie urbaine), et d’un pourcentage du sol imperméable (couverture du sol), Figure 2.4, donc distingué par son potentiel à modifier les facteurs climatiques d’une ville à l’échelle locale. Le système de Tim Oke est plus universel, il est inclut dans les directives de l’organisation mondiale de la météorologie (OMM).

<i>Urban Climate Zone, UCZ¹</i>	<i>Image</i>	<i>Roughness class²</i>	<i>Aspect ratio³</i>	<i>% Built (impermeable)⁴</i>
1. <i>Intensely developed urban with detached close-set high-rise buildings with cladding, e.g. downtown towers</i>		8	> 2	> 90
2. <i>Intensely developed high density urban with 2 – 5 storey, attached or very close-set buildings often of brick or stone, e.g. old city core</i>		7	1.0 – 2.5	> 85
3. <i>Highly developed, medium density urban with row or detached but close-set houses, stores & apartments e.g. urban housing</i>		7	0.5 – 1.5	70 - 85
4. <i>Highly developed, low or medium density urban with large low buildings & paved parking, e.g. shopping mall, warehouses</i>		5	0.05 – 0.2	70 - 95
5. <i>Medium development, low density suburban with 1 or 2 storey houses, e.g. suburban housing</i>		6	0.2 – 0.6, up to >1 with trees	35 - 65
6. <i>Mixed use with large buildings in open landscape, e.g. institutions such as hospital, university, airport</i>		5	0.1 – 0.5, depends on trees	< 40
7. <i>Semi-rural development, scattered houses in natural or agricultural area, e.g. farms, estates</i>		4	> 0.05, depends on trees	< 10

Key to image symbols: buildings; vegetation; impervious ground; pervious ground

Figure 2.4 : le système de classification ‘urban climate zone’ (UCZ). Source: (Bouyer J., 2009)

Poursuivant la démarche vers la standardisation du langage concernant les observations de température urbaine, Stewart I.D. et Oke T.R. (2012) ont développé le système de classification « local climate zone (LCZ) », à la suite des améliorations des travaux d'Oke T.R. (2004), Stewart I.D. (2009), ainsi qu'une enquête internationale (Stewart I.D., 2011b). Dix-sept classes sont issues de ce référentiel (tableau 2.3), différenciées par les propriétés de surface (morphologie urbaine, couverture urbaine, tissu urbain et métabolisme urbain) qui affectent directement la température de l'air dans la couche de canopée urbaine.

Tableau 2.3: Categories and Characteristics of LCZ. Source: (Stewart I.D., Oke T.R., 2012)

Types de construction	Types de couverture du sol	Variable de la couverture du sol
LCZ 1 – Compact high rise	LCZ A – Dense trees	b – bare trees
LCZ 2 – Compact mid rise	LCZ B – Scattered trees	s – snow cover
LCZ 3 – Compact low-rise	LCZ C – Bush, scrub	d – dry ground
LCZ 4 – Open high-rise	LCZ D – Low plants	w – wet ground
LCZ 5 – Open mid-rise	LCZ E – Bare rock / paved	
LCZ 6 – Open low-rise	LCZ F – Bare Soil / sand	
LCZ 7 – Lightweight low-rise	LCZ G - Water	
LCZ 8 – Large low-rise		
LCZ 9 – Sparsely built		
LCZ 10 – Heavy industry		

Pour la validité et l'acceptance d'un système de classification, il doit répondre à plusieurs critères majeurs, nous avons étudié les approches citées plus haut afin de retenir celle qui est compatible avec notre objectif de recherche et qui satisfasse le mieux ces critères. Grigg D. (1961) a souligné qu'un schéma de classification doit :

- Avoir une *Nomenclature* simple et logique par laquelle les objets/ zones peuvent être nommés et décrits.
- Etre *Transférable*, en associant les objets/ zones dans le monde réel avec un système organisé de classes générales
- Etre *général*, en simplifiant les objets/ zones d'étude puis promouvoir des "statuts" théoriques sur leurs propriétés et leurs relations.

Des critères additionnels sont ajoutés par Stewart I.D. (2009), liée à la classification des sites d'investigation des ICU :

- *L'inclusivité* de toutes les régions, indépendamment des cultures.
- *L'objectivité* : les propriétés des classes doivent être mesurables et quantifiable.
- *L'accessibilité* : gérable surtout pour les utilisateurs disposants des ressources limités pour la réalisation d'observation sophistiquées.
- *La standardisation* : cohérent dans sa description (nom, échelle, symboles, définition et illustrations standard), afin d'avoir une acceptation et reconnaissance universelle.

Tableau 2.4 : schémas de classification et critères de validation des différentes approches. *Source* : (Auteur, 2017).

Système de Classification	L'objectif	Echelle	Critères						
			Nomenclature	Transférable	Général	Inclusive	Objective	Accessible	Standard
<i>Auer (Land use land cover) 1977</i>	Identifier l'occupation du sol 'significatif d'un point de vue météorologique dans les zones urbaine.	local							
<i>Ellefsen, R (UTZ), 1990/1991</i>	fournir des données essentielles sur les aspects morphologiques ou physiques, de l'environnement urbain.	Local							
<i>Davenport 2000</i>	Estimation de la rugosité effective aérodynamique	local							
<i>T. R. Oke (UCZ) 2006</i>	Améliorer l'implantation des instruments météorologiques dans les villes.	Local							
<i>Stewart/Oke : (LCZ) 2012</i>	fournir un protocole objectif pour mesurer la magnitude d'ICU.	Local							

Légende : N'intègre pas/Intègre partiellement le critère Intègre le critère

Au regard de ces critères, nous avons effectué une comparaison entre les différents systèmes de classification présentés précédemment (tableau 2.4).

*Un système sans représentation proportionnelle de la ville et de la campagne n'est pas bien adapté à la classification des sites*⁵⁹. Le système Urban climate zone (UCZ), malgré son universalité, n'a pas été retenu, en grande partie parce qu'il est destiné pour la caractérisation des sites urbains, il est moins efficace pour ce qui est des paysages ruraux. En ce qui concerne l'approche d'Ellefsen et d'Auer, ils sont adaptables beaucoup plus aux formes et fonctions des villes industrialisées, leur application dans les régions moins développées est incertaines.

En outre, les schémas de Davenport, d'Ellefsen et d'Auer permettent de fournir des descriptions moins informatives du paysage, car ils n'ont pas incorporé/ incorporé partiellement dans leurs critères de classement les propriétés de surface qui affecte le climat thermique (couverture urbaine, morphologie urbaine, tissu urbain et morphologie urbaine).

Il s'avère que le modèle "Zone Climatique Locale (LCZ) est celui qui répond le mieux sur les différents critères d'évaluation, présentés plus haut. Sa pertinence climatique (en incorporant une gamme complète de descripteurs physique), sa représentation proportionnelles des paysages urbains et ruraux, sa nomenclature simple et logique (des noms, des classes et des définitions standards), son ampleur (fonctionne dans les diverses régions culturelles et économiques), ont permis de fournir un cadre idéal pour la construction d'un protocole objectif de mesure d'ICU.

2.4.2. Le système de classification "Zone Climatique Locale" :

Quatre paramètres de surface liés à la couverture du sol et à la morphologie urbaine sont utilisés par Stewart I.D. et Oke T.R. (2012), dans une division théorique des paysages : urbain, agricole, mixte et naturel, afin de générer des classes à l'échelle locale nommées Zone climatique locale, Figure 2.5.

Les deux chercheurs ont abouti à une hiérarchie de dix-sept zones climatiques, dont dix LCZ de type bâti (building) et sept de type non bâti (land cover). Ces entités spatiales sont différenciées par leur capacité à influencer la température de l'air de référence dans la

⁵⁹ I.D, Stewart. (2011a). Redefining the Urban Heat Island. PhD thesis, University of British Columbia.

couche de canopée urbaine (1,5-2m au dessus du sol). La validation des catégories LCZ est effectuée par Stewart I.D. et Oke T.R. (2010), à travers des études observationnelles des contrastes thermiques entre les classes, en trois villes représentantes de l'Asie (Nagano-Japon), l'Amérique du nord (Vancouver-Canada) et l'Europe (Uppsala-Suède). Le tableau 2.5 montre la description des dix-sept zones standard existantes.

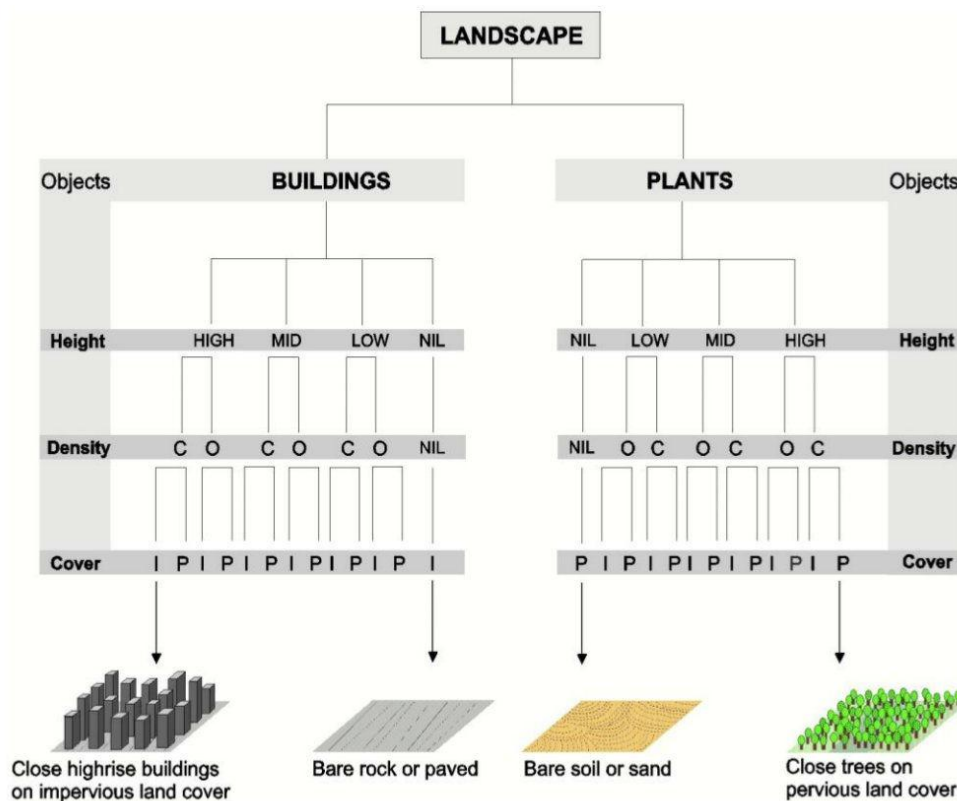


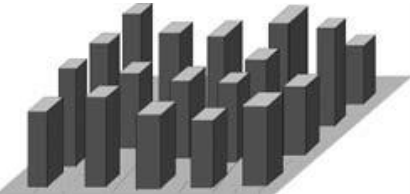
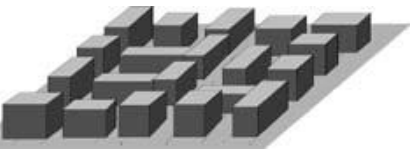
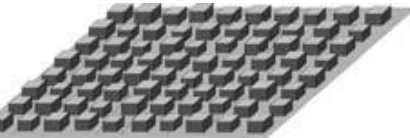

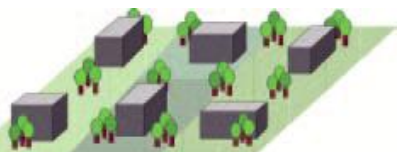

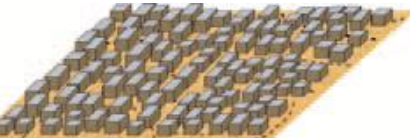
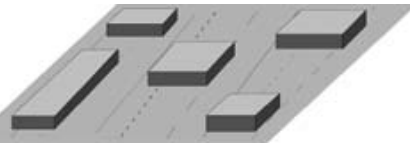
Figure 2.5 : division logique du paysage en classes. *Source: (Stewart I.D., 2011a)*


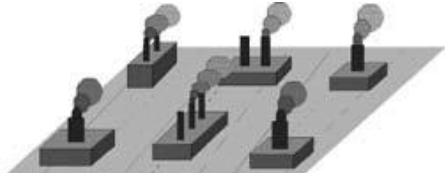
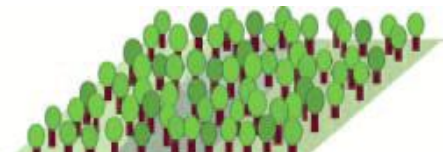
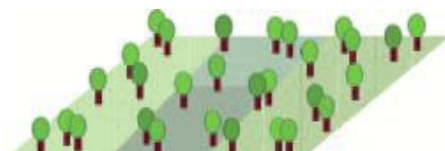
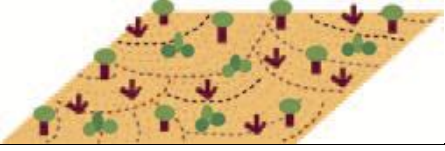


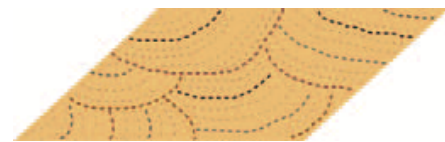

Stewart I.D. et Oke T.R (2009) définissent les “zones climatiques locales” comme :

«A logical division of the landscape “universe” into a hierarchy of sub-classes, each differentiated on principles of surface cover (built fraction, soil moisture, albedo), surface structure (sky view factor, roughness height), and cultural activity (anthropogenic heat flux)».

Une zone climatique locale présente une région supérieure ou égale à 400 mètre de diamètre, qui exprime une homogénéité en termes de sa réaction climatique, due principalement aux propriétés de surface décrivant la couverture du sol, la morphologie urbaine, les matériaux urbains et le métabolisme urbain, qui caractérisent chaque zone (LCZ).

Tableau 2.5: les dix-sept zones climatiques locales. *Source: adaptation du (Stewart I.D., Oke T.R., 2012)*

ID (Stewart et Oke, 2012)	Définition
<p>1. Compact high-rise</p> 	<p>Zone conformée par Bâtiments de grande hauteur (>10 étages) et de forte densité. Très peu ou sans arbre. Couvertures de sol plutôt pavée. Matériaux de construction: le béton, l'acier, la pierre et le verre)</p>
<p>2. Compact midrise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments de hauteur moyenne (3-9 étage) et de forte densité. Très peu ou sans arbre. Couverture de sol plutôt pavée. Matériaux de construction : le béton, la brique, la pierre et la tuile.</p>
<p>3. Compact low-rise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments de basse hauteur (1-3 étages) et à haute densité. Très peu au sans arbres. Couverture de sol plutôt pavé. Matériaux de construction : le béton, la brique, la pierre et la tuile.</p>
<p>4. Open high-rise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments de dix (10) niveaux et plus. Une abondante surface de sol perméable. Matériaux de construction: le béton, l'acier, la pierre et le verre.</p>
<p>5. Open midrise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments entre trois et neuf niveaux. Avec abondante surface de sol perméable. matériaux de construction: le béton, l'acier, la pierre et le verre.</p>
<p>6. Open low-rise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments de basse hauteur (1-3 étages). Une abondante surface de sol perméable. Matériaux de construction comme le bois, la brique, le béton, la pierre et la tuile.</p>
<p>Lightweight low-rise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments détachés entre un et trois niveaux. très peu ou sans arbre. Couverture de sol plutôt pavée. matériaux de construction légers comme le bois, le chaume et le métal ondulé.</p>
<p>8. Large low-rise</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments entre un et trois niveaux. très peu ou sans arbre. Couverture de sol plutôt pavée. Caractérisée principalement par des matériaux de construction comme le béton, l'acier, le métal et la pierre.</p>

<p>9. Sparsely built</p> 	<p>Zone placée dans un cadre naturel, conformée par des bâtiments étalés, de petite ou moyenne taille. une abondante surface de sol perméable.</p>
<p>10. Heavy industry</p> 	<p>Zone conformée par des bâtiments et structures de basse et moyenne hauteur. Très peu ou sans arbre. Couverture de sol plutôt pavée. Matériaux de construction: le métal, l'acier et le béton.</p>
<p>A. Dense trees</p> 	<p>Paysage de forêt compacte avec des arbres à feuilles caduques et/ou persistantes. Surface de sol perméable (des plants bas). . Cette zone fonctionne comme des aires de culture d'arbres, des parcs naturels ou urbains.</p>
<p>B. Scattered trees</p> 	<p>Paysage de forêt légère avec des arbres dispersés, à feuilles caduques et/ou persistantes. Surface de sol perméable (végétation basse). Cette zone fonctionne comme des aires de culture d'arbres, des parcs naturels ou urbains.</p>
<p>C. Bush, scrub</p> 	<p>Zone conformée par des arbustes, arbrisseaux La surface de sol est perméable (sable ou terre nue).</p>
<p>D. Low plants</p> 	<p>Paysage d'herbacés avec très peu d'arbres ou sans arbre. Cette zone fonctionne comme une aire de culture, un parc naturel ou une prairie.</p>
<p>E. Bare rock or paved</p> 	<p>Paysage de roches nues ou de surfaces pavées. Peu d'arbres ou sans arbre. Cette zone fonctionne comme un désert naturel ou une zone de transportation urbaine.</p>
<p>F. Bare soil or sand</p> 	<p>Paysage de terres nues ou de sable. Très peu ou sans arbre. Cette zone fonctionne comme un désert de sable naturel ou une zone de culture.</p>
<p>G. Water</p> 	<p>Des grandes surfaces d'eau telles que la mer et les lacs, ou des surfaces de moindre taille comme les fleuves, les réservoirs et les étangs.</p>

Variable de couverture du sol :	
b. bare trees	<i>Arbres dénués</i> : augmentation du SVF, une diminution de l'albédo.
s. snow cover	<i>Neige</i> , couverture du sol > 10 cm de profondeur. L'effusivité du sol diminue. L'albédo est haut.
d. dry ground	<i>Terrain sec, voire aride</i> , une basse effusivité, un grand rapport de Bowen. Diminution de l'albédo.
w. wet ground	<i>Terrain humide</i> , sols saturés en eau. Haute effusivité, petit rapport de Bowen et albédo réduit.

Dix indicateurs urbains mesurables –répertoriés dans la littérature comme les principaux modificateurs du climat local sont utilisés par Stewart et Oke pour quantifier la réponse climatique de chaque catégorie, tableau 2.6.

Tableau 2.6: Zone properties of LCZ system. *Source: (Stewart I.D., Oke T.R., 2012)*

Type de propriétés	
Géométrique et couverture du sol	Thermique, radiative, métabolique
<ul style="list-style-type: none"> - Facteur vue du ciel - Rapport d'aspect - Pourcentage de Surface bâti - Pourcentage de Surface imperméable - Pourcentage de Surface perméable - hauteur des objets - classes de rugosité 	<ul style="list-style-type: none"> - effusivité de surface - Albedo de surface - Chaleur anthropique

L'ensemble des classes théoriques de zone climatique locale sont présentées dans un format clair et normalisé « Datasheet », figure 2.6, en s'appuyant sur des descriptions d'ordre *quantitative* qui présentent les valeurs suggérés des dix indicateurs physiques caractéristiques de chaque catégorie dans le tableau 2.6, enrichie avec des données d'ordre *qualitative* en définissant brièvement la zone considérée (nom, code, localisation, fonction...), accompagné avec des illustrations sous forme de photographie prise au niveau bas et élevé de la couche de canopée urbaine. L'ensemble des datasheets qui décrivent les zones se trouvent dans l'annexe (II-1).

L'approche "Zone Climatique Locale" apporte une assise à la caractérisation (différenciation) des sites de mesure par l'adoption des descripteurs physiques mesurables –déterminants dans la genèse et l'intensité d'ICU- au lieu d'utiliser des descripteurs simplistes comme urbain et rural. Selon (Leconte F., 2014), « *Chaque LCZ possède un*

comportement climatique unique », d'où est issue une définition normalisée de la magnitude d'ICU qui s'exprime plus objectivement en comparant les réactions thermiques inter-zones (différence de température interzone) :

$$IUHI = \Delta T_{LCZa - LCZb}$$

LCZ KEY	ZONE NAME	#
ZONE DEFINITION		
<p>Form: Description of building geometry, construction materials, land cover, tree density, and human activity. Function: Land uses most likely associated with this zone. Location: Expected location of the zone (core, periphery; city, countryside). Correspondence: Comparable zones in the urban classification systems of Oke (2004) and Ellefsen (1990/91).</p>		
ZONE ILLUSTRATION		
<p>Objects</p> <ul style="list-style-type: none">  Buildings heavy materials  Dwellings lightweight materials  Trees/plants <p>Land cover</p> <ul style="list-style-type: none">  Low plants  Rock or paved  Soil or sand  Water 	<p>High-angle photographs (© I.D. Stewart, Can Stock Photo Inc.)</p>  <p>Low-level photographs (© I.D. Stewart, Can Stock Photo Inc.)</p> 	
ZONE PROPERTIES		
<p>Sky view factor ψ_{sky} 0 – 1</p> <p>Aspect ratio H/W 0 – 3⁺</p> <p>Mean building/tree height z_H 0 – 50⁺ m</p> <p>Terrain roughness class 1 – 8</p> <p>Building surface fraction λ_b 0 – 100 %</p> <p>Impervious surface fraction λ_i 0 – 100 %</p> <p>Pervious surface fraction λ_v 0 – 100 %</p> <p>Surface admittance μ 500 – 2,500⁺ J m⁻² s^{-1/2} K⁻¹</p> <p>Albedo α 0.02 – 0.5</p> <p>Anthropogenic heat flux Q_F 0 – 400⁺ W m⁻²</p>	<p>Fraction of sky hemisphere visible from ground level. Varies with height and spacing of buildings and trees. Affects surface radiational heating/cooling.</p> <p>Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZs 1–7), building spacing (LCZs 8–10), and tree spacing (LCZs A–G). Affects surface airflow and radiational heating/cooling.</p> <p>Geometric average of building heights (LCZs 1–10) and tree/plant heights (LCZs A–F). Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p> <p>Davenport <i>et al.</i> (2000) classification of effective terrain roughness (z_0) for city and country landscapes. Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground. See Table 5 for class descriptions.</p> <p>Proportion of ground surface with building cover. Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.</p> <p>Proportion of ground surface with impervious cover (paved or rock). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.</p> <p>Proportion of ground surface with pervious cover (bare soil, vegetation, water). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.</p> <p>Ability of surface to accept or release heat at local scale. Affects surface heat storage and heating/cooling rates. Varies with soil wetness and material density. In dense tree canopies (LCZ A), the “surface” is undefined and admittance is unknown.</p> <p>Surface reflectivity at local scale and under a clear midday sky. Affects surface radiational heating potential. Varies with surface color, wetness, and roughness.</p> <p>Mean annual anthropogenic heat flux density at local scale. Heat sources include vehicle engines, industrial/domestic combustion processes, space cooling/heating, and human metabolism. Varies significantly with latitude, season, and population density.</p>	

Figure 2.6 : structure d'un type LCZ. Source: (Stewart I.D., and Oke T.R., 2012).

Rappelons que L'approche LCZ a pour objectif principal d'établir un protocole commun pour les études observationnelles de température urbaine, afin de normaliser leur échange au niveau mondiale. Pour cela, la méthode est en cours de validation dans différentes villes à travers le monde. Onitsha-Nigeria- (Nduka I.C., Abdulhamed A.I., 2011), Dublin-Irland- (Alexander P.J., Mills G., 2014), Köchi-Inde- (Thomas G., et al., 2014), Nancy- France- (Leconte F., 2015a), Singapore (Ng Y.X., 2015), Nagano (Japon), Vancouver (Canada) Uppsala (suède) (Stewart I.D., Oke T.R., 2010).

La classification d'une agglomération par "LCZ" est adapté à d'autres problématiques. C'est un outil applicable dans la cartographie spatiale urbaine : (Houet T., Pigeon G., 2011; Perera N.G.R., et al., 2012) qui permet l'interrogation géographique de chaque LCZ : propriétés de surfaces, spécificités climatiques.etc. Elle peut aussi supporter les études de simulations (Alexander P.J., et al., 2015; Krayenhoff S., et al., 2009), en fournissant une base de données urbaine suffisante en échelle et en détails pour le développement et l'application des modèles numériques. Ce référentiel offre une assise pour le développement et l'installation des réseaux de stations météorologiques urbaine (Savić S., et al., 2013; Siu L.W., Hart M.A., 2013).

2.5. Conclusion :

Tout au long de ce chapitre, la thématique de l'investigation et d'analyse des phénomènes thermiques urbains a été développée. Tous d'abord, un aperçu des approches utilisées pour étudier les différents aspects du réchauffement local a été présenté. Plusieurs méthodes sont disponibles, de l'observation des paramètres climatiques jusqu'à la modélisation des mécanismes physiques qui sont à l'œuvre.

L'ampleur des études réalisées à partir des approches observationnelles représente, jusqu'à présent, la partie la plus importante dans les connaissances offertes par les différents travaux menés sur le climat thermique urbain. Les lacunes existantes entre les aspects théoriques de ces connaissances et les outils d'application dans les différents domaines (planification urbaine, aménagement urbain.etc.) ont rendu difficile l'intégration des phénomènes climatiques lors de l'élaboration des projets. A cet égard, plusieurs tentatives existent dans la littérature, visent à combler ces lacunes par le moyen d'action : le zonage climatique. Les schémas sont nombreux et possèdent chacun ses objectifs et ses ampleurs. Certains n'envisagent que des villes développées, d'autres sont destinés pour la

caractérisation des sites urbains seulement, certains de ces systèmes ne sont pas en adéquation avec les problématiques de réchauffement locale.

À travers une étude comparative, le système de classification ‘‘Zone Climatique Locale’’ s’avère particulièrement plus pertinent dans le cadre d’une étude approfondie d’ICU. Il permet de mieux intégrer la dimension climatique dans les choix urbains entrepris, et créer une passerelle entre deux domaines distincts : la climatologie urbaine et l’urbanisme, en fournissant des informations détaillées d’ordre quantitatif et qualitatif sur l’effet des différentes interventions (aménagement) sur l’environnement climatique.

Troisième chapitre :
Analyse du comportement thermique de
Constantine en période estivale

3.1. Introduction :

A ce jour, l'ICU en Algérie a reçu peu d'attention par la communauté scientifique. Le nombre des études observationnelles d'ICU est considéré comme étant restreint. Le présent chapitre a pour but de comprendre l'environnement thermique de la ville de Constantine, en se basant sur des renseignements issues de la télédétection thermique, dont *“Les avancées dans ce domaine ont alimenté de données de plus en plus performantes les préoccupations environnementales”*⁶⁰.

Puisque tout objet du sol a une température qui lui est propre, notre hypothèse de départ veut que le comportement thermique de la ville de Constantine soit étroitement lié aux aspects biophysiques de la surface (zones urbaines, végétation.etc).

Nous présentons dans ce chapitre la zone d'étude et les données utilisées. Il est question aussi d'expliquer le processus méthodologique utilisé pour obtenir la température de surface, et extraire les différentes caractéristiques d'occupation du sol (figure 3.1). Pour ce faire nous avons mobilisé le système d'information géographique (GIS) et le logiciel de traitement des images satellitaires (ENVI).

3.2. Données et méthodes

3.2.1. Le territoire d'étude :

Cette étude s'intéresse au territoire de la wilaya de Constantine (figure 3.2). Géographiquement, elle est située en région Nord Est de l'Algérie (entre 36° 17' Nord de latitude et 6° 37' Est de longitude), à une élévation de 694m sur un étroit plateau rocheux. La ville s'étendant sur une superficie d'environ 1297,2 Km², et est structuré en 12 communes, totalisant 448 000 d'habitants en 2008, selon l'Office National des Statistiques. Elle se caractérise par un relief exceptionnellement accidenté, marqué par les juxtapositions de haute plaine et de collines. Constantine est soumise à un climat semi aride marqué par une longue période de sécheresse estivale varie de 5 à 6 mois. Les températures mensuelles moyennes oscillent 34.5 °C en juillet et 2.7°C en janvier. Les précipitations moyennes annuelles reçues sont de l'ordre de 517.08 mm.

⁶⁰ C, Weber. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Hermès. Paris.

Démarche méthodologique :

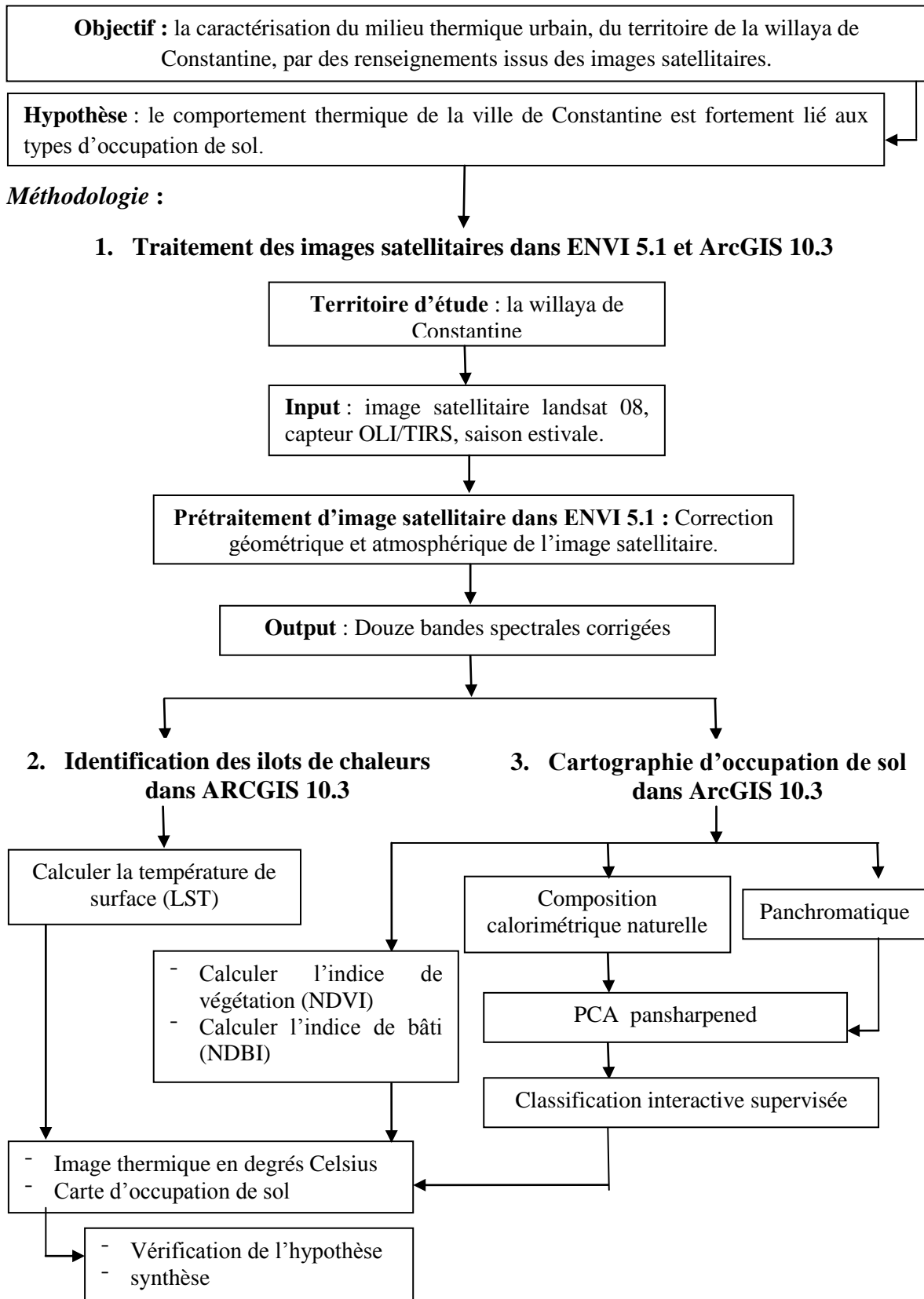


Figure 3.1: organigramme du processus méthodologique. Source: (Auteur, 2017)

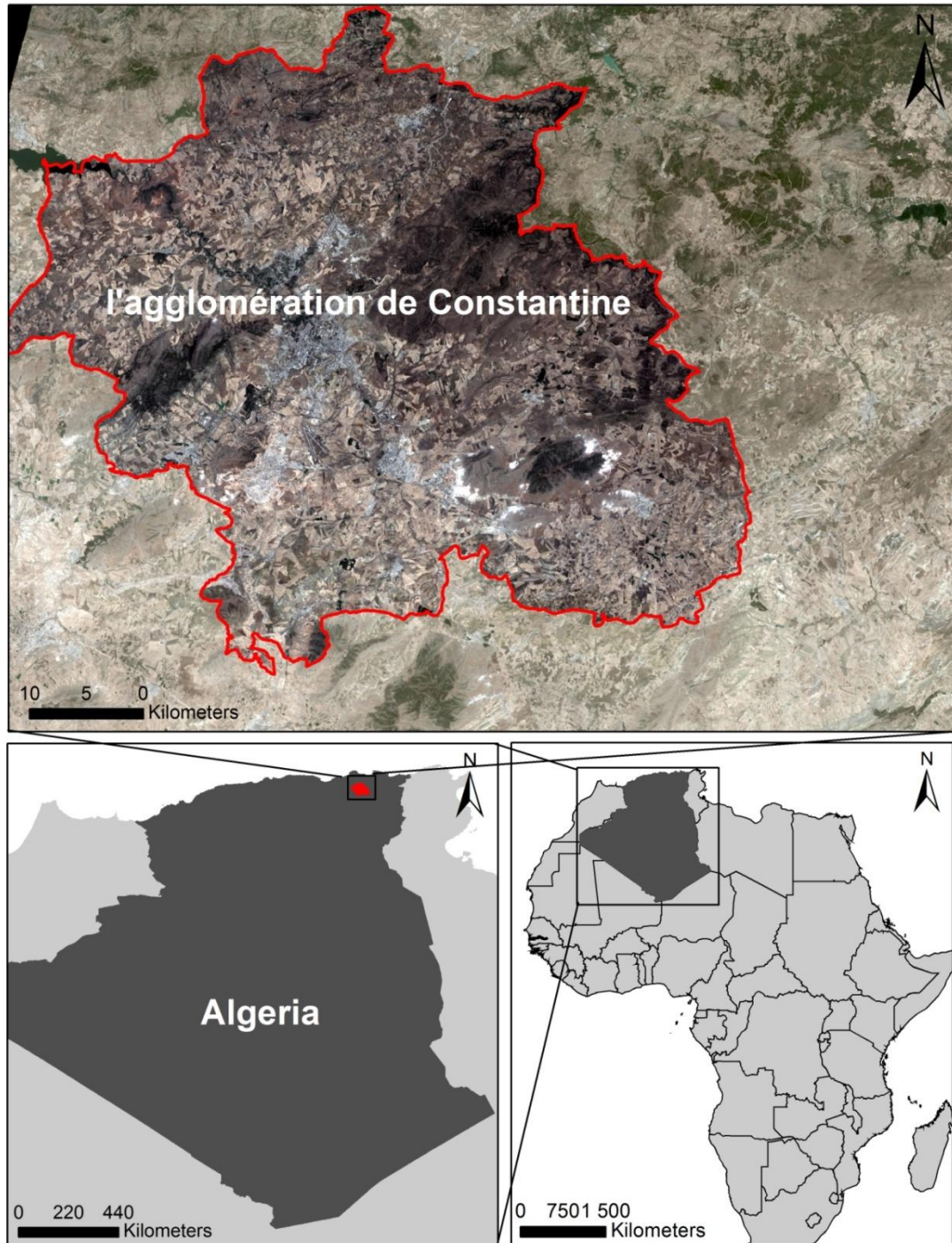


Figure 3.2: l'aire d'étude de territoire de la willaya de Constantine. *Source : (Auteur, 2017)*

3.2.2. Outils et données mobilisés :

Nous présentons ici un résumé où figure le programme d'observation de la surface terrestre 'Landsat' avec lequel on travaille, dans cette approche méthodologique. Cette partie sera complétée d'annexe A.2 dans laquelle des généralités de télédétection

(principes, systèmes d'observation,...) sont présentées, qui servent à faciliter la discussion sur l'intégration des produits satellitaire, au sein de ce chapitre.

Le programme landsat est fréquemment utilisé pour les études observationnelles de la terre, il fournit à la communauté mondiale et scientifique un archive de données spatiales détectées qui couvrent la majorité de superficie de la planète. Huit satellites ont été mis en opération entre 1972 et 2013 (tableau 3.1).

Tableau 3.1: Les satellites Landsat lancés par la NASA. *Source :* <http://landsat.usgs.gov>

Satellite	Lancement	Démissionné	Capteur
Landsat 1	Juillet 1972	Janvier 1978	MSS (Multispectral Scanner)
Landsat 2	Janvier 1975	Juillet 1983	MSS
Landsat 3	Mars 1978	Septembre 1983	MSS
Landsat 4	Juillet 1982	Juin 2001	MSS/TM (Thematic Mapper)
Landsat 5	Mars 1984	2013	MSS/TM
Landsat 6	Octobre 1993	N'a pas achevé son orbite	ETM (the Enhanced Thematic Mapper)
Landsat 7	Avril 1999	Opérationnel	ETM+
Landsat 8	Février 2013	Opérationnel	OLI/TIRS

Le dernier d'entre eux, landsat 8, lancé en février 2013, il tourne autour de la terre à une altitude de 705m, et effectué un cycle orbitale chaque 16jours. Le système OLI/TIRS – en plus de sa bonne résolution- fournit des données de l'état de couverture du sol d'une meilleure performance radiométrique, ce qui a élargi le champ de ses applications. Landsat 8 est doté de deux instruments de détection :

- Le capteur OLI (operational land imager), assure l'acquisition des données sur neuf bandes spectrales, dont huit de 30m de résolution et une autre d'une résolution de 15m décrite comme 'panchromatique'.
- Le capteur TIRS (thermal infrared), détecte les données dans deux bandes spectrales de 100 de résolution.

Le tableau 3.2 présente les bandes OLI/TIRS landsat 8 et quelques applications associées à différentes bandes.

Tableau 3.2 : caractéristiques des données landsat 8. *Source: <http://landsat.usgs.gov>*

Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution	usage
Bande 1 aérosol	0.43–0.45	30	observations de la zone côtière
Bande 2 bleu	0.45–0.51	30	distinguer le sol de la végétation; végétation à feuilles caduques de celle à feuilles persistantes.
Bande 3 vert	0.53–0.59	30	évaluer la vigueur de la plante.
Bande 4 - rouge	0.64–0.67	30	les pentes de la végétation.
Bande 5 NIR	0.85–0.88	30	la limite de la végétation entre la terre et l'eau, et les reliefs.
Bande 6 SWIR 1	1.57–1.65	30	Les zones brûlées et la végétation touchée par le feu peuvent être utilisées pour détecter les feux actifs
Bande 7 SWIR-1	2.11–2.29	30	Détecter le stress de la sécheresse, les zones brûlées et incendiées, détecter les incendies actifs
Bande 8 panchromatique	0.50–0.68	15	Affiner les images multispectrales.
Bande 9- cirrus	1.36–1.38	30	Détection des cirrus.
Bande 10 TIRS 1	10.60–11.19	100	Cartographie des différences thermiques dans les courants d'eau, surveillance des incendies.
Bande 11- TIRS 2	11.50–12.51	100	Identique à la bande 10

3.2.3. Acquisition des données:

L'image satellitaire retenue pour effectuer la détection des ICUs dans la ville de Constantine, provient du capteur TIRS/OLI du satellite Landsat 08 (tableau 3.3). Nous avons opté pour la saison chaude car l'intensité d'ICU s'amplifie en général durant cette période. En plus, le taux de couverture nuageuse est plus faible, rendant ainsi possible l'acquisition d'image sans nuage. Cette image reçoit les données sur douze bandes spectrales distinctes. Les bandes 1-9 et 12 qui correspondent aux régions visible et infrarouge, sont utilisées pour acquérir les réflectances terrestres, elles ont une résolution spatiale de 30m (15m pour la huitième bande). Les bandes 10 et 11 (régions thermiques) quant à elles vont être transformées en valeurs de température de surface, leur résolution spatiale est de 100m.

Tableau 3.3 : données utilisées dans le cadre du travail. *Source* : capteur OLI/TIRS satellite landsat 08, bande 1 à 12, 15 juillet 2015.

Type de données	Date et source	Système de projection
ID: "LC81930352015196LGN00" Capteur: OLI/TIRS Satellite: landsat 08	15 juillet 2015 10 :06 (GTM)	UTM zone 32
Coord. Géographique	Path/Row	Particularité
36° 17' Nord 6° 37' Est	193/35	Bandes thermiques 10 et 11 100m de résolution

3.3. Prétraitement :

" Avant l'analyse principale, un prétraitement de l'image numérique est souvent nécessaire⁶¹ .

Afin de les rendre utilisables, les valeurs numériques réceptionnées sont mises en forme en effectuant plusieurs opérations de correction des distorsions intervenues lors de l'enregistrement, liées selon (Weber C., 1995) aux conditions de prise de vue du système. Les calibrations géométriques et atmosphériques sont l'étape la plus importante dans le traitement d'image. Dans le cadre de notre travail, ces processus de correction ont été réalisés grâce au logiciel de télédétection ENVI 5.1 (ENvironment for Visualizing Image), c'est un logiciel professionnel permettant la visualisation, le traitement, l'analyse, et la présentation de nombreux types d'images numériques, dont les images satellites.

3.3.1. La correction atmosphérique :

La correction atmosphérique consiste à tenir compte des effets indésirables de l'atmosphère afin d'obtenir une bonne estimation des rayonnements terrestres ascendants réels (la réflectance). Selon (Voogt J.A., Oke T.R., 2003):

"L'absence de correction atmosphérique peut introduire une erreur de température de 4 à 7 ° C " .

La NASA sur son site a proposé une correction de réflectance par angle solaire selon l'équation 3.1 :

⁶¹ Q, Weng. (2010). remote sensing and GIS integration: theories, methods, and applications. McGraw-Hill New York.

$$\rho\lambda = \rho\lambda' / \sin (\theta_{SE}) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

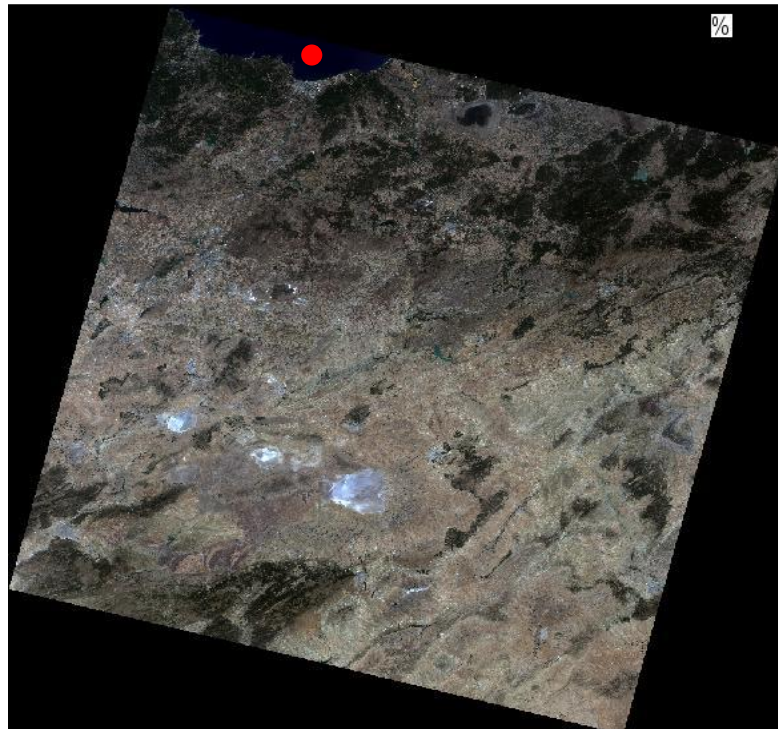
Avec :

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

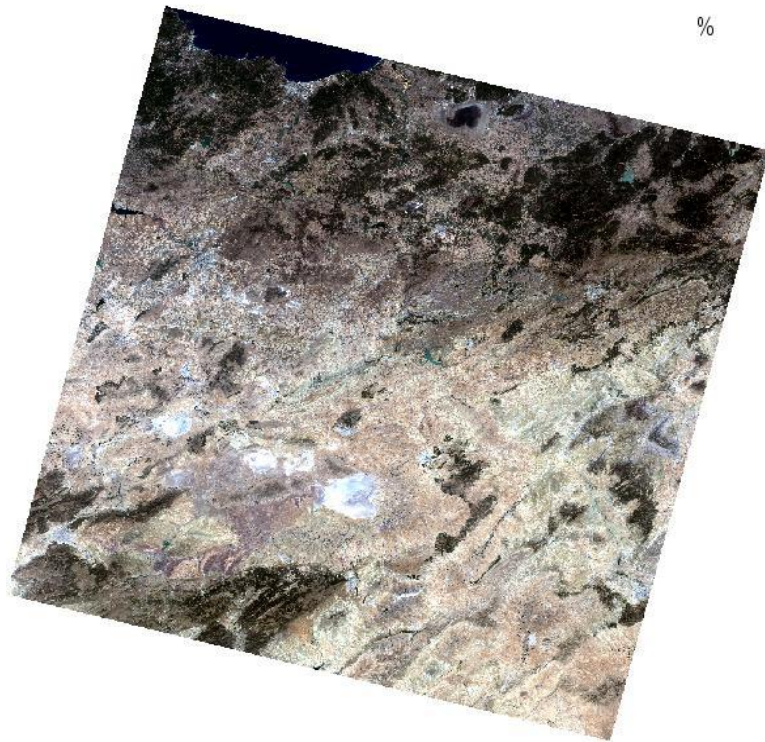
Dont :

- $\rho\lambda$: la réflectance atmosphérique corrigée (TOA –top of the atmosphere)
- $\rho\lambda'$: TOA sans correction.
- θ_{SE} : élévation du soleil.
- M_p : REFLECTANCE_MULT_BAND_x , avec x est le numéro de la bande
- Q_{cal} : la bande spectrale considérée
- A_p : REFLECTANCE_ADD_BAND_x, avec x est le numéro de la bande.

D'autres algorithmes de correction existants dans la littérature, adaptés à des applications opérationnelles sont abordés dans (Liang S., et al., 2002, 2001). Dans ce travail, nous avons travaillé avec le logiciel ENVI 5.1 qui permet d'effectuer la correction atmosphérique en utilisant un algorithme nommé "Dark-object" (figure 3.3, 3.4).

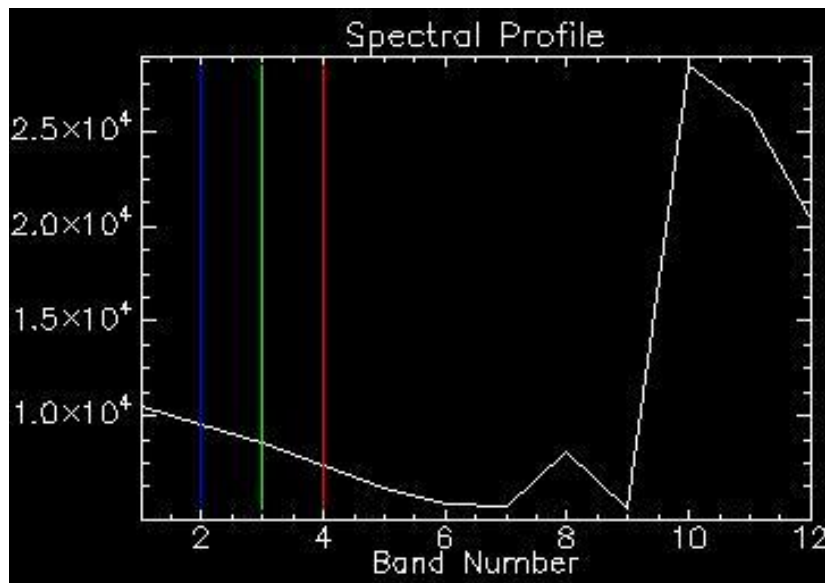


(A)

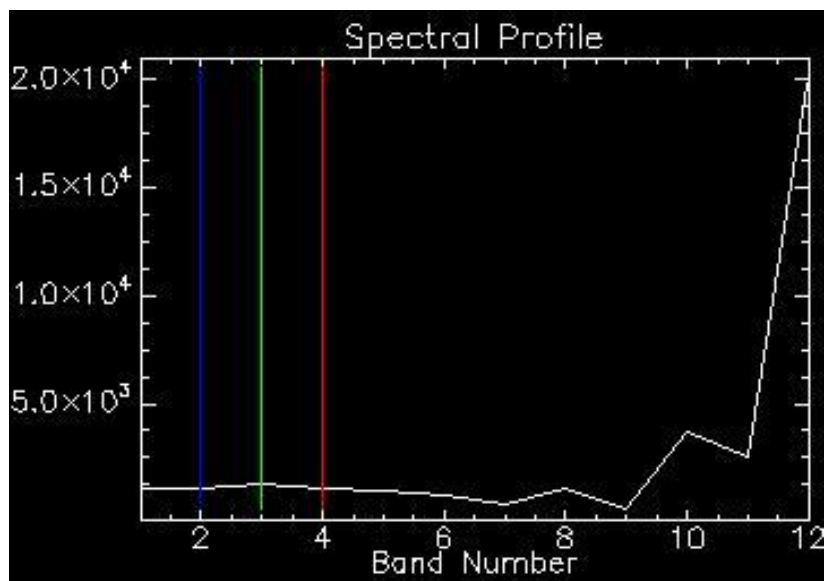


(B)

Figure 3.3 : (A) image satellitaire brute (sans correction), en composition colorimétrique naturelle (RGB) du 15 juillet 2015, (B) image satellitaire corrigée, en composition colorimétrique (RGB) du 15 juillet 2015. *Source : capteur OLI/TIRS satellite landsat 08, bande 1 à 12, 15 juillet 2015.*



(A)



(B)

Figure 3.4 : (A) le profile spectrale, d'un point (en rouge) avant la correction atmosphérique, et (B) le profile spectrale du même point après la correction atmosphérique. *Source : capteur OLI/TIRS satellite landsat 08, bande 1 à 12, 15 juillet 2015.*

3.3.2. La correction géométrique :

C'est un traitement qui correspond à une mise en correspondance, selon des points homologues, entre une image et un support informationnel (carte ou image), grâce à une régression bidimensionnel le plus souvent⁶². Nous avons utilisé dans ce travail, une image satellitaire corrigée géométriquement et géoréférencié selon le système de projection UTM (WGS 84, ZONE 32 NORD), pour effectuer la correction de l'image choisie de territoire d'étude. La procédure consiste à prendre une vingtaine de point d'appui précis et reconnaissable (comme les intersections dans les réseaux routier) sur l'ensemble des deux rasters, pour que l'image soit géoréférencié.

Une fois l'image est corrigée (correction géométrique et atmosphérique), on crée de nouvelles délimitations qui couvrent seulement le territoire d'étude (ville de Constantine). La nouvelle image doit être enregistrée et exportée sous un format IMG, afin de poursuivre les autres étapes de la démarche méthodologique, en utilisant le système d'information géographique SIG. Ce dernier offre selon (Weber C., 1995) *la possibilité d'intégrer différents types d'information et de les utiliser simultanément.*

⁶² C, Weber. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Hermès. Paris.

3.4. Traitement des images satellitaires:

Cherchant à mettre en correspondance les variations spatiales de climat thermique urbain et les différents modes d'occupation de sol, nous proposons une méthodologie de travail qui consiste à classifier le territoire d'étude en typologies correspondantes à l'état biophysique de surface, puis d'analyser leurs comportements vis-à-vis de température de surface (LST). Divers travaux de recherches, dans différentes villes, sollicitées par différents climats, ont été menés en ce qui concerne ce sujet, Ces travaux montrent des similitudes dans leur approche méthodologique citant (Bhatti S.S., Tripathi N.K., 2014; Du P., et al., 2014; Harris R., Coutts A., 2011; Kuşçu Ç., Şengezer B., 2011; Lo C.P., et al., 1997; Lwin K., Murayama Y., 2013; Martin P., 2008; Shigeta Y., et al., 2009; Streutker D.R., 2002; Weng Q., 2009; Xu H., et al., 2000; Zha Y., et al., 2003).

Dans (Kumar K.S. et al., 2012), une scène Landsat ETM de 2000 qui couvre la ville de Vijayawāda (inde), a permis d'élaborer une classification supervisée en classes thématiques et de visualiser la dynamique thermique de la ville et ses environs par l'extraction du LST. Ces traitements sont effectués via l'utilisation du logiciel ERDAS imagine 9.1. La lecture des images résultantes du traitement, en terme d'occupation de sol (figure 3.5), de températures (figure 3.6), ont permis de localiser les zones qui correspondent aux plages de température maximales, elle se situent principalement sur les zones urbaines. Les résultats ont démontré aussi une corrélation inverse entre la présence de la végétation et les tendances de température.

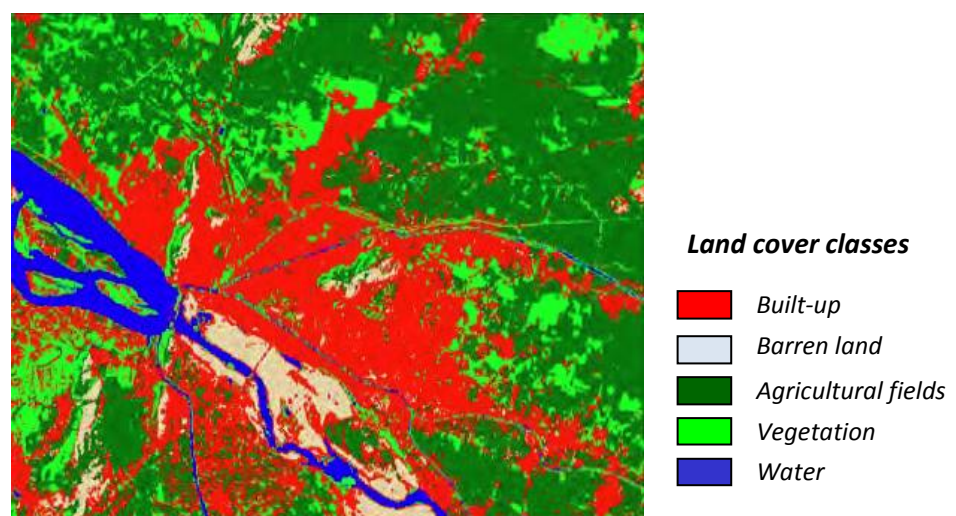


Figure 3.5: carte d'occupation du sol de la zone d'étude. *Source: adaptation de (Kumar K.S. et al., 2012)*

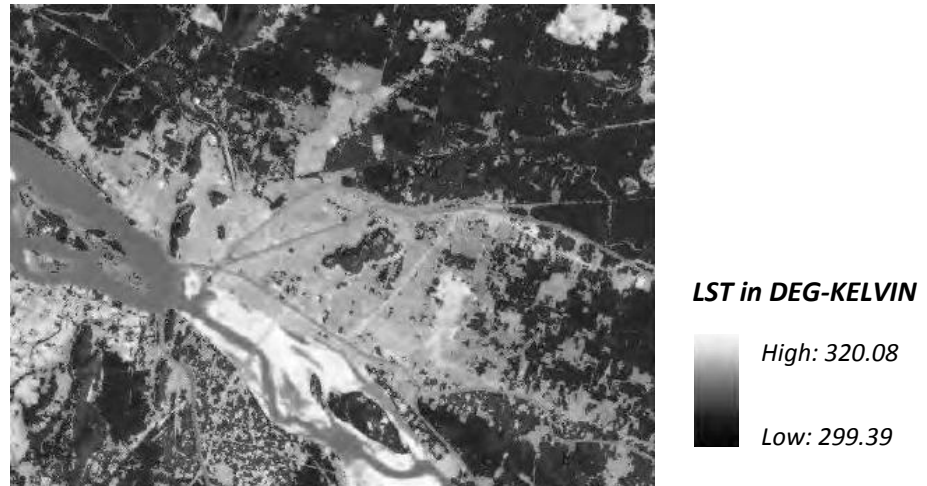
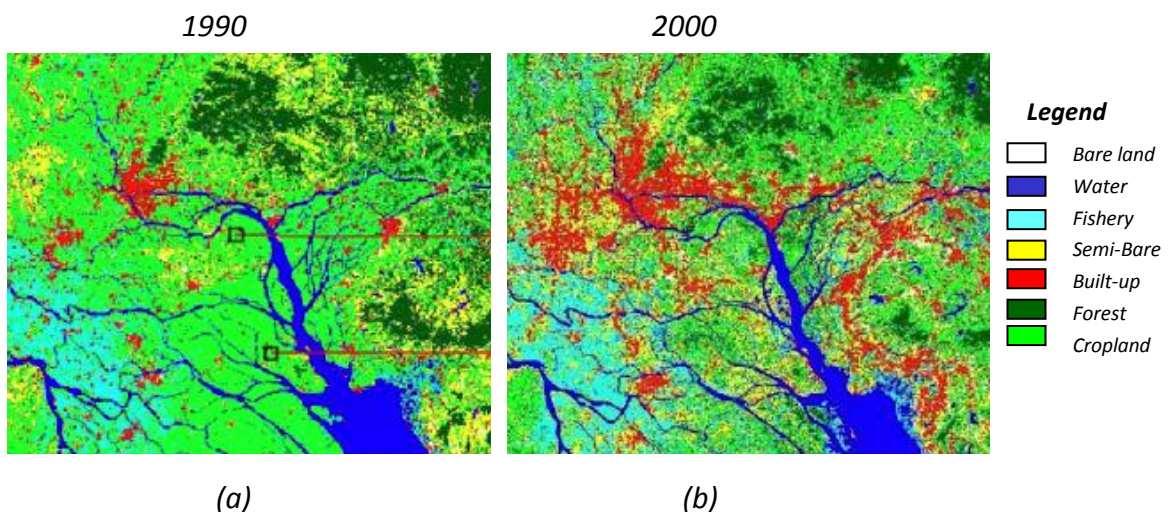


Figure 3.6: carte de température de surface (LST) de la zone d'étude. *Source: adaptation de (Kumar K.S. et al., 2012)*

Chen X.-L., et al (2006), se sont basés sur des données satellitaires Landsat TM, ETM des années 1990 et 2000 pour localiser les ICUs et dériver les informations sur les principaux types d'occupation de sol, à Pearl River Delta, Sud de la Chine. Les résultats ont démontré que les zones de forte urbanisation représentent les valeurs de températures les plus élevées (figure 3.7). Les chercheurs ont proposé aussi une étude quantitative, en utilisant quatre indices à savoir : le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), le NDBI (Normalized Difference Build-up Index, le NDWI (Normalized Difference Water Index), et le NDBal (Normalized Difference Bareness Index), pour explorer la relation entre la distribution des ICUs et les caractéristiques de surfaces. Les résultats (figure 3.6) ont révélé qu'il existe une corrélation négative entre le NDVI, NDWI, NDBal et la température de surface et, une corrélation positive entre NDBI et LST.



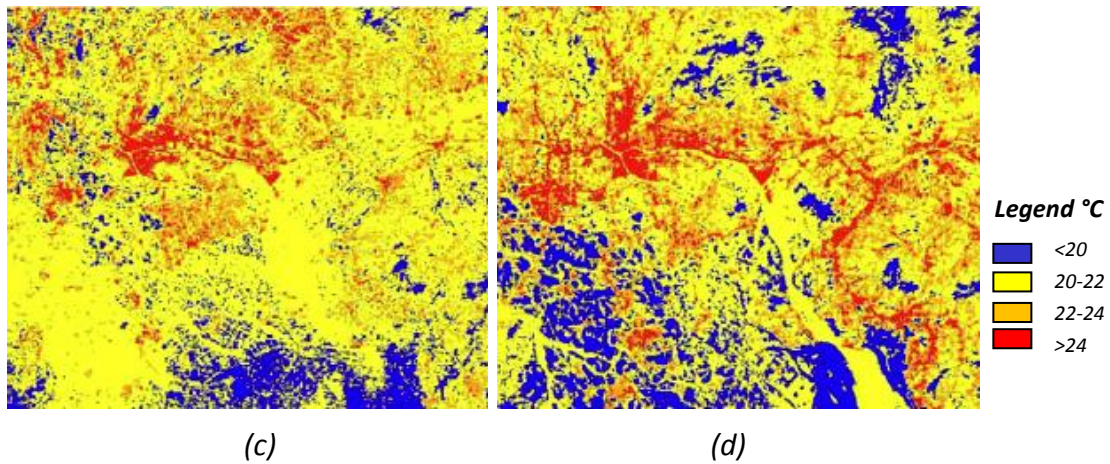


Figure 3.7: Les modes d'occupation du sol et la répartition spatiale de température dans la région du Pearl River Delta octobre 1990 et novembre 2000 (a) modes d'occupation du sol (octobre 1990), (b) modes d'occupation du sol (novembre 2000), (c) LST (octobre 1990), et (d) LST (novembre 2000). *Source : adaptation de (Chen X.-L., et al., 2006)*

3.4.1. Extraction de la température de surface LST :

Les images satellitaires correspondent à des données numériques représentant les valeurs radiométriques des pixels, prises canal par canal ou simultanément⁶³. Dans le calcul du LST, les informations thermiques infrarouges des bandes spectrales 10 et 11 dans l'image landsat 8 capteurs OLI/TIRS sont utilisées. Ces données sous forme numérique (DN- digital number), doivent être converties en valeur de température.

Les méthodes de transformation sont complexes, elles font appel à différents logarithmes, à partir desquels les valeurs d'émissivité de surface dans l'intervalle thermique sont transformées en température de surface exprimées en degrés Celsius⁶⁴. Plusieurs études s'accordent sur l'utilisation de deux conversions principales, comme dans (Chen X.-L., et al., 2006; Kuşçu Ç., Şengezer B., 2011).

- Convertir les valeurs digitales (DN) de la bande thermique en luminance spectral (TOA –top of the atmosphere) :

Se fait grâce à la formule (équation 01) :

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \dots\dots\dots (3.3)$$

Dont :

⁶³ C, Weber. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Hermès. Paris.

⁶⁴ A, Sakhy., et al., (2011). *Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris)*. In Dixièmes Rencontres de Théo Quant.

- L_λ : la radiance spectrale de l'atmosphère
- M_L : RADIANCE_MULT_BAND_x, où x est le numéro de la bande considéré.
- Q_{cal} : c'est la bande thermique considérée
- A_L : Band spécifique additive (RADIANCE_ADD_BAND_x, où x est le numéro de la bande considéré).

- **Convertir cette luminance (TOA) en température de brillance (Brightness temperature):**

$$BT = K_2 / (\ln(K_1/L_\lambda) + 1) \dots\dots\dots (3.4)$$

- **BT** : la température de brillance (Kelvin), rappelons que 1k = 1°C+273
- **K1 et K2**: des constantes d'unités de flux par des longueurs d'onde.
- L_λ : la radiance spectrale de l'atmosphère

M_L , Q_{cal} , A_L , $K1$ et $K2$ sont obtenu à partir du fichier métadatas de calibration du capteur.

- **Calcul d'émissivité**

$$e = 0.004 P_V * 0.986 \dots\dots\dots (3.5)$$

P_V : proportion de végétation, calculé en utilisant les valeurs du NDVI:

$$PV = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})^2 \dots\dots\dots (3.6)$$

- **Dérivation de la température de surface (LST) :**

$$LST = BT / 1 + w * (BT/P) * \ln(e) \dots\dots\dots (3.7)$$

- **BT**: la température de brillance
- **W**: la longueur d'onde des rayonnements émis (la bande x)
- **P**: 14380
- **e**: indice d'émissivité

3.4.2. Cartographie d'occupation de sol :

3.4.2.1. Processus de classification :

Les images landsat 8 sont composées de douze bandes spectrales acquises en niveau gris. La composition colorimétrique permet d'afficher les images en couleur, elle consiste à combiner trois canaux par l'affectation de ceux-ci aux trois couleurs primaires (red-green-

bleu (RGB)). L'image ci-dessous présente la composition naturelle "couleur vrais" de la ville de Constantine. Elle est réalisée à partir des bandes spectrales bleu-vert-rouge du capteur OLI/TIRS (figure 3.8). Au niveau du traitement de cette image, il est nécessaire d'adopter une méthode approprié pour extraire le maxima d'informations.

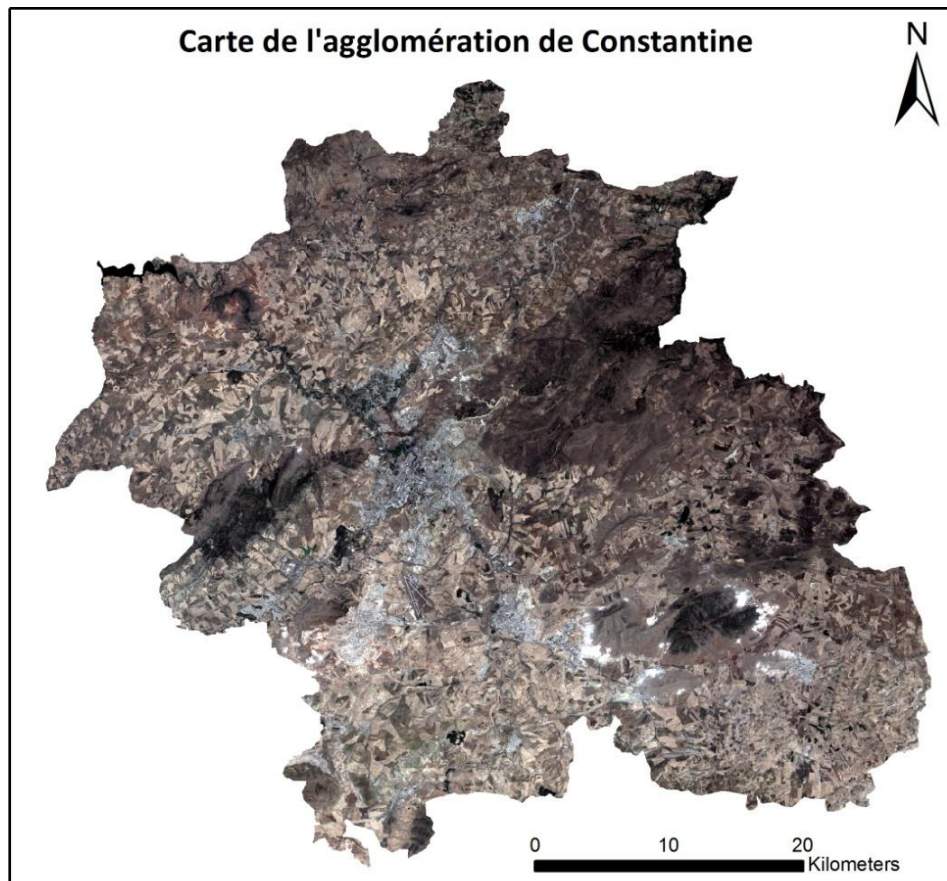


Figure 3.8: image en composition colorimétrique naturelle (RGB=432) de Constantine. *Source :*
(Auteur, 2017)

Landsat est un satellite terrestre conçu pour installer plusieurs bandes de basse résolution (30*30m) décrites comme "multi-spectrales", et une bande de haute résolution (15*15m) décrite comme "panchromatique". A une résolution de 30m, les capteurs ne parviennent pas à satisfaire pleinement les exigences de classification des modes d'occupation de sol, car « *cette résolution est susceptible de saisir une variété de couverture terrestre à l'intérieur de chaque pixel* »⁶⁵. Lorsque l'application a pour objectif la classification, les images multi-spectrale (MS) peuvent être améliorées en fournissant le

⁶⁵ K.K, Lwin., Y, Murayama. (2013). *Evaluation of land cover classification based on multispectral versus pansharpened landsat ETM+ imagery.* GIScience & Remote Sensing 50, 458–472.

détail de la bande panchromatique, *cette dernière permet d'assurer une certaine finesse aux résultats*⁶⁶. Le processus appelé ‘‘pansharpening (PS)’’.

Pour générer les données de la couverture du sol de la ville de Yangon, sud de Myanmar, (Lwin K.K., Murayama Y., 2013) ont comparé les résultats de classification d'une image landsat ETM multi-spectrale et d'une autre ‘‘pansharpened’’. Les analyses des deux images classifiées ont démontré que l'utilisation de la bande panchromatique pour avoir la haute résolution permet d'avoir 35% plus de détail dans la couverture du sol. Ils ont noté aussi que la résolution 30m de l'image multispectrale est inappropriée pour détecter les différentes catégories urbaines.

En s'appuyant sur ces résultats, la figure 3.8 sera rééchantillonnée à 15m de résolution en effectuant, à l'aide d'ArcMap, la fusion de cette image multispectrale et la bande panchromatique (bande 08). Elle sera la base de notre travail de classification. La figure (3.9) compare une partie d'image MS (à gauche) et d'image PS (à droite).

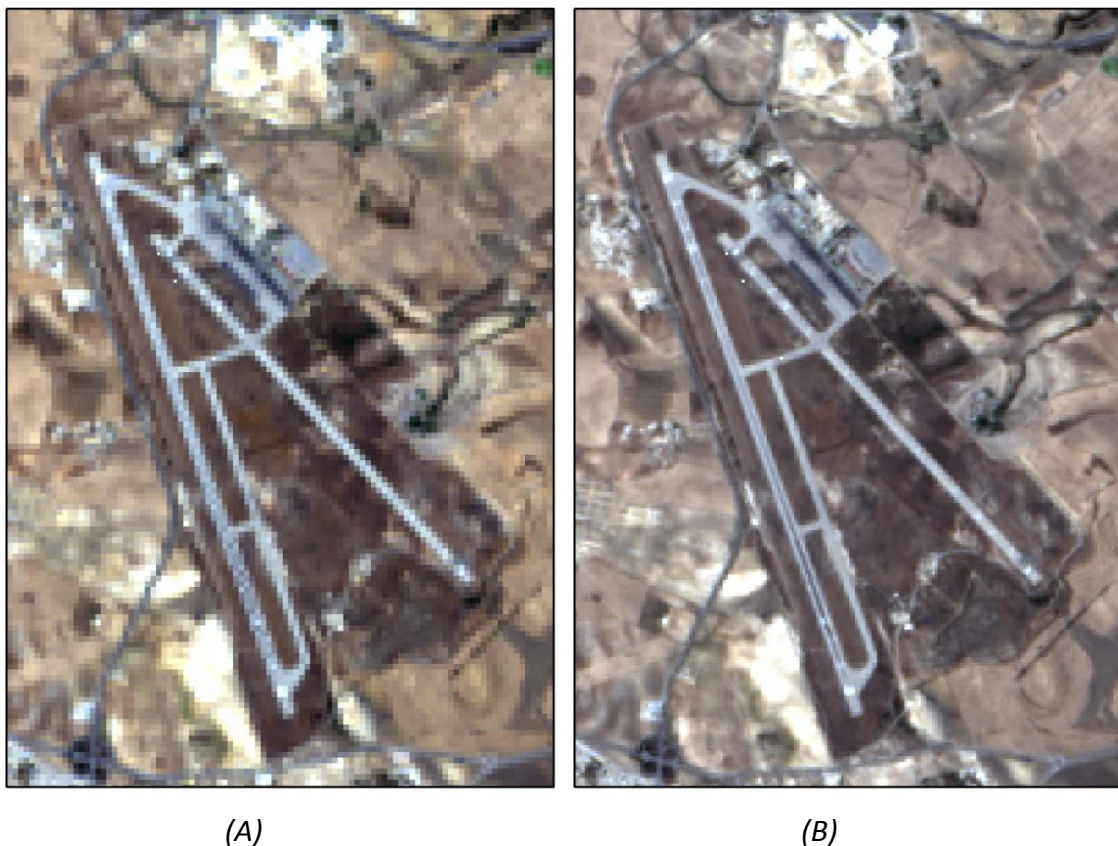


Figure 3.9: (A) Multispectrale, (B) Pansharpening. *Source (auteur, 2017)*

⁶⁶ C, Weber. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Hermès. Paris.

3.4.2.2. L'analyse en composante principale (ACP):

A l'aide de l'outil 'principal components' du logiciel ArcMap, une analyse en composante principale a été appliquée sur l'image PS de haute résolution. Cette technique consiste à compresser les données, *et la suppression de la redondance d'information entre canaux d'une même scène de télédétection*⁶⁷, ce qui permet la création d'un ensemble réduit de variables qui contient la plupart des informations disponibles dans le groupement originale. Un nombre réduit de facteurs principaux est beaucoup plus facile à analyser et à interpréter. Cette méthode de fusion a été utilisée dans (Hoang et al., 2009; Lwin and Murayama, 2013).

3.4.2.3. La classification de l'image :

Mettre en évidence les catégories de l'utilisation du sol correspond certainement à une des applications les plus importantes des données satellitaires. *La classification correspond à un traitement statistique où chaque pixel est affecté à une classe d'appartenance en fonction des caractéristiques de valeurs radiométrique*⁶⁸. Plusieurs approches de classification existent dans la littérature, citant la méthode orienté-objet (Hoang K.H., et al., 2009), la classification supervisé (Bouzekri A., Benmassaud H., 2015; Lwin K.K., Murayama Y., 2013), plusieurs d'autres techniques sont abordées dans (Deb S.K., Nathr R.K., 2012).

Dans notre cas, le choix s'est porté sur la classification supervisée interactive. Nous avons utilisé l'image PCA-PS pour extraire des classes d'informations afin de générer une carte thématique de couverture du sol. L'approche consiste premièrement à créer des échantillons homogènes et qui sont représentatifs aux différentes catégories de la couverture du sol (urbain, agriculture, végétation, eau). Une seconde étape c'est la classification de ces échantillons. Nous avons effectué ces étapes à l'aide de la barre d'outil 'image classification' dans le logiciel ArcMap.

3.4.2.4. L'extraction de l'indice de végétation normalisé (NDVI –Normalized Difference Vegetated Index):

Un algorithme largement utilisé pour la dérivation et l'identification des changements relatifs à la végétation est le NDVI. *L'indice de végétation qui est le rapport*

⁶⁷ C, Weber. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain*. Hermès. Paris.

⁶⁸ Ibid. p,17.

entre les valeurs radiométriques des canaux visible et l'infrarouge, permet de différencier les espaces de végétation des surfaces de bâti ou d'eau⁶⁹.

Chen X.-L., et al (2006) a extrait les informations concernant la couverture du sol et l'occupation du sol des images satellitaires à l'aide de plusieurs indices y compris le NDVI pour identifier le couvert végétal. Zhang Y., et al (2012) a étudié la corrélation entre la végétation représenté par le NDVI, et l'ICU dans la ville de Wuhan (Chine).

Le calcul de NDVI se base sur les interactions entre la végétation et l'énergie électromagnétique solaire dans les longueurs d'onde rouge R (0,63 - 0,69), et le proche infrarouge PIR (0,76 - 0,90)⁷⁰, selon l'équation (1) suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \dots\dots\dots (3.8)$$

- En image satellitaire Landsat 8, capteur OLI/TIRS, le NDVI est calculé à partir des canaux 4 et 5 qui représentent respectivement le rouge et le proche infrarouge, Donc :

$$\text{NDVI} = (\text{band 5} - \text{band 4}) / (\text{band 5} + \text{band 4}) \dots\dots\dots (3.9)$$

Les valeurs théoriques de cet indice variant entre -1 et 1 dont:

- Les valeurs négatives correspondent aux surfaces d'eau, pour lesquelles les réflectances étant faible dans les deux bandes spectrales (R et PIR)
- Les sols nus (entre 0,1 et 0,2) où la réflectance dans le spectre PIR est un peu plus élevée que dans le rouge.
- Le couvert végétal quant à lui a des valeurs positives, généralement comprise selon (Vyas A., et al., 2014) entre 0,3 et 0,8.

3.4.2.5. Extraction de l'indice de bâti (NDBI–Normalized Difference building Index) :

C'est un indice sensitif aux zones construites. (Chen X.-L., et al., 2006) ont utilisé NDBI pour extraire les terrains urbains bâtis, sud de la Chine. Une situation similaire est

⁶⁹ Ibid. p,13.

⁷⁰ A, Sakhy., et al., (2011). *Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris)*. In Dixièmes Rencontres de Théo Quant.

également rencontrée dans (Lwin K.K., Murayama Y., 2013). *Le développement de cet indice a été basé sur la réponse spectrale unique des terres bâties qui ont une réflectance plus élevée dans la gamme des longueurs d'onde "SWIR" que dans le NIR⁷¹*. Il est estimé par l'équation suivante :

$$\text{NDBI} = \text{SWIR} - \text{NIR} / \text{SWIR} + \text{NIR} \dots \dots \dots (3.10)$$

Les valeurs de cet indice pour différentes occupation de sol/ couverture de sol sont représentées dans le tableau 3.4:

Tableau 3.4 : la gamme des valeurs NDBI pour différent types d'occupation de sol. *Source :* (Chen X.-L., et al., 2006)

Type	NDBI
Urbain (construit)	0.10–0.30
Sol nu	>0.25
Végétation	<0
Eau	<0

3.5. Résultats et discussions

3.5.1. Carte d'occupation du sol :

Après avoir extrait la ville de Constantine sur l'image satellitaire Landsat 8 (OLI/TIRS) de 2015, plusieurs traitements sont appliqués sur cette image selon la démarche méthodologique (Figure 3.1), dont le but est de faire générer une carte thématique d'occupation du sol. Il s'agit d'une image classée qui met en évidence les éléments majeurs de la ville et qui correspondent à l'état biophysique du sol.

Suite à l'application du processus de "classification interactive supervisée" réalisé à l'aide du logiciel ArcMap 10.3, l'image de Constantine est segmentée en plusieurs classes, permettant d'identifier un certains nombres de catégories de végétations (forestière dense, moins dense...), toutes comme les surfaces non bâties, les surfaces d'eau ... etc. Afin de faciliter l'analyse, les classes résultantes sont regroupées en une hiérarchie de quatre

⁷¹ H, Xu. (2007). *Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic oriented index combination technique*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 73, 1381–1391.

typologies (voir: Chen X.-L., et al., 2006; Kumar K.S., et al., 2012; Lwin K.K., Murayama Y., 2013) à savoir : les zones urbaines (des surfaces dotées d'infrastructures importantes), la végétation (forêts, parcs, terres cultivées.), les terres libres (agriculture et terre nue) et les zones d'eau.

Nous sommes conscients que la résolution moyenne des images satellitaires landsat (dans notre cas 15 mètre) n'est pas suffisamment fine pour obtenir la séparation exacte entre les catégories, ainsi la confusion entre les attributs de surface est inévitable, surtout dans les occupations du sol complexes (comme celles des pays en développement), où un pixel peut comprendre un mélange de propriétés. Il convient donc d'envisager des rectifications qui vont favoriser la vérification et la validation de classification. D'abord, une correction grâce à l'utilisation de l'indice de végétation NDVI a été procédée.

L'extraction de l'NDVI permet selon (Dubois J.M., et al., 1997), '*une lecture de l'image en termes de la densité de végétation*'. La carte dans la figure 3.10 laisse ressortir dans les tons clairs les sols à recouvrement végétal intense (zones lumineuses dues à la forte réflexion dans la bande spectrale 05 (Near-infrared), et la faible réflexion dans la bande 04 (red)), correspondant à des valeurs NDVI plus élevées, tandis que les valeurs basses de l'NDVI indiquent des zones dénudées; apparaît en tons plus foncé.

La visualisation de l'indice de végétation normalisé permet d'identifier certaines catégories suivant leur état végétatif. La carte de répartition spatiale du NDVI est classée selon les valeurs seuil présentés dans le chapitre méthodologique 01. Les plans d'eau sont des caractéristiques qui s'identifient aisément, car ils correspondent aux valeurs négatives du NDVI. Les formations végétales (dense et moyenne dense) sont également différenciées des surfaces dénudées ou urbains, en seuillant selon les valeurs théoriques appropriées ($NDVI > 0,3$) la carte de l'indice normalisé de végétation. Les résultats sont illustrés dans la figure 3.11.

Par ailleurs, la différenciation des zones urbaines des autres occupations de surface n'est plus facile à cause de l'hétérogénéité de ces milieux. Lors de la classification initiale, certains défauts ont été relevés dans la délimitation de l'enveloppe urbaine, particulièrement les constructions dispersées et/ou isolées dans les zones périurbaines. Certaines cibles comme le paysage urbain de la ville de Constantine prêtent à confusion avec des parcelles des terrains nus.

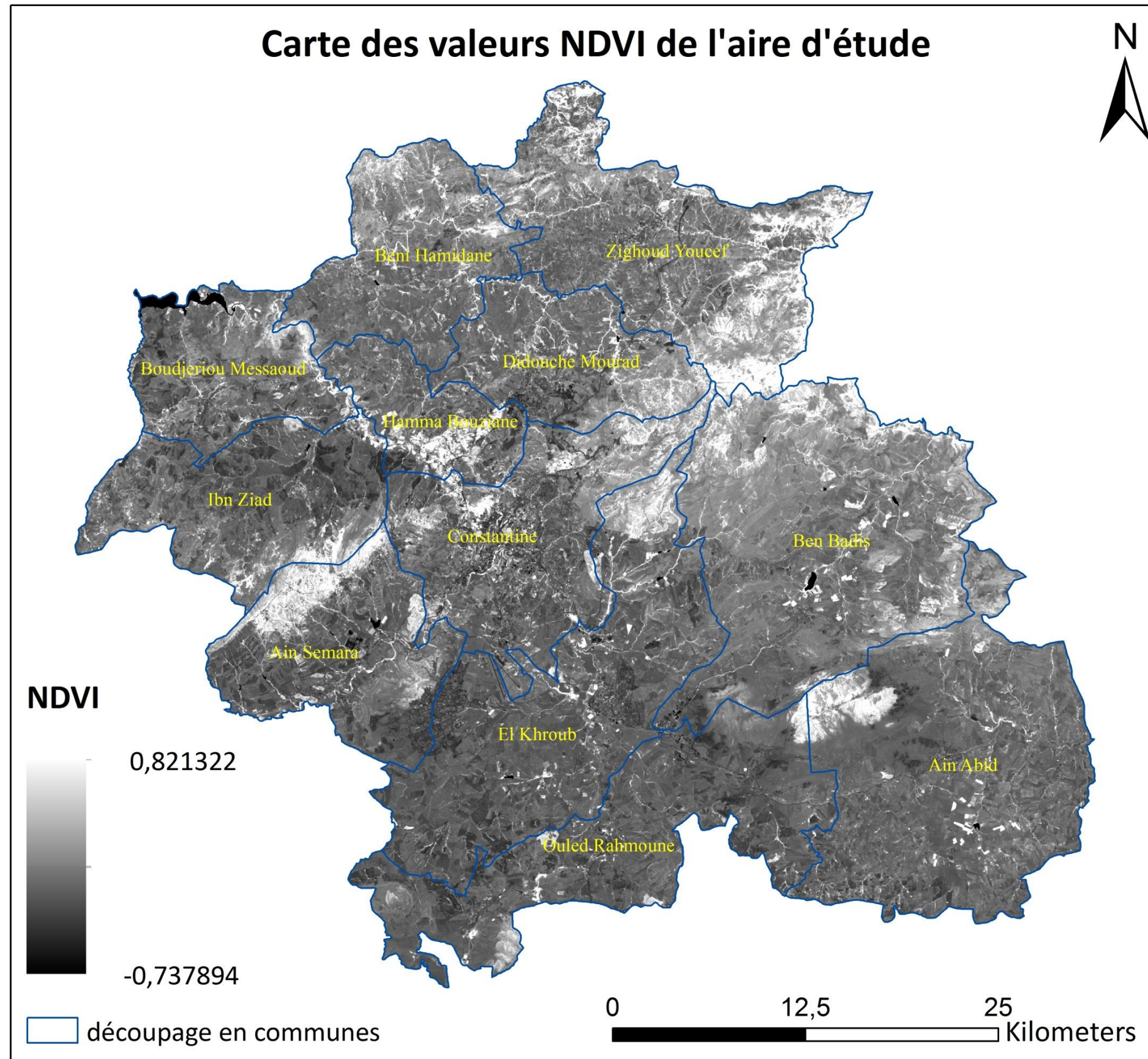


Figure 4.1: les valeurs NDVI de territoire de la wilaya de Constantine -15/07/2015-. Source : (auteur, 2017)

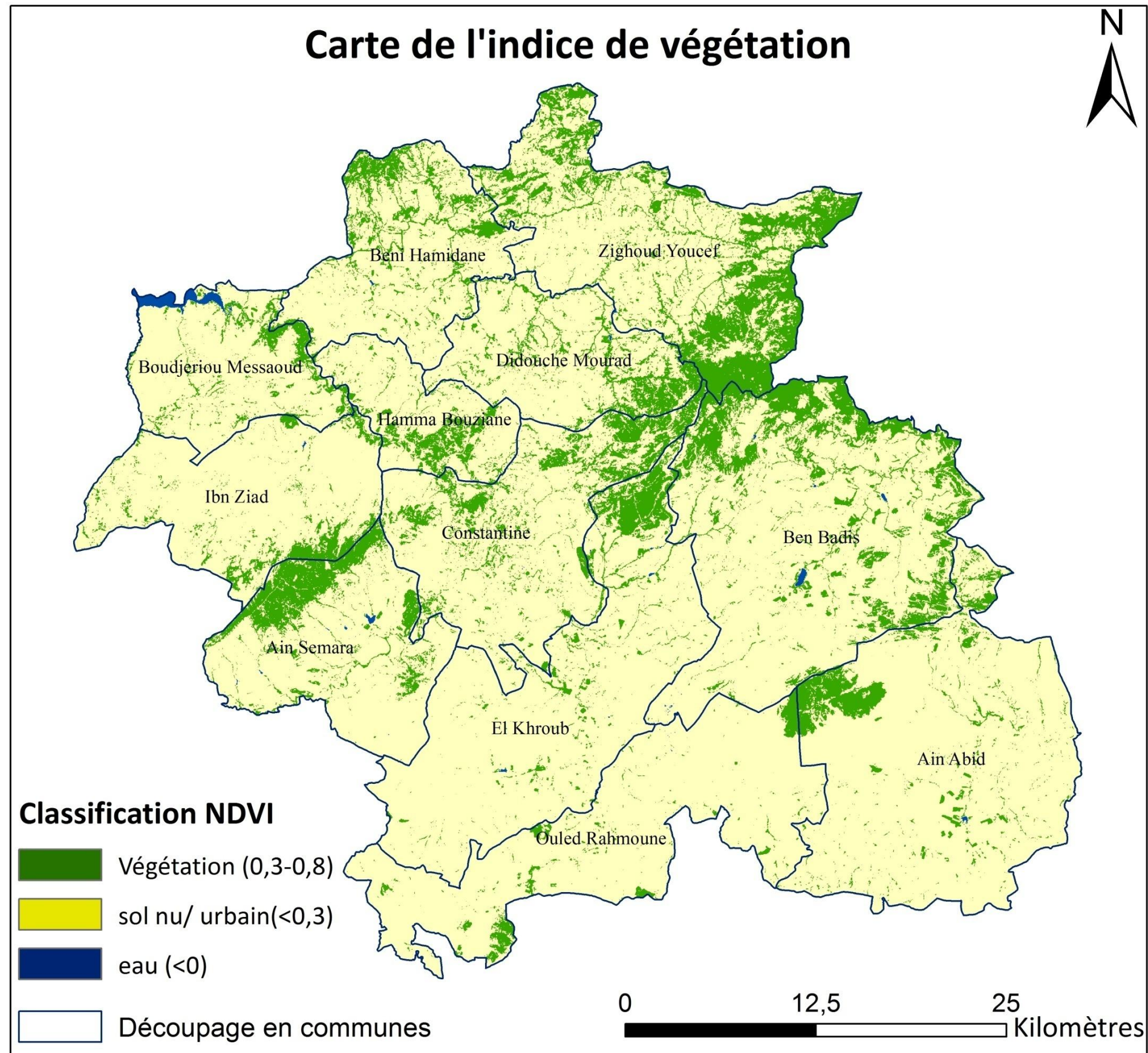


Figure 4.2 : classification de l'NDVI de l'aire d'étude -15/07/2015. **Source :** (auteur, 2017)

Pour cartographier les zones urbaine ainsi que les terrains nus, (Zha Y., et al., 2003) se sont penchés sur le développement de l'indice de bâti (NDBI), obtenu par l'intermédiaire d'un rapport entre les valeurs radiométriques des canaux infrarouges des bandes 5 et 6. Selon les chercheurs, Les deux composantes de surfaces correspondent à *des valeurs positives du NDBI*, indiqués par la teinte marron (figure 3.12). Les surfaces très végétalisées ou d'eau dans les teintes bleu foncé.

Au regard des résultats, le processus de classement numérique de la carte NDBI, selon les valeurs théoriques présentées plus haut (tableau 3.4, chapitre méthodologique 01), est incapable de séparer la zone urbaine des sols nus -malgré sa validité dans plusieurs région du monde). Ceci est en raison que ces deux types de surface, ont des caractéristiques spectrales très proches, et un comportement spectral similaire sur toutes les bandes (figure 3.13), dont les capteurs de moyenne résolution sont incapables de les distinguer.

Pour surmonter ce problème, les données spatiales des images satellitaires de haute résolution ont été utilisées. Ces données de référence fournées par le logiciel "Sas Planet" (des images géoréférenciées, à usage directe sous ArcMap), afin de corriger manuellement les erreurs prélevées dans la classification initiale. La carte finale d'occupation du sol de territoire de la willaya de Constantine est présentée dans la figure 3.14.

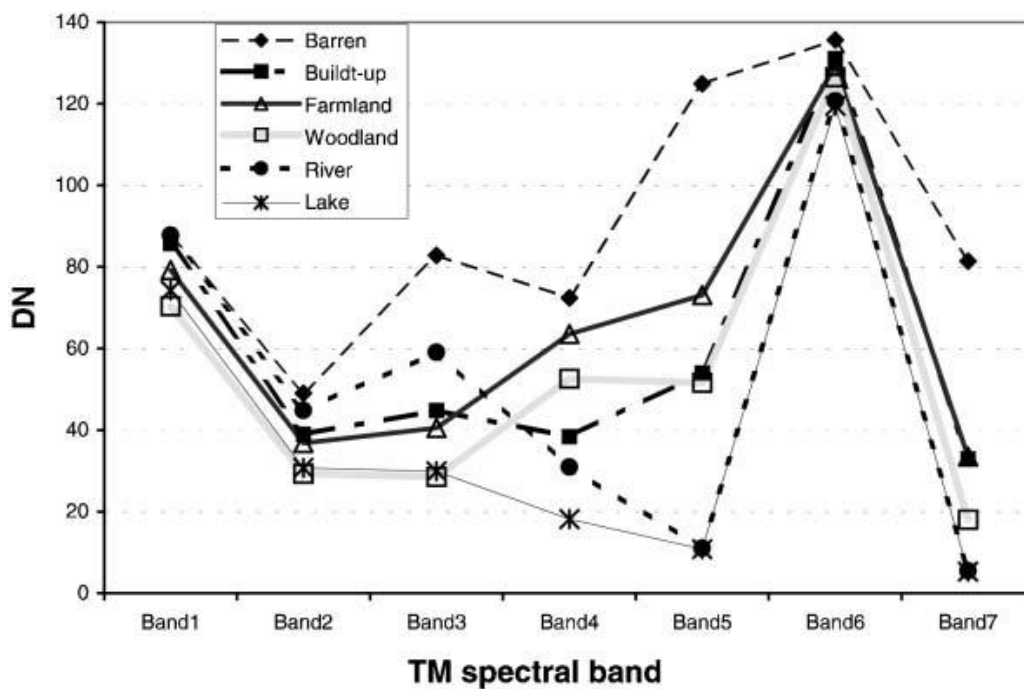


Figure 3.13: Les profils spectrales de six types d'occupation de sol. *Source: (Zha Y., et al., 2013)*

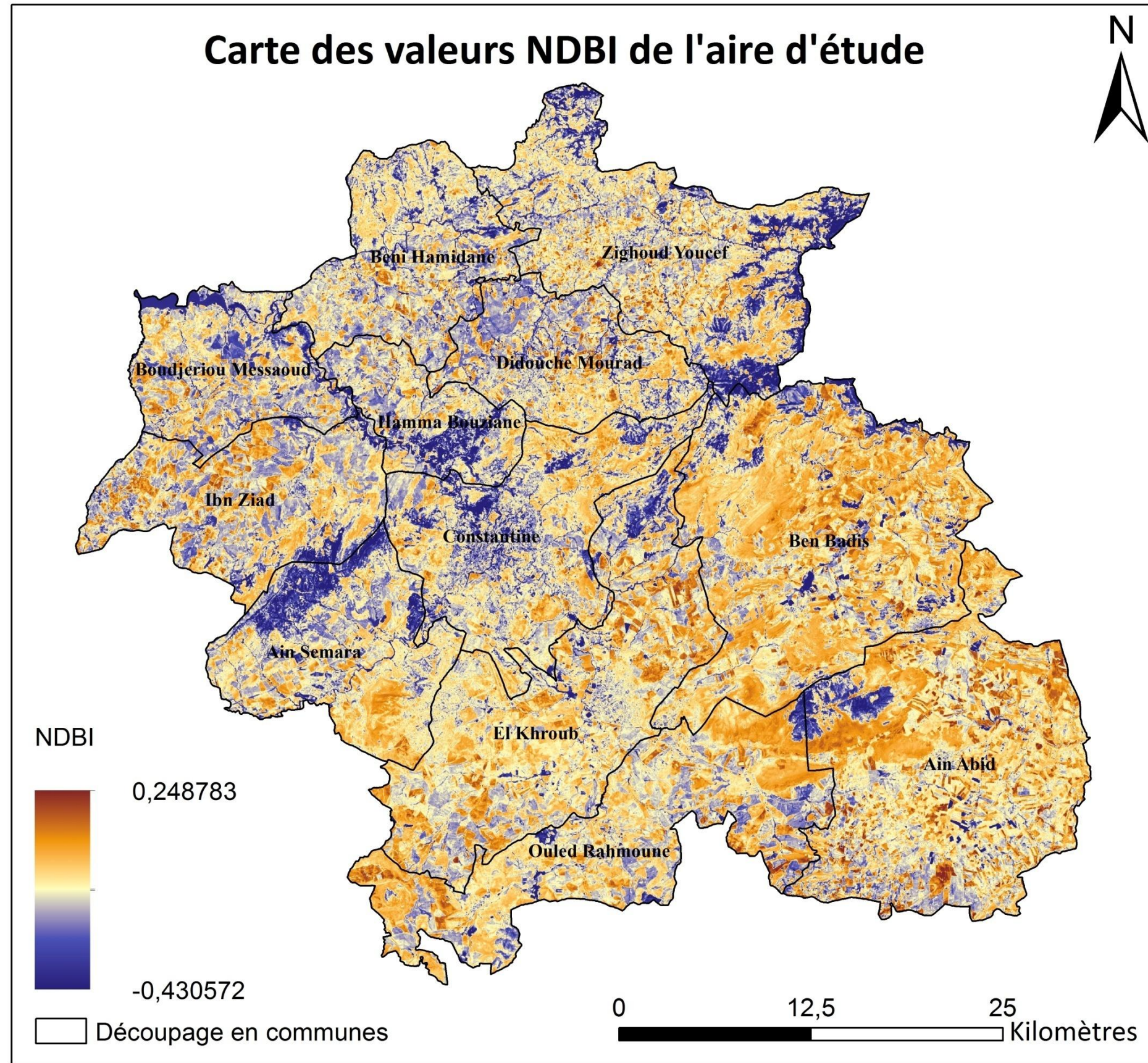


Figure 4.3 : les valeurs NDBI de territoire de la willaya de Constantine -15/07/2015-. **Source :** (Auteur, 2017)

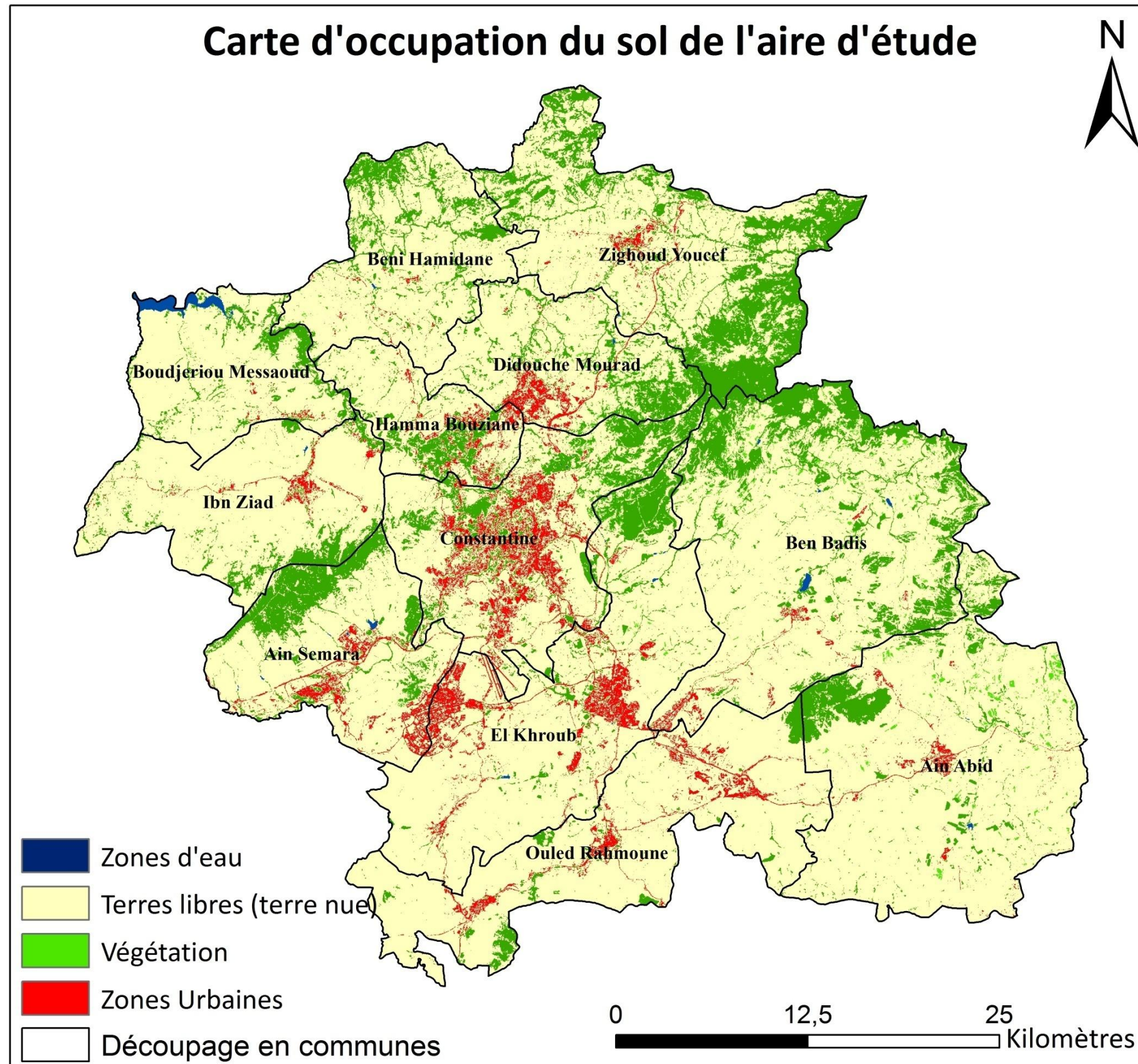


Figure 4.5 : La carte d'occupation du sol de territoire de la willaya de Constantine -15/07/2015-. **Source :** (Auteur, 2017)

3.5.2. Spatialisation de température de surface dans la ville de Constantine :

La carte d'occupation du sol nous a permis d'identifier quatre classes thématiques, jouant un rôle important dans l'analyse de la problématique thermique au sein de la ville de Constantine, par l'analyse de l'énergie ascendante qui est étroitement liée aux différents attributs de surface. La carte LST présentée ci-dessous (figure 3.15) permet de figurer la dynamique thermique de la zone d'étude sur la date de 15 juillet 2015. Les plages de couleurs ont permis de visualiser les différences et les gradients de température au niveau de la ville.

L'interprétation des données de températures qui sont usuellement liées avec les données d'occupation du sol, se fait par l'intégration de ces variables dans le système d'information géographique. La comparaison entre la carte de distribution spatiale du LST avec la carte des différents attributs biophysiques permet de mettre en correspondance les gradients de température avec les types d'occupation du sol. Les valeurs obtenues des bandes thermiques TIRS montrent que :

- Les plages de température maximales se localisent principalement dans la cible des "terrains nus". Ces espaces de banlieue (en périphérie par rapport à la zone urbaine) enregistrent des températures de surface de l'ordre de 37°C à 45°C.
- Un îlot de fraîcheur pourrait être visualisé sur l'image, sa configuration est liée à la répartition du bâti dans la zone d'étude. La surface urbaine enregistre environ 34°C à 37°C, c-à-d avec une différence de température d'environ de 0°C à 11°C inférieure par rapport à la périphérie.
- Des contrastes thermiques significatifs entre les zones où prédomine une couverture végétale importante ou de l'eau et les zones avoisinantes (urbain, terre nue). Des températures plus agréables (îlot de fraîcheur) de l'ordre de 26 à 32°C ont été constatées sur ces zones et un écart thermique de 2°C à 11°C entre ces typologies de surface et les zones urbaines.

Pour analyser et explorer le lien entre les variations de la distribution spatiale de température de surface, associées aux différents types d'occupation du sol, une approche quantitative a été utilisée, consiste à effectuer des plans de coupes (figure 3.16) qui traversent la ville de Constantine (de l'extrémité Est à l'extrémité Ouest, du Nord vers le Sud...). Les profils spatiaux LST, NDVI, NDBI sont illustrés dans les figures (3.17, 3.18, 3.19, 3.20).

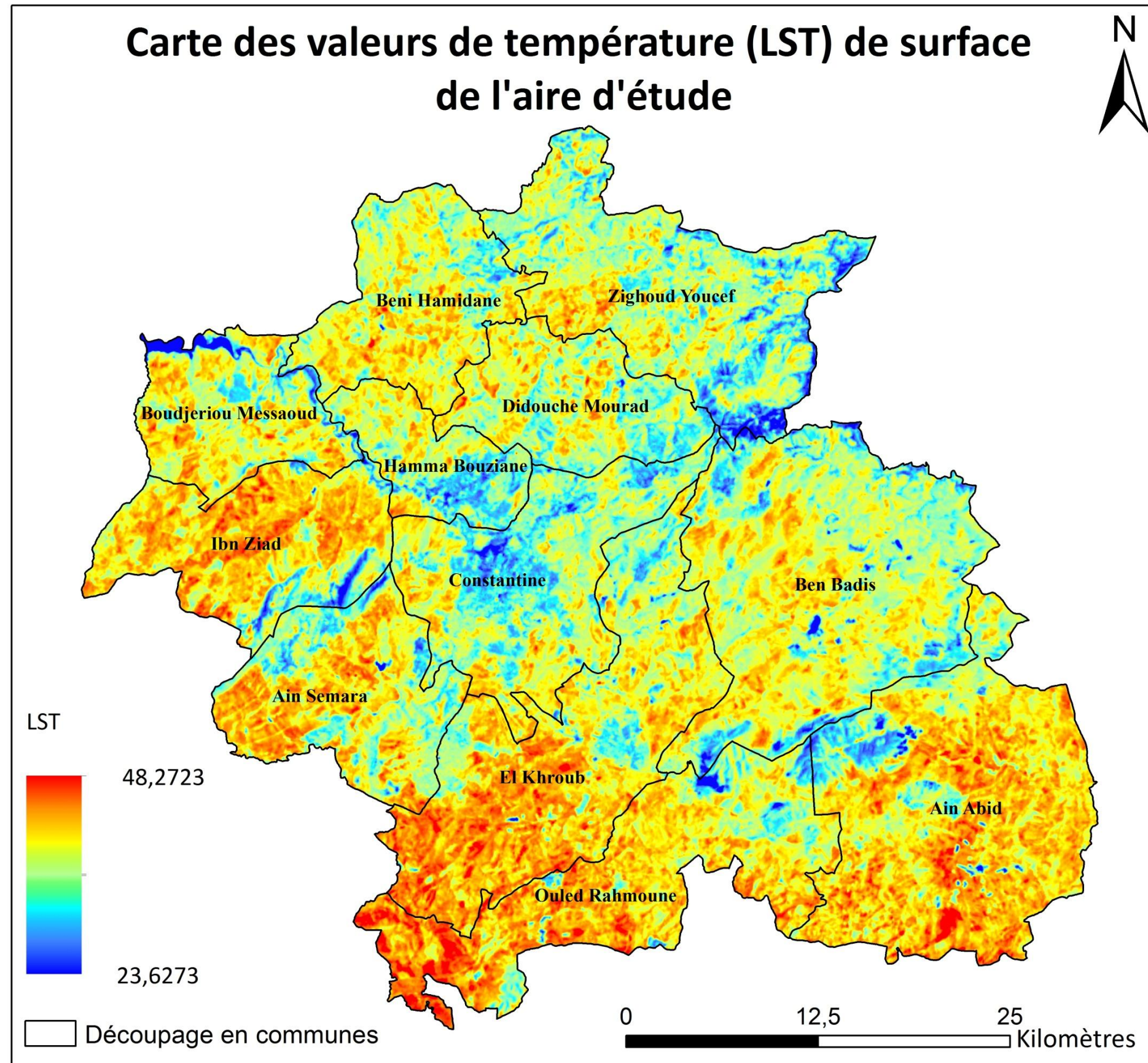
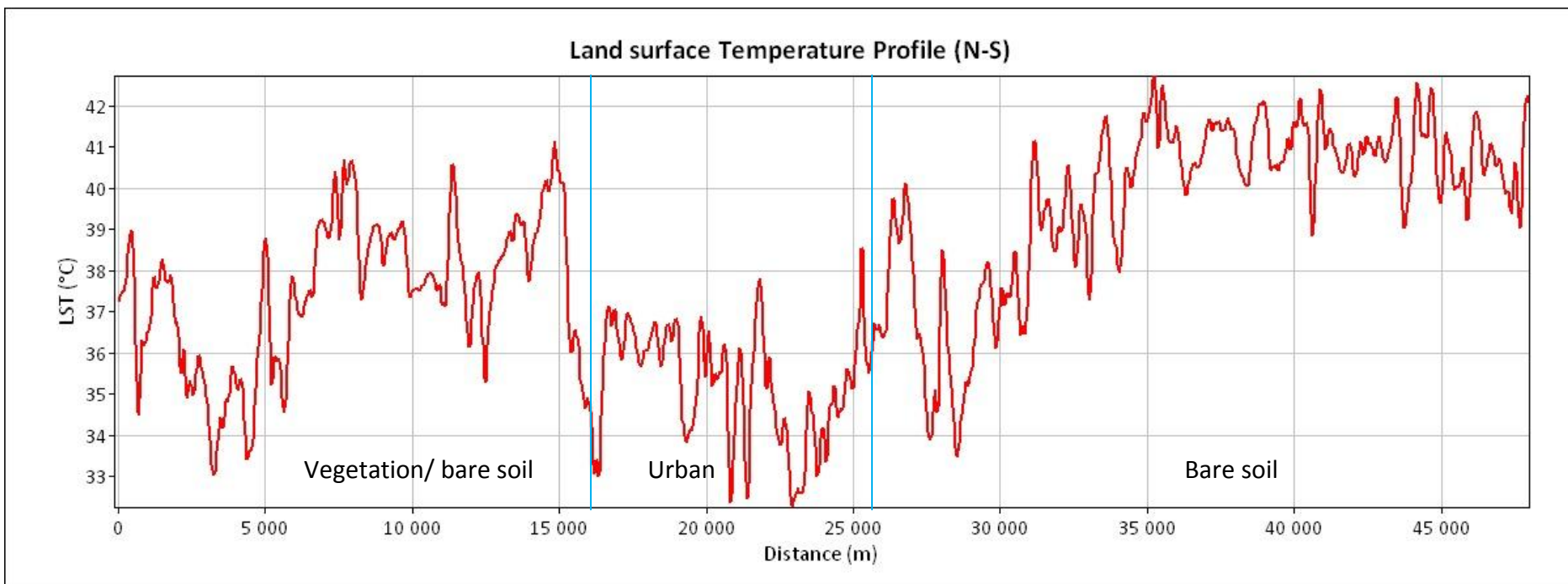
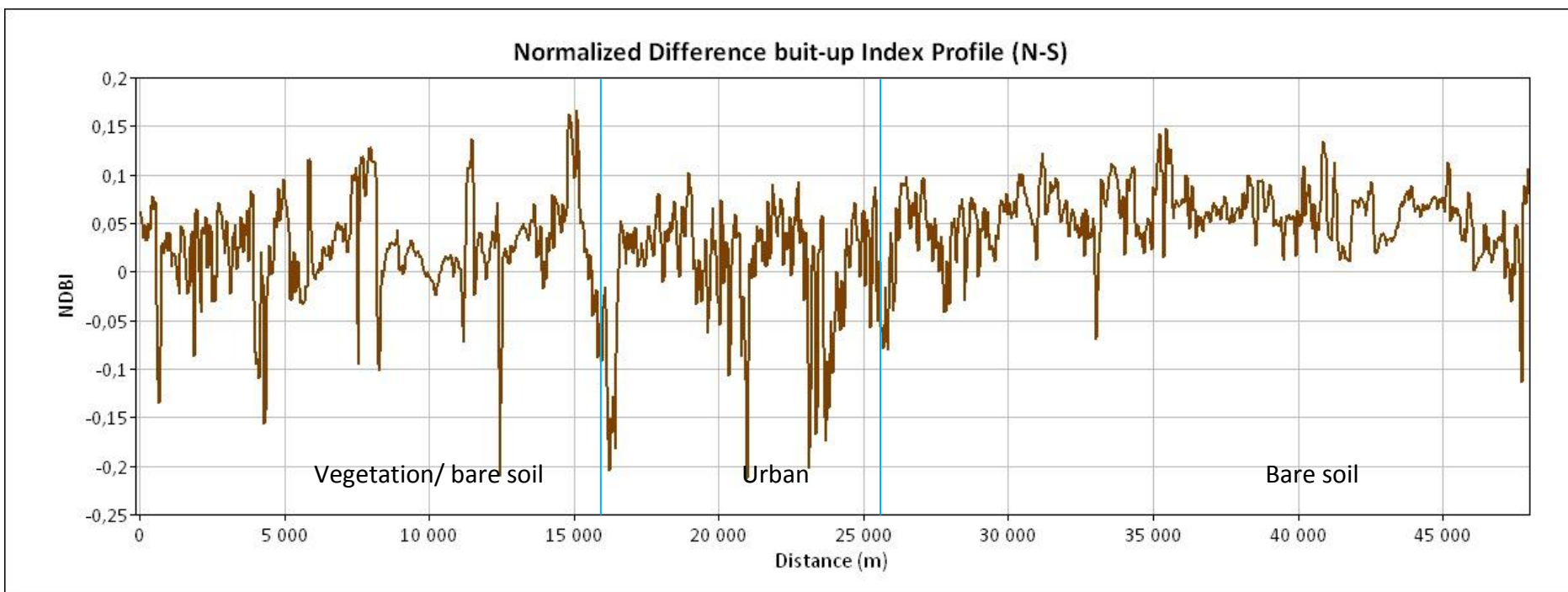


Figure 4.6 : Carte thermique de Constantine pour le mois de juillet, en degrés Celsius. -15/07/2015-. **Source :** Source : (Auteur, 2017)

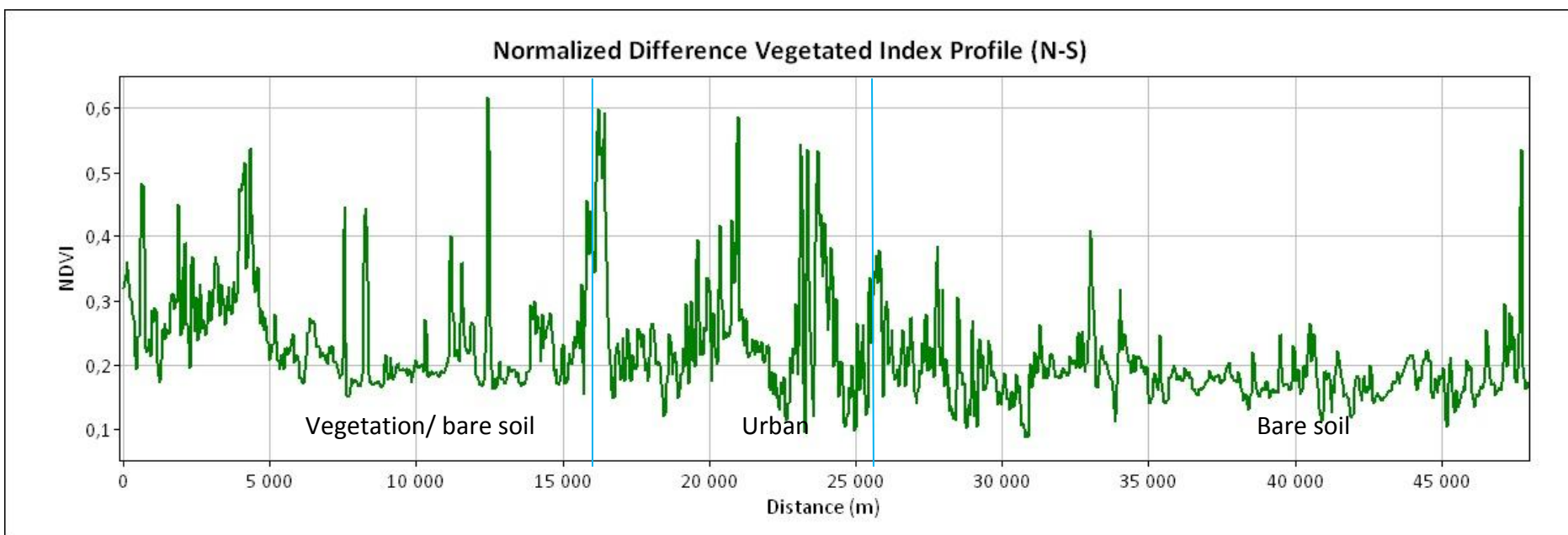
Direction Nord-Sud :



(A)



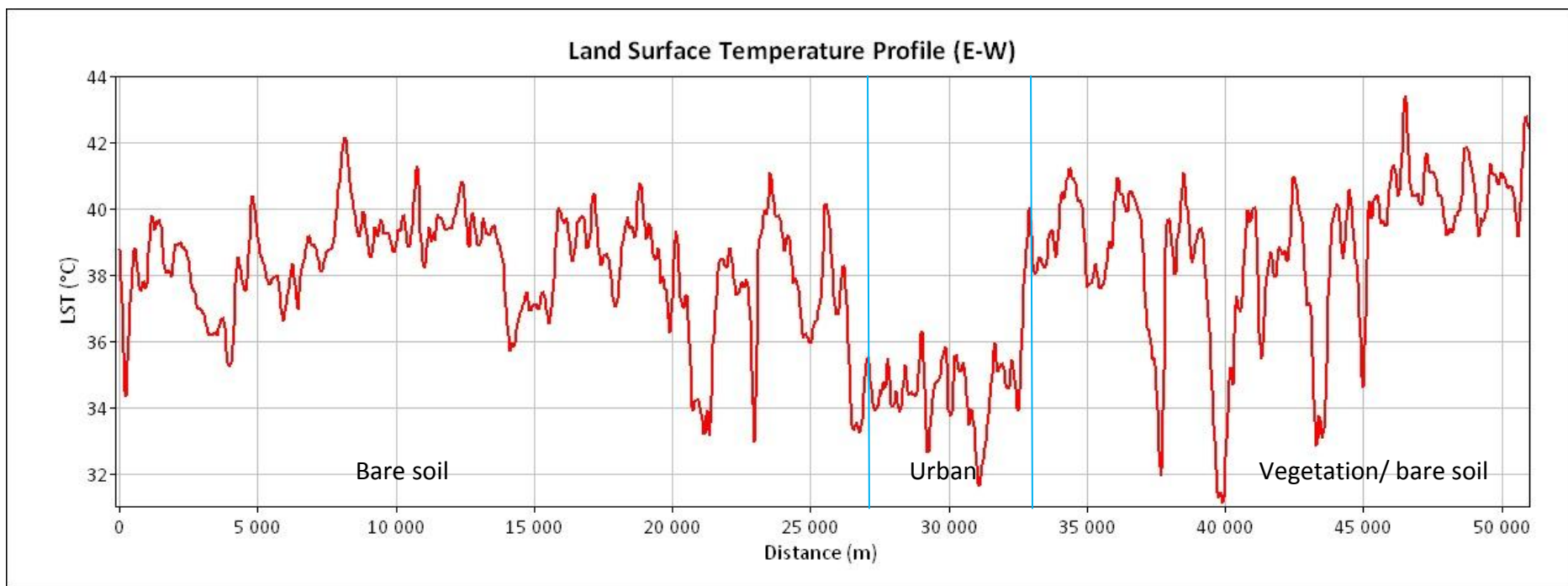
(B)



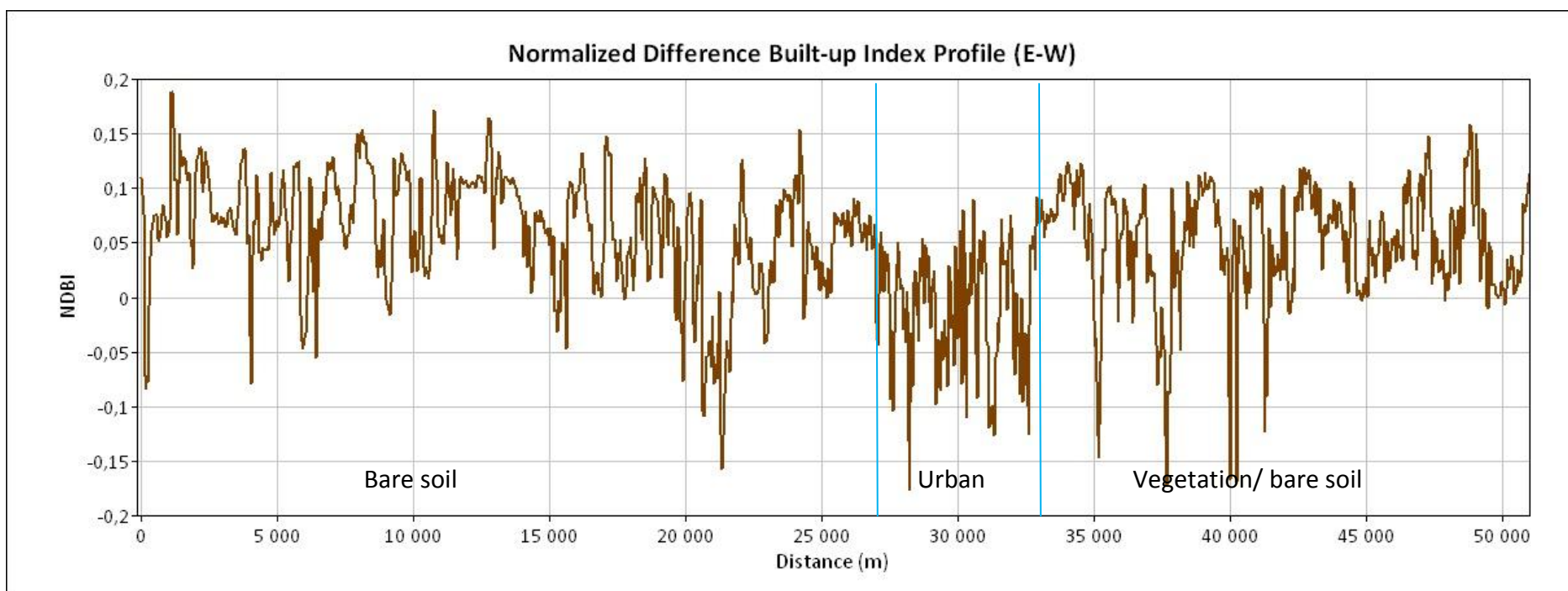
(C)

Figure 3.17 : (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Nord-Sud, 15/07/2015. Source : (Auteur, 2017)

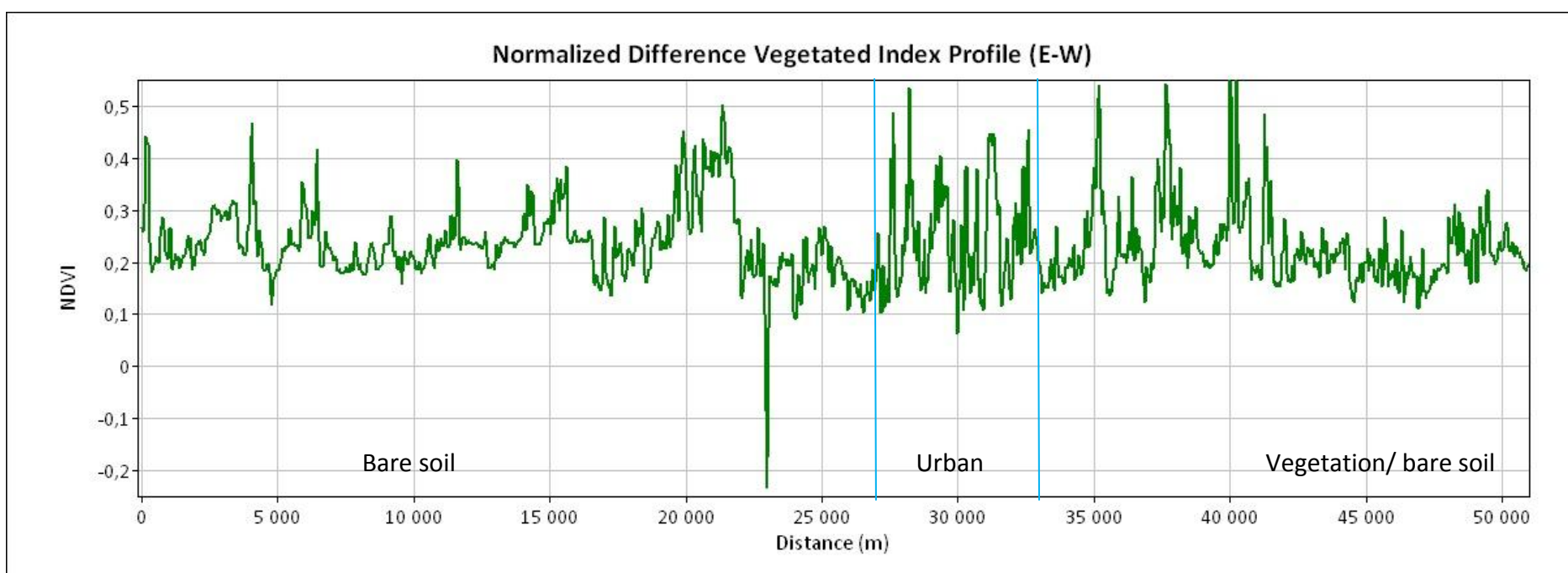
Direction Est-Ouest :



(A)



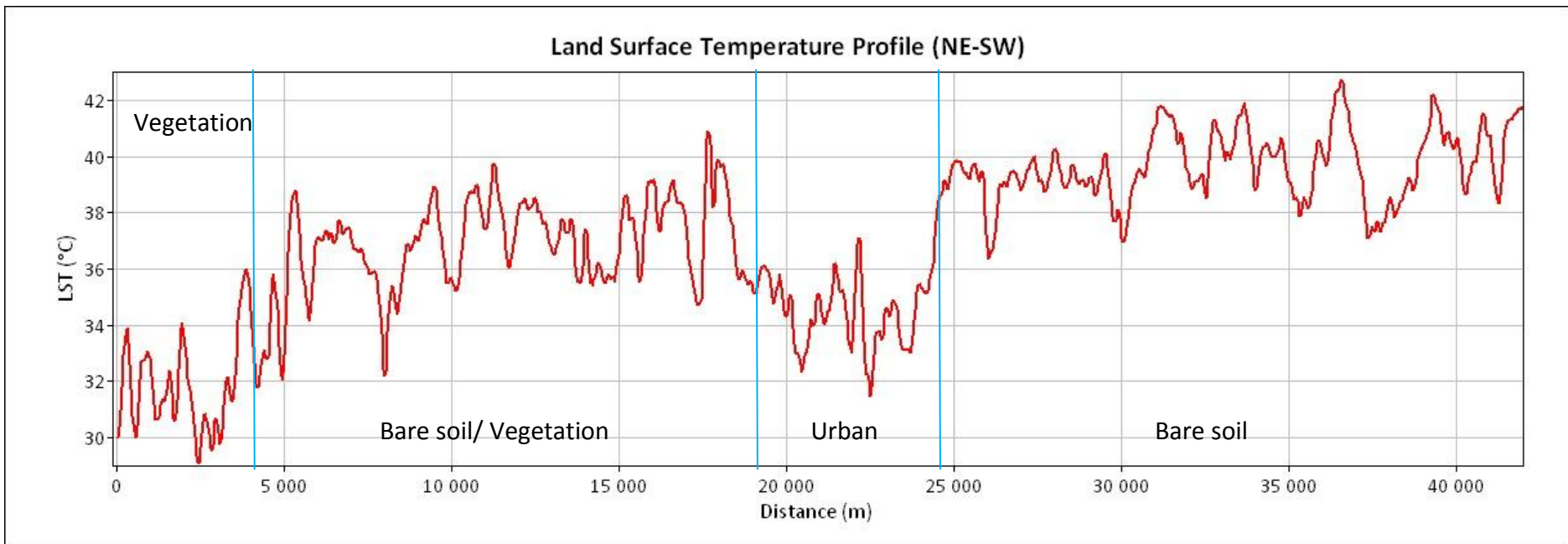
(B)



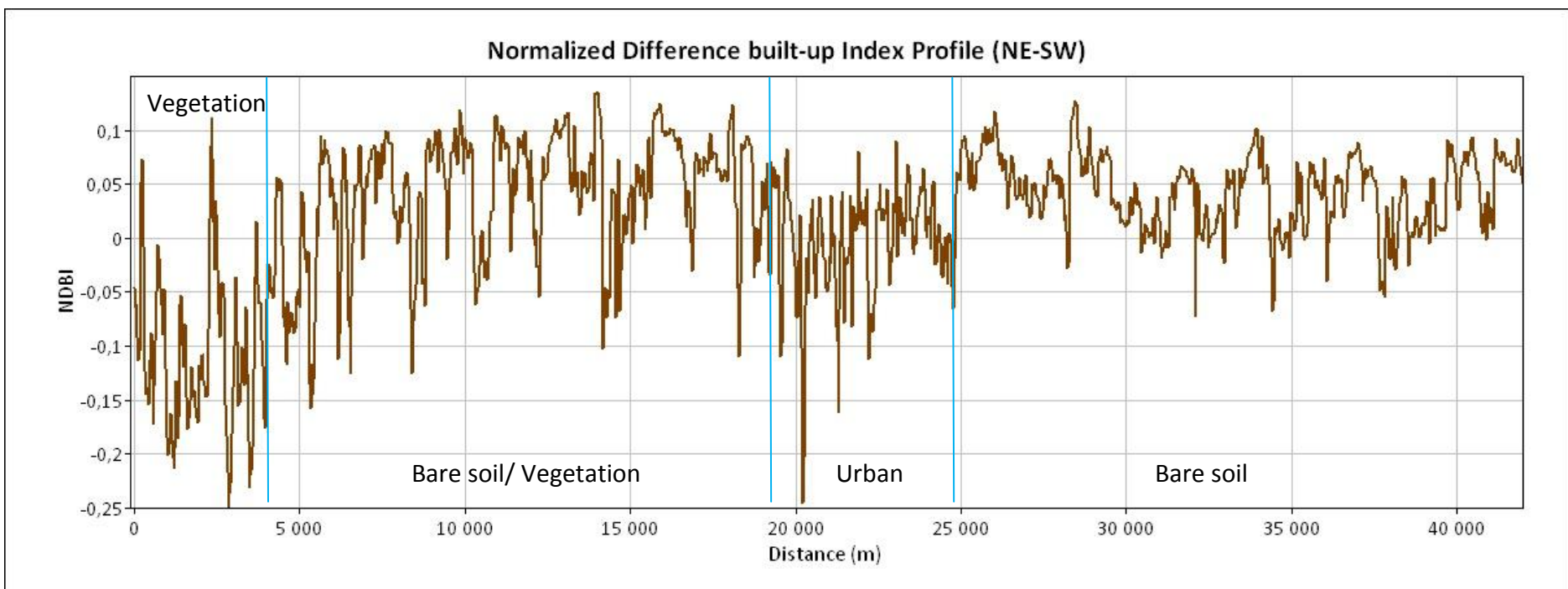
(C)

Figure 3.18 : (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Est-Ouest, 15/07/2015. Source : (Auteur, 2017)

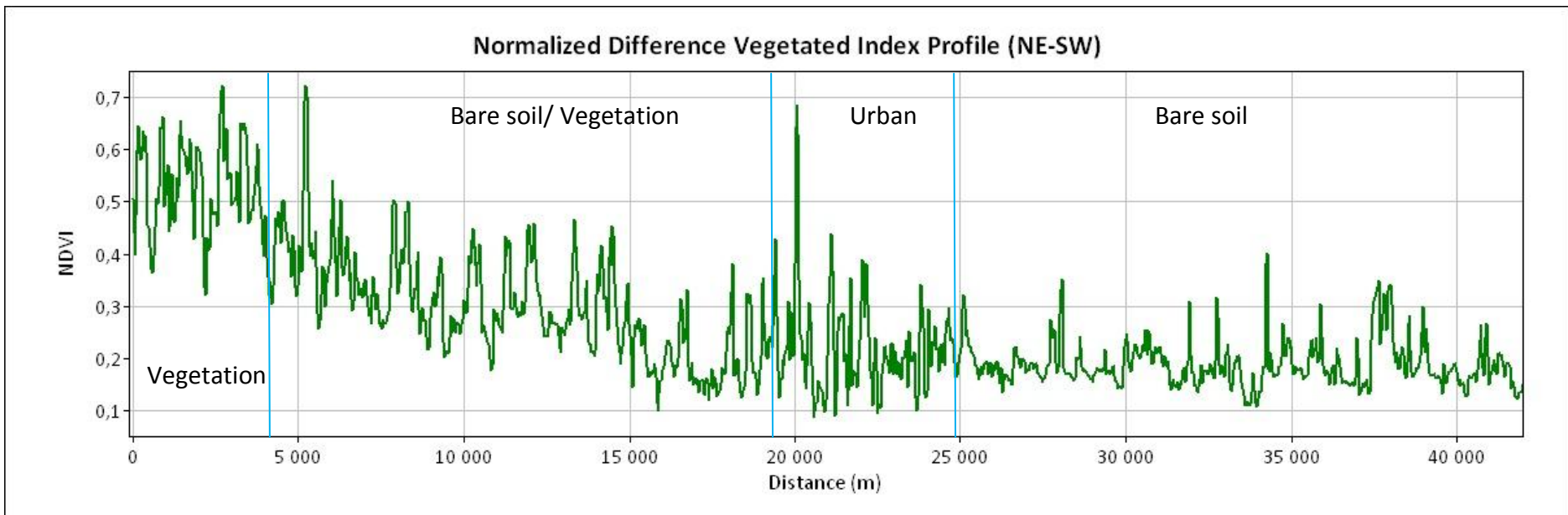
Direction Nord Est- Sud Ouest :



(A)



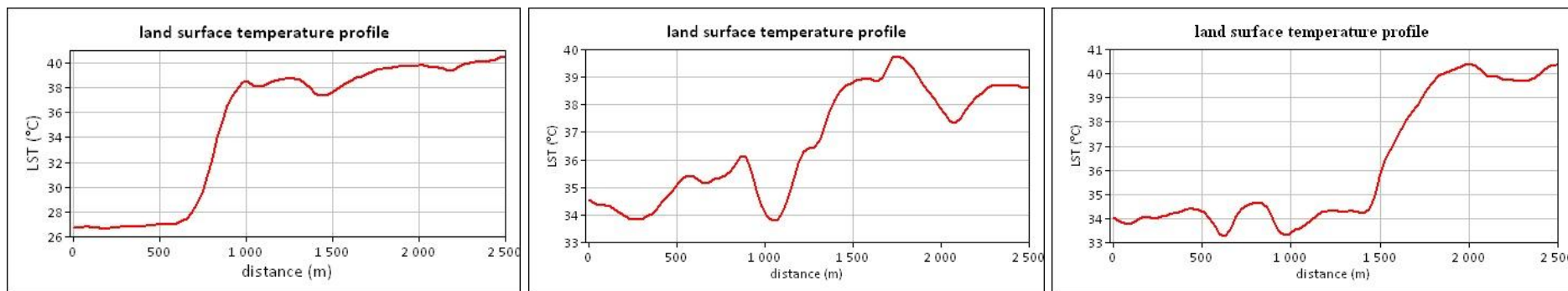
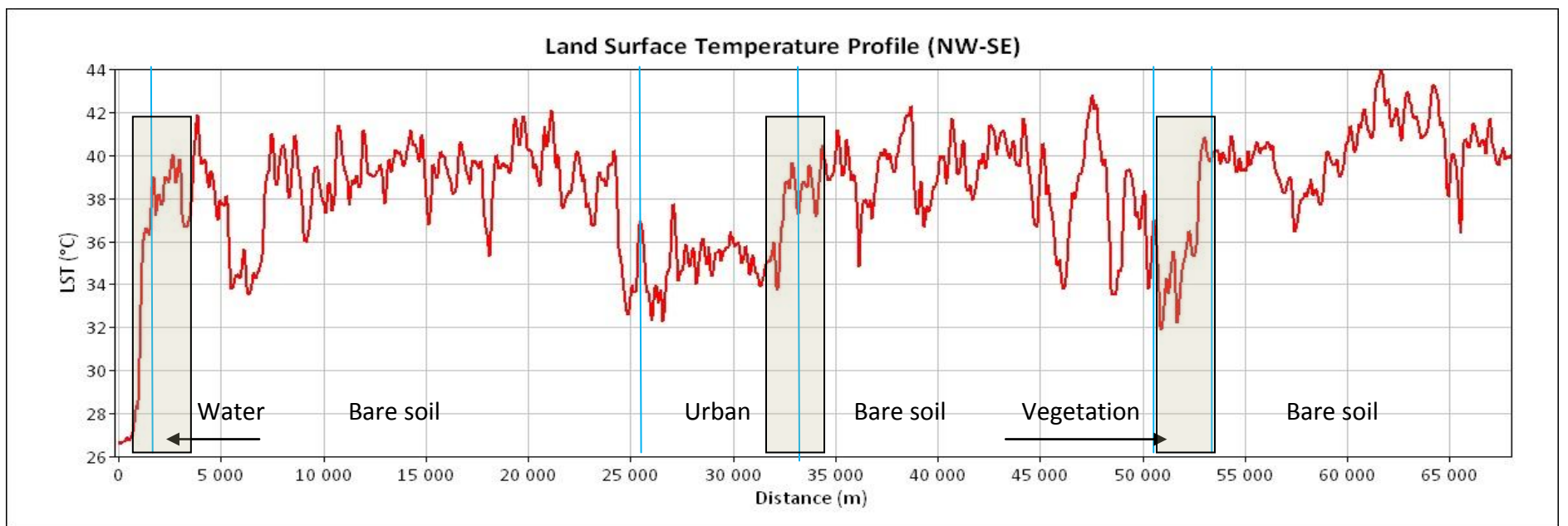
(B)



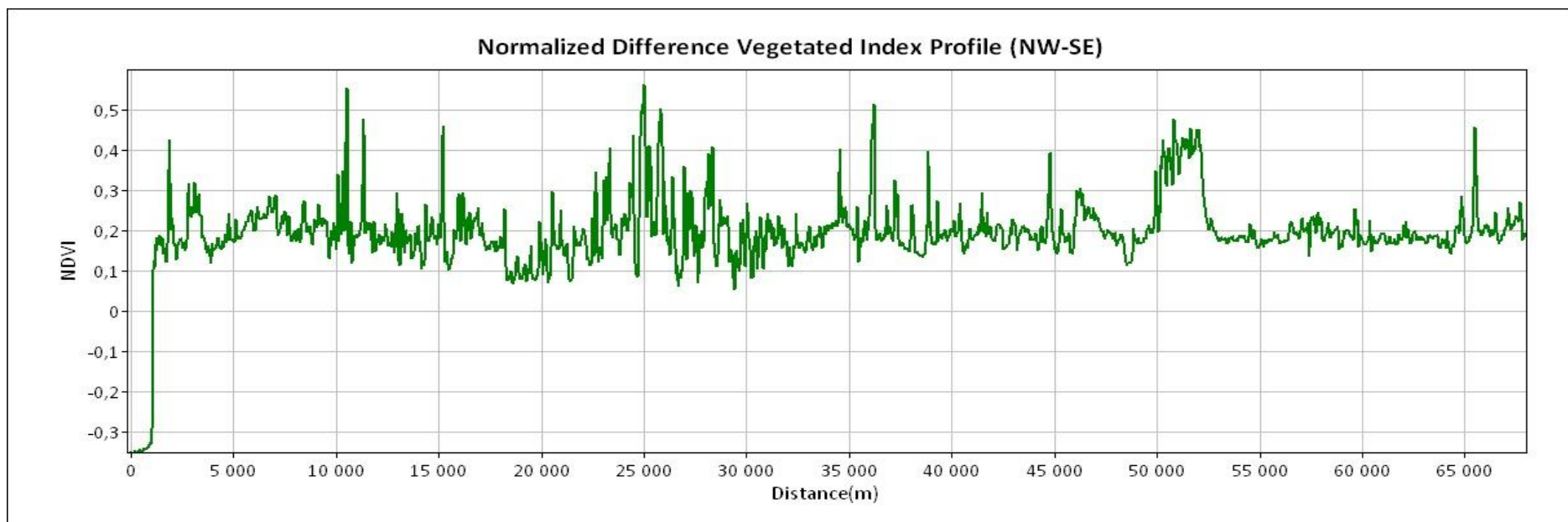
(C)

Figure 3.19 : (A) profile de température de surface LST, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Nord Est-Sud Ouest, 15/07/2015. Source : (Auteur, 2017)

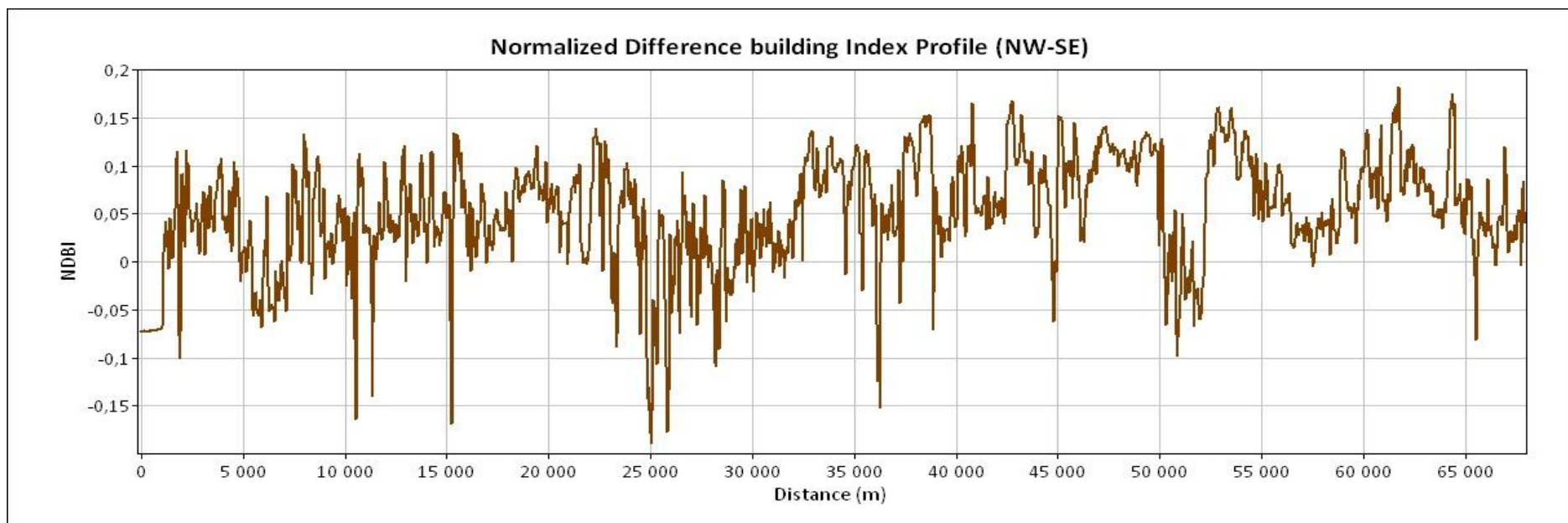
Direction Nord Ouest - Sud Est :



(A)



(B)



(C)

Figure 3.20 : (A) les profiles de température de surface LST, en détaillant trois échantillons représentant les différents types d'occupation du sol, (B) profile de l'indice de végétation (NDVI), (C) profile de l'indice de bâti (NDBI), direction Nord Ouest -Sud Est, 15/07/2015. Source : (Auteur, 2017).

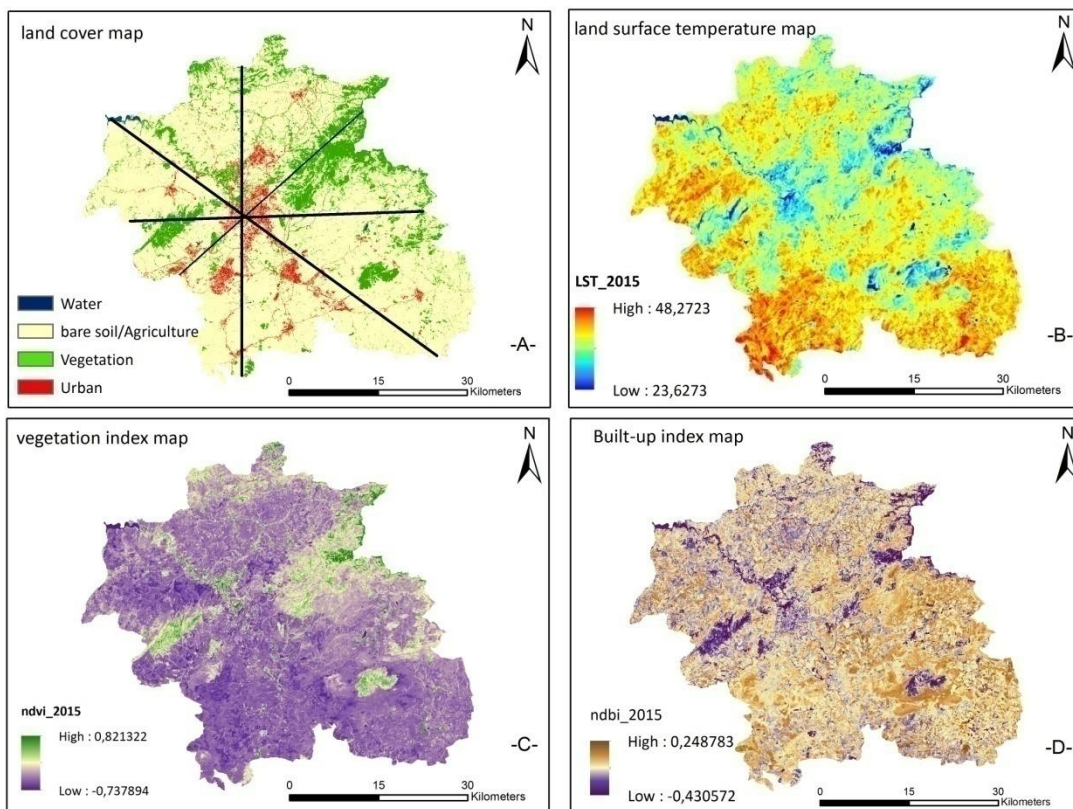


Figure 3.16 : (A) carte d'occupation du sol avec les plans de coupes effectués, (B) la carte LST, (C) la carte NDVI, (D) : la carte NDBI. -15/07/2015. *Source : (auteur, 2017)*

3.5.3. Relation entre la température de surface et l'occupation du sol :

Comme le montre les simulations réalisées avec GIS, les courbes de tendances des profils spatiales LST, NDVI, NDBI ont identifié clairement l'effet d'ICU. Les zones les plus fraîches (valeurs LST faibles) sont bien celle où la végétation/ l'eau est omniprésente. A l'inverse, le pic est associé aux zones d'un NDBI élevé (un large gradient de température surtout sur les surfaces de terrains nus). Donc :

- LST est inversement corrélé avec l'indice de végétation normalisé. Les régions où domine le végétal, surtout lorsque le NDVI est supérieur à un certain niveau ($NDVI \geq 0,2$), les températures ont une tendance décroissante évidente. Ceci est attribué principalement à l'aptitude de végétation à modérer la température par le phénomène d'évapotranspiration qui permet de rafraichir l'air (libérer facilement la chaleur stockée par la transpiration de la canopée). Les résultats de (Chen X.-L., et al., 2006; Kumar K.S., et al., 2012; Lo C.P., et al., 1997) sont dans la même ligne. Sur cette base l'équation de régression LST- NDVI a été établie (figure 3.21).

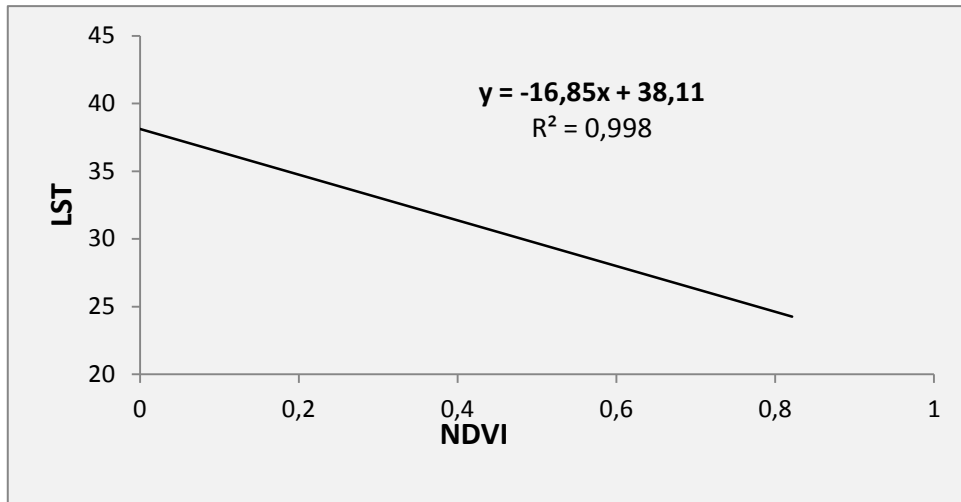


Figure 3.21: relation entre LST et NDVI. *Source : (auteur, 2017)*

- En outre, les valeurs de température extraite et qui correspondent à la cible ‘‘eau’’ d’occupation du sol (valeurs négatives du NDVI, les profils dans la direction Nord-Ouest, Sud-Est) montrent que LST est inversement corrélé avec l’eau. Cette dernière est aussi un modérateur de climat par phénomène d’évaporation (l’augmentation de l’humidité de l’air). Le travail de (Chen X.-L., et al., 2006) a confirmé cette appréciation.
- Par ailleurs, les profils ci-dessus ainsi que le schéma de la figure 3.22 ont indiqué qu’il existe une corrélation linéaire positive entre LST et l’indice de bâti, où une couverture NDBI plus élevé est associée à une température LST élevée aussi. (Chen X.-L., et al., 2006) ont obtenu les mêmes résultats, sud de la Chine.

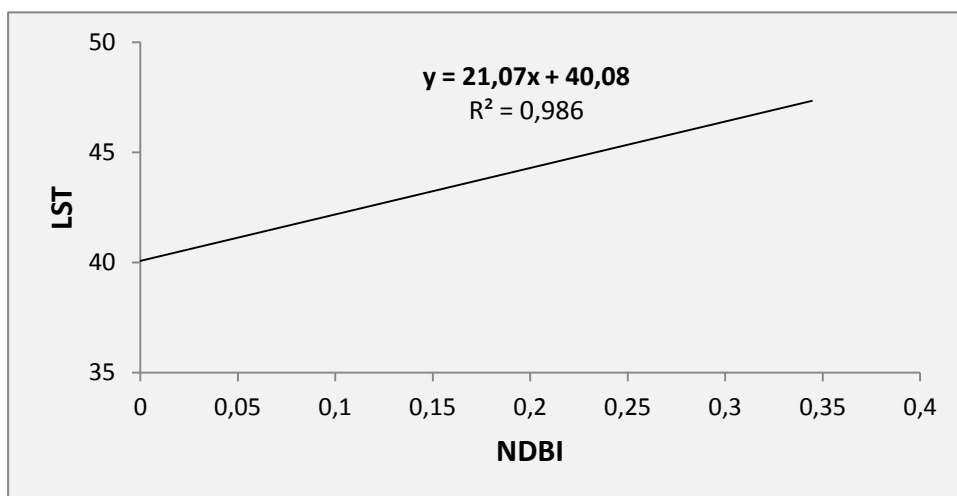


Figure 3.22: Relation entre LST et NDBI. *Source : (auteur, 2017)*

Le NDBI regroupe à la fois les zones urbaines et les terrains nus (à cause de leur proximité spectrale), cependant, d'après cette analyse, on peut constater que la différence urbain-banlieue (terrain nue) est négative (îlot de fraîcheur). Ceci s'explique par:

- D'abord, les conditions d'humidité du sol. On a mentionné dans le chapitre 01 que l'effusivité thermique c-à-d la capacité d'un matériau à accumuler et à dégager de l'énergie thermique dépend de la disponibilité de l'humidité dans le sol, et qu'un sol humide est plus effusif (et plus émissif). A Constantine, le sol nu et sec - affecté par le climat semi aride - a une température LST plus élevée, en raison de la capacité thermique relativement faible due à la faible teneur en eau. Cela signifie que *“l'énergie stocké est facilement dissipée en chaleur sensible”*. Ce comportement thermique des terrains nus est similaire à celui des surfaces urbaines.
- Par ailleurs, selon (Fernando H.J., 2012) l'interprétation des données de télédétection est souvent limitée à des moments précis (prescrit par l'heure du passage du satellite). A Constantine, l'heure de prise de vue est à 10h matin. Les températures acquise le matin sont moins élevées que celle acquise quand le soleil est à son zénith. A 10h le rayonnement solaire est incliné et beaucoup de surface urbaine restent à l'ombre par rapport aux terrains nus.
- Enfin, du fait du phénomène de rosée observé en fin de nuit, les zones urbaines (moins ventilées) gardent un taux d'humidité relativement élevé que la campagne environnante.

3.6. Conclusion :

En réponse à l'hypothèse citée plus haut, les dynamiques thermiques à Constantine et leurs relations avec les différents types d'occupation du sol sont étudiés. Au niveau de ce chapitre, les résultats obtenus suite à une investigation réalisée par le biais des informations issues des images satellitaires sont rapportés.

Les données Landsat 8 OLI/TIRS (de 15 Juillet 2015) ont permis de produire une cartographie d'occupation du sol de la ville, hiérarchisée en quatre typologies à savoir : la végétation, l'urbain, l'eau et les terrains nus, et une carte de spatialisation de température. Un premier constat est que LST (température de surface) au sein de la ville est sensible à la variation des types des attributs biophysiques de surface. L'étude quantitative effectuée,

par le biais des simulations GIS entre LST, NDVI et NDBI, a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Une corrélation négative entre la présence de la végétation, l'eau et la température de surface. Cela permet d'identifier ces deux facteurs comme des stratégies pertinentes pour lutter contre le réchauffement local.
- une corrélation positive entre les zones urbanisées et la température de surface.

A travers Constantine, l'arrière plan climatique (site rural) –à partir duquel la magnitude des écarts de température est habituellement calculée- montre différentes catégories d'occupation du sol, ce qui donne lieu à de multiples interprétations méthodologiques de $\Delta T_{(u-r)}$. Au moins deux contextes principaux, sont mis en évidence :

- Le milieu urbain par rapport à un environnement rural présenté par la végétation.
- Le milieu urbain par rapport à ses alentours des terres dénudées.
- Un troisième contexte "zones d'eau" qui n'a pas été retenu, car sa surface n'est pas importante par rapport aux autres catégories.

Les estimations de $\Delta T_{(u-r)}$ résultantes sont complètement différentes, un écart de température positif (îlot de chaleur) varie entre 2 et 7°C est constaté dans le premier cas, A l'inverse, le deuxième cas montre une différence de température négative de 0 à 11°C (Ilot de fraîcheur). Ces dissimilitudes dans les résultats obtenus à travers la ville, minent la validité des comparaisons avec d'autres études observationnelles.

Ce travail donne un regard général sur les caractéristiques spatiales du champ thermique à l'échelle de territoire de Constantine. Il permet de mettre en évidence les principales mesures d'atténuation d'ICU, s'agissant de l'augmentation des surfaces végétalisées et les surfaces d'eau, ainsi que la diminution de la minéralisation des espaces. Cependant, cette investigation ne permet pas de fournir des renseignements au niveau scalaire qui intéresse les aménageurs '*le Local*', ce sont les altérations climatiques à cette échelle qu'on doit chercher à informer si on veut mettre en place des stratégies d'adaptation de la ville à l'ICU, car ce phénomène est extrêmement local.

Quatrième chapitre :
Application de la classification climatique
“Zone Climatique Locale” à Constantine

4.19.Introduction :

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'application du schéma de classification LCZ à Constantine. Le chapitre se construit en deux axes :

- La délimitation des zones climatiques locales de l'aire de travail et,
- L'analyse du comportement thermique des classes résultantes.

S'agissant du premier axe d'étude, la recherche décrivera la méthode de construction des différentes catégories LCZ, ainsi que le recueil des divers indicateurs physiques, en s'inspirant du cadre de travail proposé par Stewart I.D. et Oke T.R. (2012). Pour le deuxième axe, l'étude examinera les réactions climatiques thermiques des différentes zones. Pour cette optique, une méthodologie basée sur une combinaison entre l'utilisation des images satellitaires landsat, et les mesures embarquées, sera mise en exergue.

4.20.La délimitation des zones climatiques locales

4.20.1.La zone d'étude

Le domaine d'étude retenu dans le cadre de ce travail, pour la mise en pratique du système de classification LCZ, ne couvre que quelques quartiers de l'agglomération de Constantine, il s'agit de la zone illustrée dans la figure 4.1. Les coordonnées de l'étendu sont représentées dans le tableau 4.1. Le choix du site est dû au fait que cet espace se caractérise par un mélange varié de bâtiments représentant différentes périodes historiques de développement urbain (centre historique, immeubles résidentiels...etc)

Tableau 4.1: Coordonnées de l'étendue de travail. *Source : (Auteur, 2017)*

Longitude min	6.35 E
Longitude max	6.37 E
latitude min	36.20 N
latitude max	36.22 N

4.20.2.la classification en zones climatiques locales :

Selon (Stewart I.D., Oke T.R., 2012) les utilisateurs doivent suivre un processus en trois étapes dans la classification de leurs sites en LCZ.

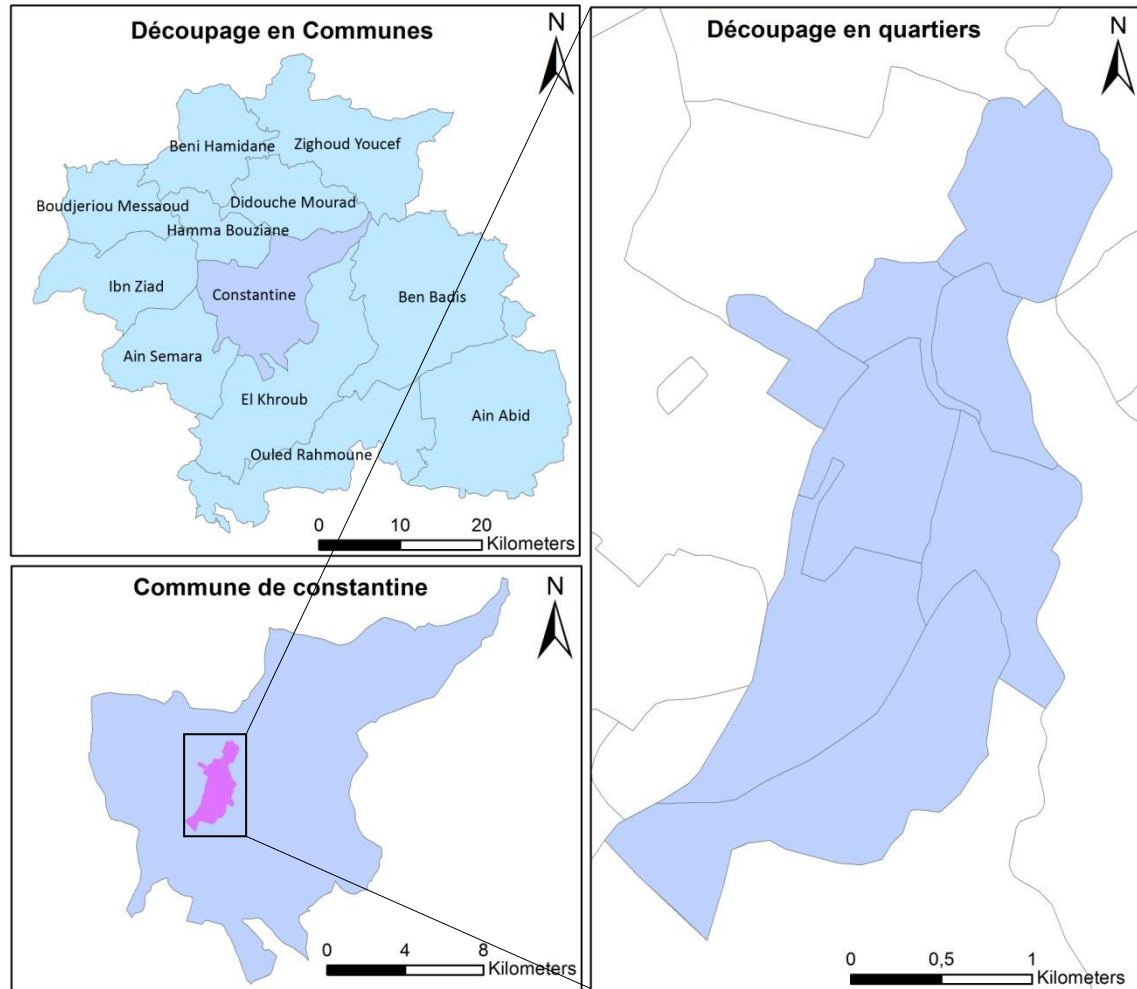


Figure 4.1 : Localisation de la zone d'étude. *Source : (Auteur, 2017)*

4.20.2.1. Collecte des métadonnées :

*Les métadonnées réfèrent à l'état du contexte d'un site de mesure particulier*⁷². Stewart I.D. (2011b) dans son travail d'évaluation de la littérature moderne d'ICU, a noté que 75% des investigateurs ne parviennent pas à fournir *les métadonnées quantitatives* des propriétés de surface, nécessaires pour définir la magnitude d'ICU, ce qui rend difficile l'interprétation fiable de cette anomalie. Pour combler cette lacune, il a retenu dix indicateurs physiques quantifiables (Tableau 4.2), décrit -dans la littérature- comme déterminants dans la genèse de l'ICU, liés à la morphologie urbaine, la couverture urbaine, le tissu urbain et le métabolisme urbain. La première étape consiste à opérer un calcul théorique de ces indicateurs au niveau de la zone source (étape 02) de chaque LCZ.

⁷² N.G.R, Perera., et al.,. (2013). *Projected urban development, changing "Local Climate Zones" and relative warming effects in Colombo, Sri Lanka*. In International Conference on "Cities, People and Places"-ICCP-2013.

Tab 4.2 : les indicateurs urbains groupés par domaine d'intervention. *Source* : (Stewart I.D., Oke T.R., 2012)

Domaine d'intervention des indicateurs Urbains	Indicateurs urbains
Morphologie urbaine	- Facteur de Vue du Ciel - Rapport d'Aspect - Hauteur moyenne des bâtiments - Longueur de rugosité effective
Couverture du sol	- Pourcentage de surface bâtie - Pourcentage de surface imperméable - Pourcentage de surface perméable
Matériaux urbains	- Effusivité thermique - Albédo
Métabolisme urbain	- Flux de chaleur anthropique

Dans le cadre de ce travail sept paramètres sur dix (liés à la couverture urbaine et à la morphologie urbaine) sont retenus pour construire les zones climatiques locales. L'albédo de surface, l'admittance et la chaleur anthropique n'ont pas été déterminés en raison du manque des données d'entrées concernant les matériaux urbain et les activités anthropique. (Leconte F., et al., 2015; Thomas G., et al., 2014) ont démontré la possibilité de construire des LCZ en utilisant seulement les sept indicateurs retenus.

Selon (Leconte F., 2014), *La collecte des métadonnées vise à être en mesure de déterminer les dix indicateurs urbains inclus dans la classification LCZ*. Pour ce faire, Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature, y compris les approches utilisant les données de télédétection multi-temporelles, qui sont selon (Alexander P.J., Mills G., 2014) encore en développement, et les méthodes SIG comme celle proposée dans (Unger J., et al., 2014).

(Unger J., et al., 2014) ont pour finalité de proposer un outil SIG permettant le calcul de sept paramètres descripteurs des LCZs. La méthode a été testée à Szeged (Hongrie), basée sur une délimitation des blocs de construction appelées "polygones" et la zone qui lui appartient appelé "zone lot". Les indicateurs physiques sont extraits pour chaque bloc urbain à l'aide de différentes bases de données (Corine land cover, images satellitaires de haute résolution, base de données 3D...). Les zones lots sont par la suite agrégées en groupes pour obtenir les zones climatiques de l'aire d'étude. Selon (Bechtel B., et al.,

2015), cette approche est tout à fait objective, mais exige des données spécifiques qui sont généralement indispensables pour la plupart des villes.

En réponse à l'absence des données spatiales suffisamment détaillées, et la pénurie des informations de base dans le cas de ce travail, d'autres sources alternatives ont été utilisées, y compris les images satellitaires, les cartes topographiques, les tableaux publiés de valeurs de propriétés, les visites sur terrain ...etc.

- ***Calcul des indicateurs de la couverture urbaine :***

Les trois propriétés relatives à la couverture du sol (% de surface bâtie, % de surface imperméable, % de surface perméable) sont spécifiées à partir d'une carte détaillée de la zone d'étude sous format Autocade. La carte permet de mieux identifier les limites de la superficie des parcelles, les contours des bâtiments et des routes...etc.

Le fichier Autocade apparaîtra comme plusieurs couches vectorielles (point, lignes, polygones), est utilisé pour créer des données SIG. D'abord, une structure de classes d'entités est exporté en ArcMap pour convertir les éléments CAO en format "fichier de forme" ou "shapefile" (Shp). Une fois que le fichier est ajouté en ArcMap, et pour qu'il soit affiché dans le bon endroit sur la surface terrestre, il doit être géoréférencé en définissant le système de projection du site (UTM 84 zone 32 Nord).

Les limites des blocs urbains sont vérifiées et modifiées par la suite, en utilisant une image de l'aire d'étude, de haute résolution téléchargée à l'aide du logiciel "Sas Planet" qui est un programme abritant plusieurs application (Google Earth, open street map, bing map...). Il permet de générer des images *géoréférencées* à usage directe sous Arcmap. L'image fournit par Sas planet est aussi utilisée pour localiser manuellement la fraction du surface avec couverture naturelle perméable (sable, végétation...).

En se basant sur l'équation (4.1), on peut déduire les parties du sol imperméable (S_{imp}), tandis que le % de surface bâti (S_b) est déterminé automatiquement dans ArcMap.

$$S_{LCZ} = S_{imp} + S_{per} + S_b \dots\dots\dots(4.1)$$

- ***Calcul des indicateurs de la morphologie urbaine :***

Les méthodes d'obtention du SVF sont représentées dans le chapitre 01. Rappelons les approches s'appuyant sur des algorithmes informatiques comme celui proposé dans

(Chen L., et al., 2012), ce dernier a développé un programme informatique basé sur les SIG vise à calculer les valeurs continues du SVF pour la surface urbaine entière de Hong Kong. La méthode est vérifiée en comparant les résultats SVF issues du logiciel, avec celles observées sur site en utilisant le fish-eye. Ce type d'approche nécessite une base des données 3D de la surface étudiée.

(Debbage N., 2013) a adopté des méthodes optiques et photographiques (fish-eye) pour le calcul du SVF dans quatre morphologies différentes (centre ville, commercial, résidentiel et rural). Dans notre étude, le SVF est estimé en utilisant la méthode géométrique qui s'est basée sur le rapport entre la hauteur et la largeur dans une rue (équations 1.3, 1.4, chapitre 01), ainsi que les valeurs publiées dans les différents travaux (Boucheriba F., 2006 ; Mansouri O., 2008)

Comme dans (Houet T., Pigeon G., 2011), Les classes de rugosité effective aérodynamique sont obtenues par des observations in-situ (description visuelle), à cause de manque d'informations. Les tableaux publiés des valeurs de propriétés comme le 'tableau de classification de Davenport' (Tableau 2.2, chapitre 02), sont aussi utilisés.

Les hauteurs des constructions sont estimées par visite sur terrain ainsi que l'utilisation des photographies du site.

Le dernier critère à calculer est 'l'aspect ratio', il est obtenu en utilisant l'expression proposé dans l'équation 1.5, chapitre 01.

- ***Construction des LCZ:***

La production de la cartographie de distribution des zones climatiques locales du champ d'étude s'est basée sur une segmentation théorique de l'espace. (Stewart I.D., 2011; Stewart I.D., Oke T.R., 2012) ont retenu certains indicateurs liés à la forme urbaine pour aider à définir les différentes catégories (voir figure 2.5 / Chapitre 02) à savoir : la densité des objets, la hauteur des objets, le type de couverture du sol

Trois couches d'informations ont été produites, chacune représente une carte classifiée de l'aire d'étude (selon des valeurs typiques proposées par les inventeurs du système, tableau 4.3), dans un des critères précédents (figure 4.2, 4.3, 4.4). Les LCZs sont obtenues par la superposition des trois couches.

Tableau 4.3: les valeurs typiques proposées pour la classification. *Source: adaptation de (Stewart I.D., Oke T.R., 2011)*

objets	Bâtiment	Végétation
Hauteur	<ul style="list-style-type: none"> - >25m hauteur élevée - 10-20 m hauteur moyenne - <8m hauteur basse - 0m sans hauteur 	<ul style="list-style-type: none"> - >3m arbres - 1-2 m Arbustes - < 1m Herbe - 0m sol
Densité	<ul style="list-style-type: none"> - H/W >1 compacte - H/W <1 ouvert 	<ul style="list-style-type: none"> - H/W >1 compacte - H/W <1 ouvert
Couverture du sol	<ul style="list-style-type: none"> - Imperméable - perméable (végétation basse) - perméable (sols) 	

4.20.2.2. La zone source :

La deuxième étape consiste à choisir –pour chaque LCZ– le site approprié pour l’installation des stations météorologiques, qui servent à déterminer les effets thermiques des propriétés de surface. Selon les lignes directrices de l’organisation mondiale de la météorologie (2008), il faut veiller à la localisation des sites pour que les mesures effectuées soient *représentatives*. (Stewart I.D., Oke T.R., 2010) ont mentionné:

" Les sites sont considérés - représentatifs - seulement si le cercle d'influence environnant, ou la zone source, est relativement uniforme en termes de la couverture de surface, la géométrie et l'activité humaine"

La zone source représente le champ de vision de la sonde, ses dimensions sont difficile à préciser, mais approximativement, “*son diamètre ne dépasse pas quelques centaines de mètres pour des mesures de température à 2m de hauteur*⁷³”. En (Ng Y.X., 2015) une zone source de 200 m de taille a été utilisée pour l’investigation des ICUs au niveau de trois sites à Singapour. La même résolution spatiale a été utilisée par (Nduka I.C., Abdulhamed A.I., 2011) pour tester le système de classification (LCZ) à Onitsha, Nigéria. Dans la même ligne, des cercles d’influences de différentes tailles (500m, 250m, 100m) pour quantifier le comportement climatique à Toulouse, France dans (Houet T., and Pigeon G., 2011).

⁷³ I.D, Stewart., T.R, Oke. (2012). *Local climate zones for urban temperature studies*. Bulletin of the American Meteorological Society 93, 1879–1900.

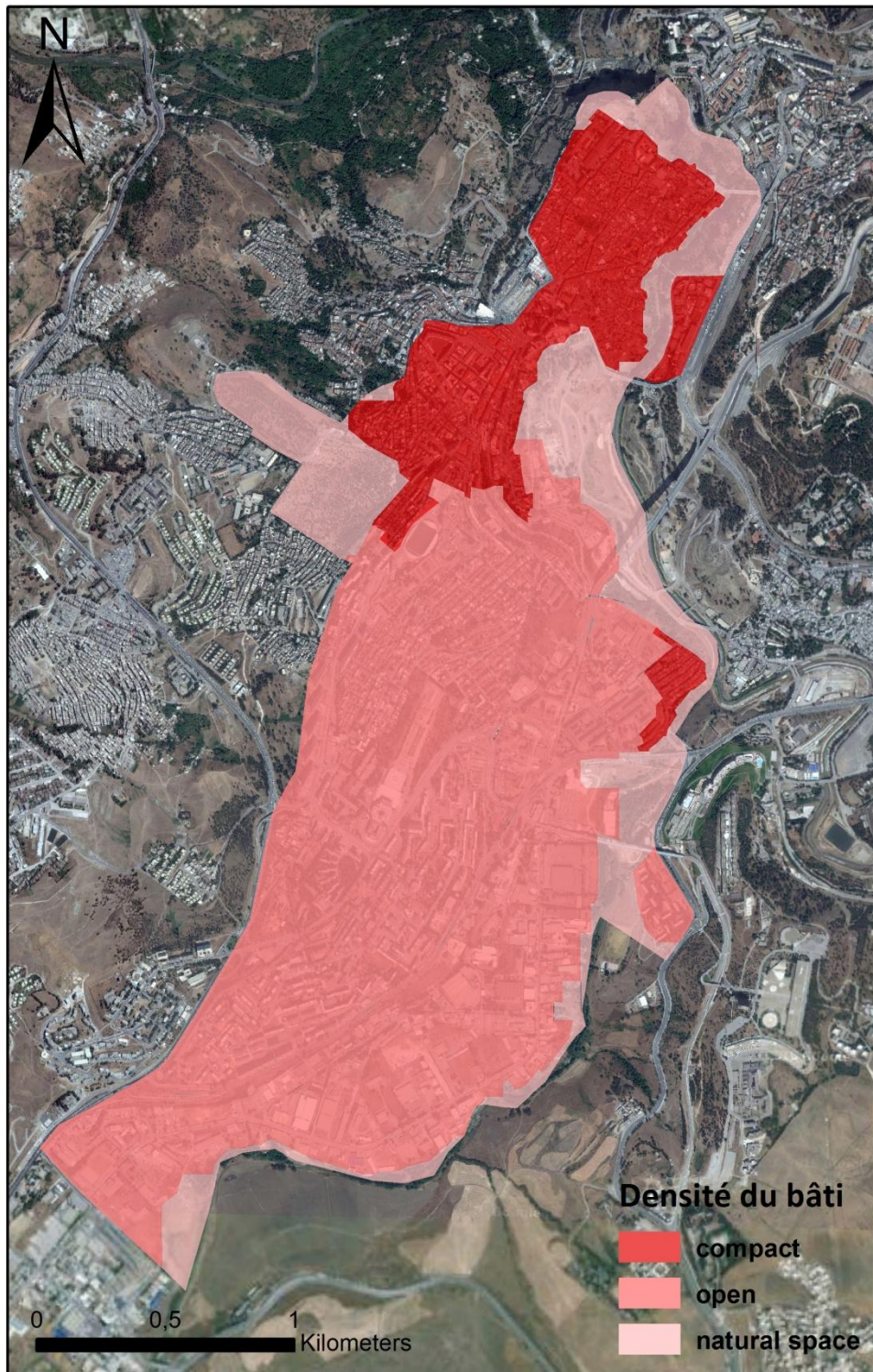


Figure 4.2: classification de la forme urbaine selon la variable densité du bâti. *Source : (Auteur, 2017).*

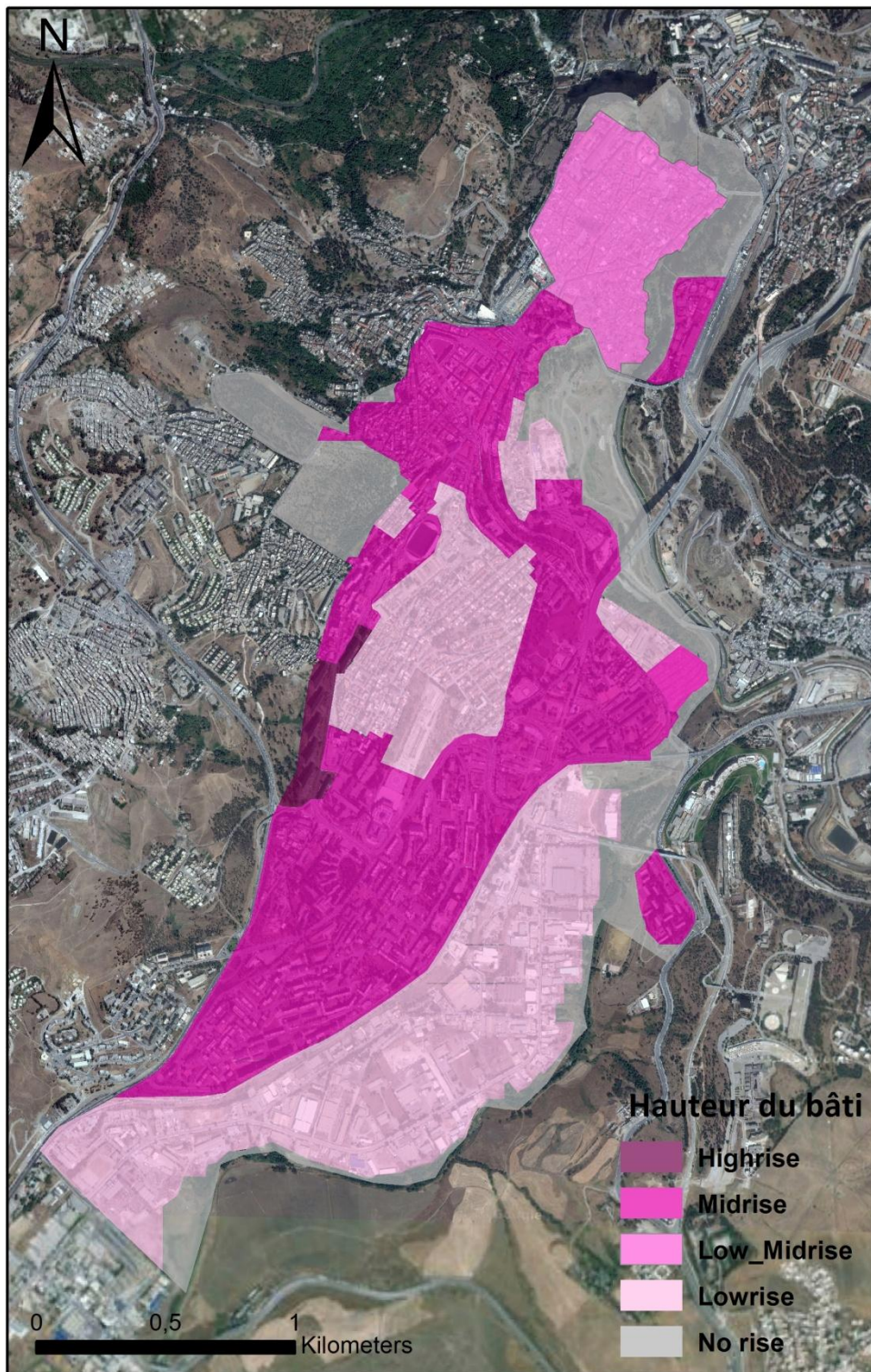


Figure 4.3: classification de la forme urbaine selon la variable Hauteur du bâti. *Source : (Auteur, 2017).*

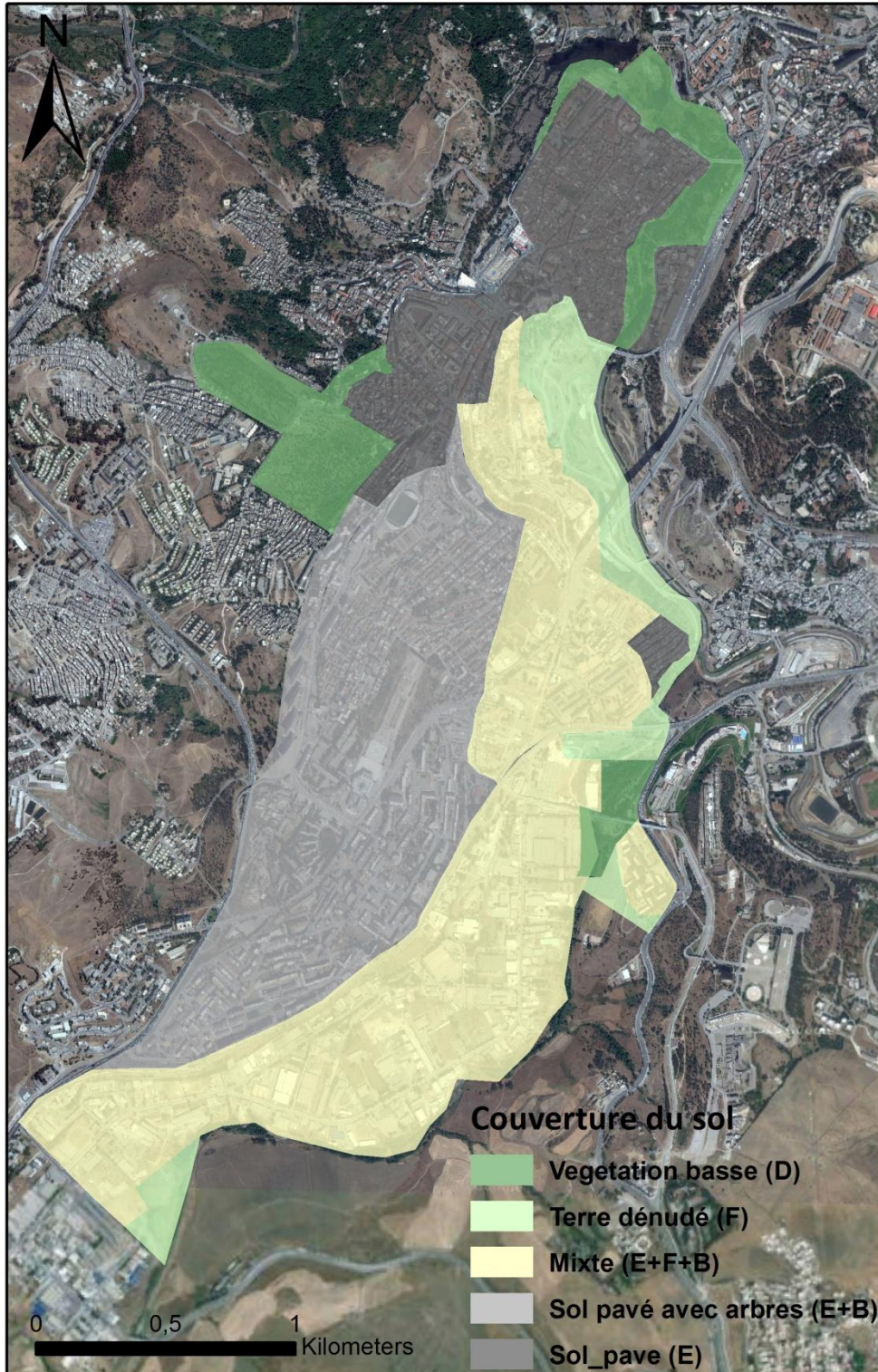


Figure 4.4: classification de la forme urbaine selon la variable Couverture du sol. *Source : (Auteur, 2017)*

Oke T.R. (2004), dans son guide pour obtenir des observations météorologiques représentatives dans les sites urbains, a avancé que –typiquement- une taille de 500m est appropriée pour effectuer les mesures de température à une hauteur de 1.5m-2m près de sol. (Stewart I.D., et al., 2013) ont ajouté qu'elle peut présenter « *un rayon de 100m en zone densément bâtie et un rayon de 200m en zones ouvertes* »⁷⁴. Dans le cadre de ce travail, le calcul des sept indicateurs quantitatifs retenus lors de l'étape précédente est effectué dans un diamètre de 200 m autour du point d'installation du capteur thermique.

*« La documentation complète et exacte des métadonnées est absolument essentielle pour toute station afin de s'assurer que l'utilisateur des données n'a aucun doute sur les conditions dans lesquelles les données ont été enregistrées, rassemblées et transmises, afin d'extraire des conclusions exactes de leur analyse »*⁷⁵.

Pour cela La détermination d'une zone source doit répondre à certaines exigences qui sont abordées dans (Stewart I.D., Oke T.R., 2010) et (Leconte F., et al., 2015):

- éloigner le site de mesure des frontières de chaque LCZ (minima 100m) pour éviter l'enregistrement de l'influence thermique d'une autre LCZ.
- A l'écart des éléments urbains qui ne sont pas représentatifs de la LCZ (fontaines, squares...).
- A l'écart des carrefours et des intersections.
- Eviter les voies de circulation très fréquentées par les automobilistes (un flux anthropique important sur ces axes de circulation, or cette chaleur anthropique concerne uniquement l'environnement proche de l'axe routier et non la LCZ dans son ensemble).

4.20.2.3. Sélection des zones climatiques locales :

La dernière étape consiste à trouver une corrélation entre les valeurs des paramètres de surface observées dans chaque site urbain lors de l'étape précédente, et les métadonnées des types LCZ, proposées dans le guideline de Stewart I.D., et Oke T.R., (2012) - présentées sous forme de "Datasheet"-, dont les intervalles suggérées par les deux chercheurs représentent selon (Leconte F., 2014) les limites approximatives au sein

⁷⁴ F, Leconte., et al., (2015a). *Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements*. Building and Environment 83, 39–49.

⁷⁵ (Aguilar, E., et al., 2003) IN C.L, Muller. et al., (2013). *Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks*. Bulletin of the American Meteorological Society 94, 1161–1185.

desquels les valeurs des indicateurs urbains collectés sont inclus. Le but de cette étape est de choisir la catégorie LCZ appropriée, qui correspond le mieux avec le site de mesure étudié et ce parmi les dix-sept zones climatiques locales proposées dans le système de classification.

4.20.3.L'analyse du comportement thermique des classes :

Deux méthodes ont été utilisées pour analyser le comportement thermique des LCZ obtenues :

4.20.3.1. Les simulations :

Le cadre de travail LCZ a été conçu principalement pour caractériser les ICUs dans la couche de canopée urbaine. Cependant, (Geletič J., et al., 2016) souligne que les données en provenance des relevés in-situ s'avèrent souvent insuffisantes pour décrire et comprendre pleinement la variabilité spatiale de température de l'air. Comme « *la température de l'air a une relation étroite avec la température de surface* »⁷⁶, la télédétection peut être un alternatif convenable, elle a l'avantage d'une vue synoptique de toute la surface urbaine et permet une couverture spatiale détaillée. Elle est utilisée dans de nombreuses publications pour évaluer le climat thermique à l'échelle locale (LCZ).

(Skarbit N., et al., 2015) ont présenté une étude de cas, sur les caractéristiques du LST et son altération entre les différentes catégories LCZ, à Szeged –Hongrie-, en se basant sur les données de température de surface nocturne, de haute résolution. Dans la même ligne, les bandes infrarouges thermiques Landsat et ASTER ont été employées pour dériver la température de surface, utilisée pour la différenciation des classes zones climatiques locales, dans le travail de (Geletič J., et al., 2016).

La méthode de Stewart et Oke suggère qu'il existe :

- Un comportement thermique typique au sein de chaque LCZ.
- Des contrastes thermiques entre les différentes typologies.

Pour valider les deux points, Landsat 08 de 15/07/2015 (la scène utilisée dans l'approche méthodologique 01), est appliqué dans le cas d'étude choisi, pour évaluer la

⁷⁶ N, Skarbit., et al. (2015). *Airborne surface temperature differences of the different Local Climate Zones in the urban area of a medium sized city*. In Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2015 Joint, (IEEE), pp. 1–4.

stabilité thermique au niveau des LCZ. Celle-ci sert à générer des profils de température, en effectuant des plans de coupes traversant chaque zone climatique.

4.20.3.2. Les mesures in-situ :

Cette recherche propose également de réaliser des relevés in-situ de température de l'air près de surface, pour confronter les LCZ à la réalité. Cela permet d'étudier les particularités climatiques des LCZ au niveau de la couche limite de canopée urbaine.

- *Protocol et déroulement des mesures :*

Comme déjà mentionné précédemment dans le deuxième chapitre, les méthodes in-situ sont largement utilisées par les scientifiques de climat urbain, pour récolter les données micro-météorologiques (température, vitesse du vent, humidité...), elles comprennent : d'une part, la méthode de mesure mobile, qui permet selon (Wang Z., et al., 2016) de détecter la répartition spatiale de température de l'air à l'intérieur d'une aire d'étude, et d'autre part, les mesures effectuées par des stations fixes.

(Leconte F., et al., 2015a) ont effectué des itinéraires de voiture au sein de l'agglomération de Nancy, afin de mettre en évidence les spécificités climatiques thermiques des zones climatiques locales, par l'enregistrement de température de l'air dans de nombreuses rues. Une situation similaire est également rencontrées dans (Lau K.K.-L., et al., 2015; Wang Z., et al., 2016). Par ailleurs, dans (Ng, Y.X., 2015), Trois sondes fixes sont employées qui permettent d'enregistrer les données de températures dans trois zones climatiques locales à Singapour, durant la période estivale. La même approche est utilisée dans (Coseo P., Larsen L., 2014; Savić S., et al., 2013). Plusieurs autres études ont combiné entre les deux méthodes comme dans (Alexander P.J., Mills G., 2014; Puliafito S.E., et al., 2013; Thomas G., et al., 2014).

(Stewart I.D., 2011b) a souligné l'importance du contrôle de temps pendant les mesures d'ICUs. Il a avancé: « *Si les températures utilisées pour quantifier l'amplitude d'ICU ne sont pas synchrones, les ICUs induit par l'urbain peuvent être confondus avec les ICUs induit par le temps* ».

Il a ajouté :

'Stationary instruments that are automated and synchronised are immediately advantaged over mobile surveys'.

Pour cela notre choix s'est porté sur l'approche de mesure fixe qui –à l'inverse des méthodes mobiles- permet de mesurer les températures de façon synchrone.

- **Moyens instrumentaux :**

Le protocole expérimental de cette étude, propose de réaliser le monitoring *in-loco* des températures dans deux zones climatiques locales (au niveau de la zone source de chaque LCZ), afin d'étudier et de comparer les particularités climatiques de ces environnements. Les deux sites de control, ainsi que les coordonnées des points d'acquisition des variables climatiques sont représentés dans les figures 4.5 et 4.6.

Le choix s'est porté seulement sur deux sites du fait du manque d'appareils de mesure du même modèle (étalonnés). Ainsi, utiliser d'autres types d'instruments n'est pas possible, à cause de l'absence d'un appareil "étalon" qui permet d'effectuer les corrections de précision entre les différents instruments, pour éviter le décalage qui peut se présenter entre les valeurs enregistrées.

Le premier point : la zone "compact midrise" :

- latitude: 36°21'44.33"N,
- Longitude: 6°36'22.44"E.



-a-

- b-

Figure 4.5: -a- vue aérienne de la zone source de la zone de type "compact midrise", -b- prise de vue au site de contrôle. *Source : (auteur, 2017)*

Le deuxième point: la zone "open Midrise"

- Latitude: 36°20'36.09"N
- Longitude: 6°36'8.99"E



-a-



- b-

Figure 4.6: -a- vue aérienne de la zone source de la zone de type "Open midrise", -b- prise de vue au site de contrôle. *Source : (auteur, 2017)*

L'acquisition des données s'est déroulée pendant une journée chaude et ensoleillée estivale de 05/08/2016. Les données météorologiques ont été fournies par l'ONM, dans le but est de préciser le contexte climatique dans lequel les mesures sont prises. Il s'agit

d'une température de l'air moyenne de 35.1°C; d'une humidité relative de 40.8%; le vent a soufflé à une vitesse moyenne inférieure à 6,0 m/s. La période de mesure était de 7h matin à minuit, réalisées simultanément sur les deux sites, à un intervalle d'une heure. Pour chaque point, une station météorologique manuelle de marque "LM-8000" a été utilisée (tableau 4.4).

Comme dans (Roux J., 2014), les deux appareils ont bénéficié des mêmes conditions en termes de température et d'humidité relative (ils sont restés dans la même pièce à l'abri de la lumière pendant des jours), afin de diminuer la marge des erreurs sur les sites. A côté de cela, les recommandations d'Oke T.R. (2006), inclut dans l'OMM, (présentées dans le chapitre 02) ont été également suivis.

Tableau 4.4: Instrument de mesure. *Source : (auteur, 2017)*

<i>Les instruments de mesures</i>		<i>Description</i>
Anémomètre LT Lutron LM-8000		Anémomètre : Température (° C)/ HR (%)/vitesse de vent (m/s)

- **Conditions de mesure :**

Stewart dans son enquête mondiale (2011), a conclu que « *la moitié des études observationnelles d'ICU, de la période 1950-2007, échouent à effectuer un contrôle expérimental suffisant des effets non urbain sur la magnitude d'ICU* ».

«Les chercheurs doivent donc adopter une stratégie de conception appropriée pour contrecarrer les influences indésirables de surface »⁷⁷

D'abord, le contrôle du "weather":

⁷⁷ I.D, Stewart. (2011b). *A Systematic Review and Scientific Critique of Methodology in Modern Urban Heat Island Literature*. International Journal of Climatology 31: 200–217.

Selon (Stewart I.D., 2011b), *«Les Calculs de la magnitude d'ICU utilisent des températures mesurées dans des conditions météorologiques relativement stables: absence de forte advection ou de précipitations»*.

Afin de maximiser les contrastes thermiques captés au sein des LCZ, les relevés in-situ de température ont été réalisées dans des conditions météorologiques standardisées décrite dans (Houet T., Pigeon G., 2011; Leconte F., et al., 2015; Oke T.R., 2004; Stewart I.D., 2011a; Stewart I.D., Oke T.R., 2010) comme suit : des vents calmes et légers, dont la vitesse ne dépasse pas 9 m/s à 10 m de hauteur, un ciel clair dans les heures qui précèdent le monitoring, absence de précipitation importante le jour de mesure et dans les 24h précédent.

Aussi, Le contrôle des effets de la topographie sur la température est aussi important, il réduit le risque de confusion entre les îlots de chaleur causés par l'urbain et ceux compliqués par les effets de changement d'altitude. Dans le travail de (Leconte F., et al., 2015), la différence d'altitude maximale observée à l'intérieure des LCZs retenues dans son étude sur Nancy est de 30m, ils ont avancé qu'à cette élévation, les températures enregistrées sont bien dues à l'urbanisation. En outre, le relief à Nagano et Uppsala est faible (ne dépassant pas 30m), ce qui ne perturbe pas les mesures de températures dans les deux sites, selon (Stewart I.D., Oke T.R., 2010).

Dans le cadre de ce travail, la figure 4.7 représente la carte numérique d'élévation du site d'étude. La différence d'altitude entre les deux points de monitoring choisis pour effectuer les enregistrements, se situe dans l'intervalle de 30 à 40m. Ceci, n'entraîne pas de changement significatif dans les mesures températures de l'air.

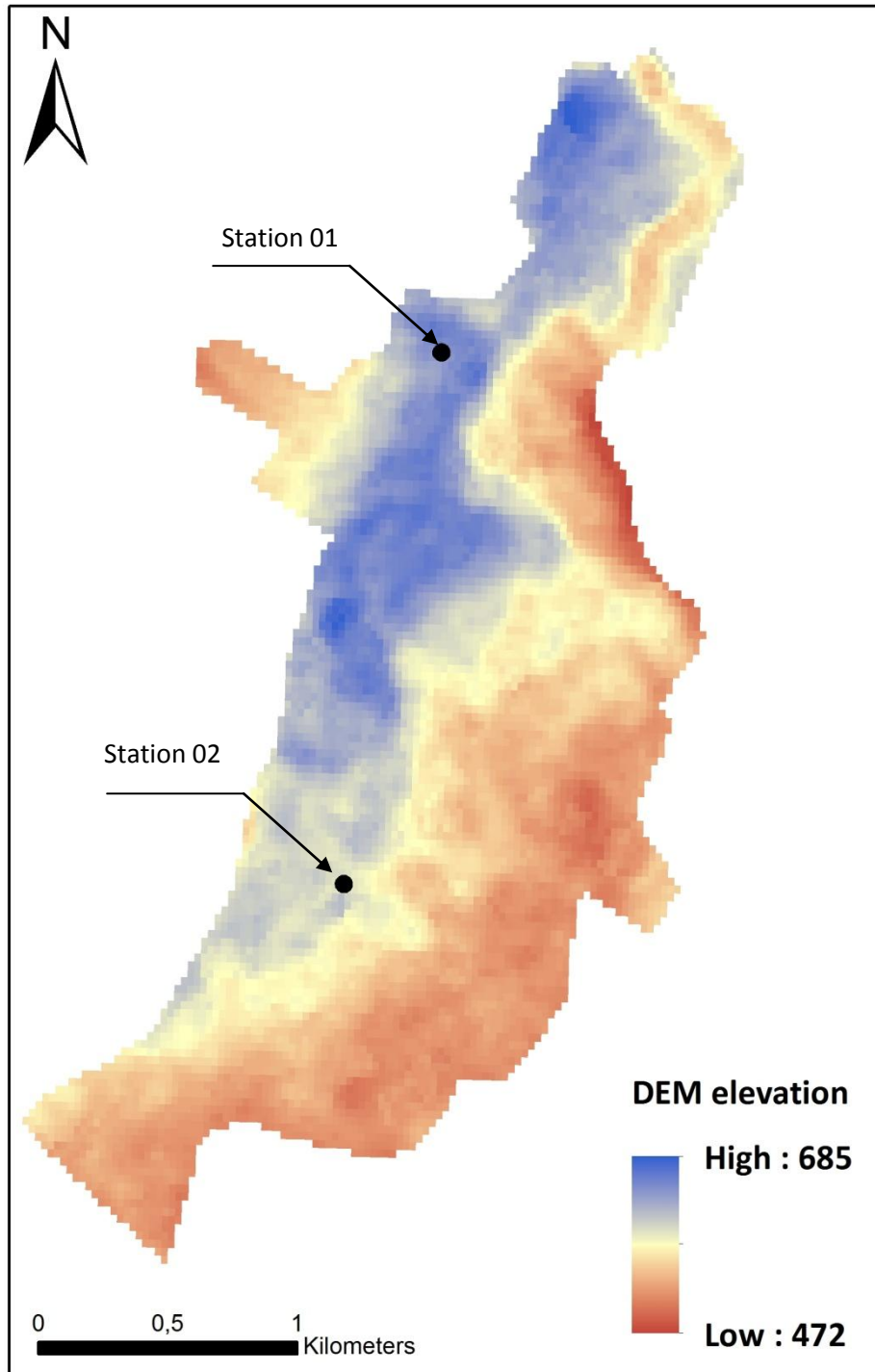


Figure 4.7 : Carte numérique d'élévation du site d'étude. *Source : (auteur, 2017)*

4.21. Résultats et discussions:

4.21.1. Cartographie des Zones Climatiques Locales :

L'opération de classification décrite ci-dessus, qui s'est basée sur la superposition de trois niveaux d'informations, a permis de fournir une cartographie initiale où sont définis les contours préliminaires des différentes LCZ (figure 4.8). La carte permet de caractériser 16 échantillons représentatifs des principales formes urbaines rencontrées sur l'étendue d'étude, pour chacun est attribué un type LCZ provisoire. Neuf classes LCZ sur dix-sept proposées dans le référentiel de Stewart ont été distinguées (tableau 4.5), dont sept appartiennent au type "built-up" et deux appartiennent au type "land-cover".

Tableau 4.5: Types de LCZ utilisés dans l'aire d'étude. *Source : (Auteur, 2017).*

Type de LCZ	Code	Nom
Urbain	LCZ 2	Compact midrise
	LCZ 3/2	Compact lowrise/Midrise
	LCZ4	Open highrise
	LCZ 5	Open midrise
	LCZ 6	Open lowrise
	LCZ 8	Large lowrise
	LCZ 9	Sparsely built
Couverture du sol	LCZ B	Scattered trees
	LCZ F	Bare soil

Le centre historique et son environnement étroit, dominés par des équipements et des bâtiments résidentiels, forment des zones "Compactes" à hauteur moyenne. Le type "Ouvert" représente le type de développement le plus fréquent dans le reste de périmètre de travail (hauteur faible à moyen). Étant donné le site choisis (site urbanisé), les zones non artificialisées sont minimales. Outre la catégorie LCZ_B qui représente un paysage avec arbres dispersés, on trouvera encore des zones de "terrains nus".

Par ailleurs, certaines zones climatiques sont définies comme étant "not identified", il s'agit des fragments hétérogènes qui présentent un mélange de paysages et de spécificités locales. Elles sont difficiles à classer dans une catégorie LCZ qui correspond le mieux avec ses caractéristiques.

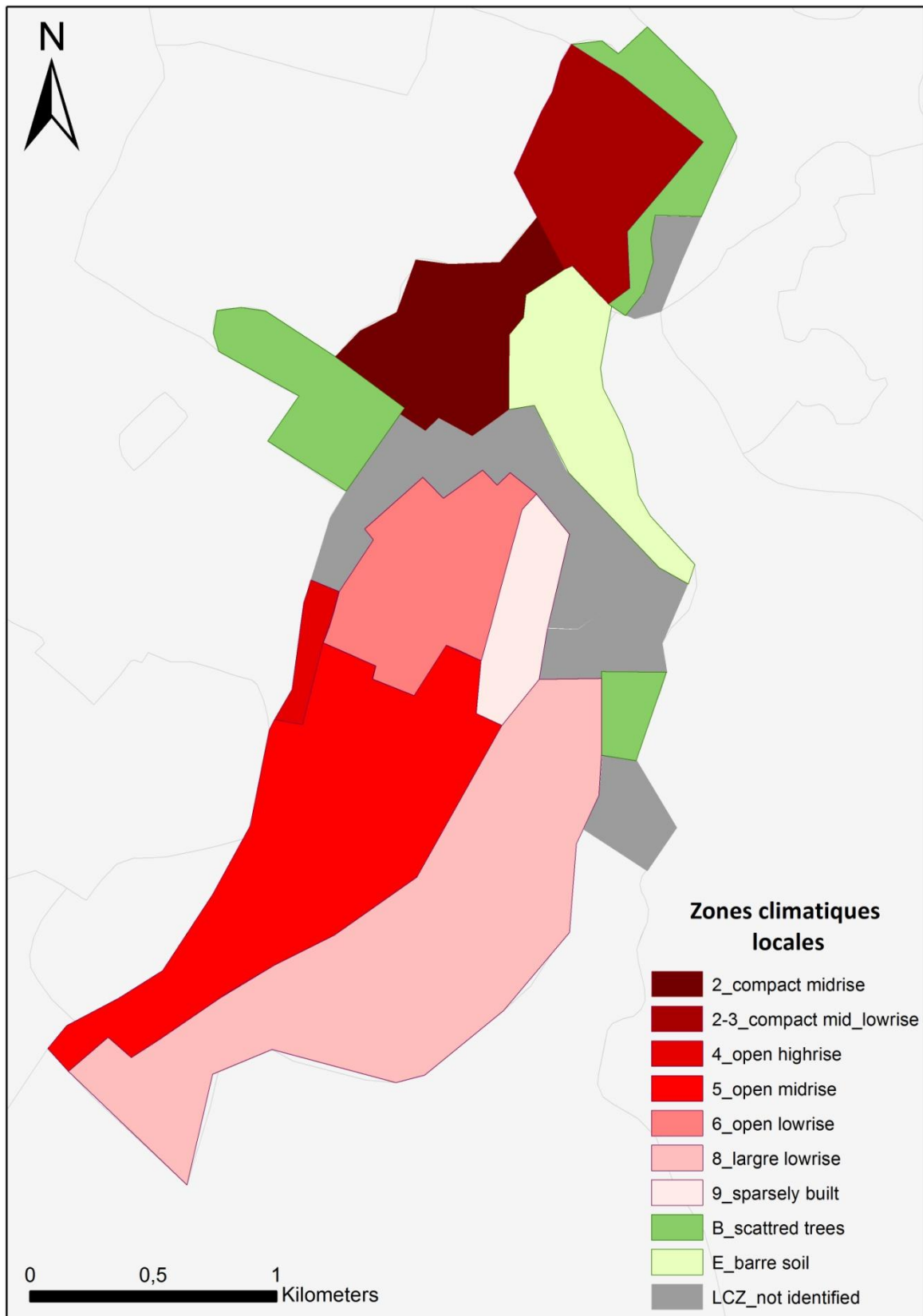


Figure 4.8: Classification générale de l'aire d'étude selon les Zones Climatiques Locales - LCZ.

Source : (Auteur, 2017)

Cherchant à valider si les types LCZ adressées à chaque fragment urbain –lors de la phase précédente- sont adéquatement sélectionnés, un calcul des sept indicateurs urbains liés, à la morphologie urbaine et la couverture du sol au niveau de la zone source de chaque classe, est opéré (en suivant la méthodologie proposée plus haut). Les valeurs obtenues sont comparées avec les intervalles suggérés dans le guide de Stewart. Le but selon le cadre de travail des chercheurs, est de trouver la meilleure (n'est pas la parfaite) correspondance entre les sites urbains et les classes LCZ proposées dans le référentiel.

Dans le cadre de ce travail, six classes LCZ ont été retenues qui couvrent la majorité de l'étendu d'étude. Les zones à petite taille sont éliminées. Selon (Leconte F., et al., 2015; Savić S., et al., 2013; Stewart I.D., Oke T.R., 2012), chaque LCZ doit avoir un diamètre minimal de 400 à 1000m. Les zones qui ne satisfassent pas cette condition ne sont pas retenues (comme les petits groupements de bâtiments, une zones rattachée à une LCZ située en dehors des frontières de l'aire de travail). Les valeurs des propriétés physiques pour chaque LCZ sont présentées dans le tableau 4.6. La localisation des LCZ ainsi que le site de control attaché sont décrit de manière succincte dans les figures de 4.9 à 4.14.

Tableau 4.6 : valeurs des indicateurs urbains. SVF: sky view factor, AR: aspect ratio, H: Height of roughness elements, R: Terrain roughness class, BSF: Building surface fraction, ISF: Impervious surface fraction, PSF: Pervious surface fraction. *Source: (Auteur, 2017).*

Type LCZ	Indicateurs physiques						
	SVF (-)	AR (-)	H (m)	R class (-)	BSF (%)	ISF (%)	PSF (%)
Compact midrise	0,22	> 3	22,8	7	48,87	48,52	2,61
Compact low/midrise	0.18	>2	12,58	7	67,31	29,94	2,75
Open midrise	0,59	0,54	15,35	7	19,45	49,28	31,26
Open lowrise	0,74	0,68	7,5	5	31,36	20,65	47,99
Large lowrise	0.63	0,34	7,58	6	31,73	52,15	16,11
Bare soil	1	-	-	2	0	<1	99

La classe LCZ2 ‘‘Compact Midrise’’ (figure 4.9) représente le milieu urbain dense que l'on trouve au centre ville ancien (Coudiat, Saint-Jean...) de Constantine, construit durant la période coloniale. Ses descripteurs qualitatifs (définition, localisation, fonction, illustration) correspondent parfaitement avec les métadonnées de la zone ‘‘compact Midrise’’ de Stewart. Les valeurs quantitatives des indicateurs urbains de couverture du sol (PSF, ISF, BSF) se situent dans les bornes originales préconisées. Pour ce qui est de

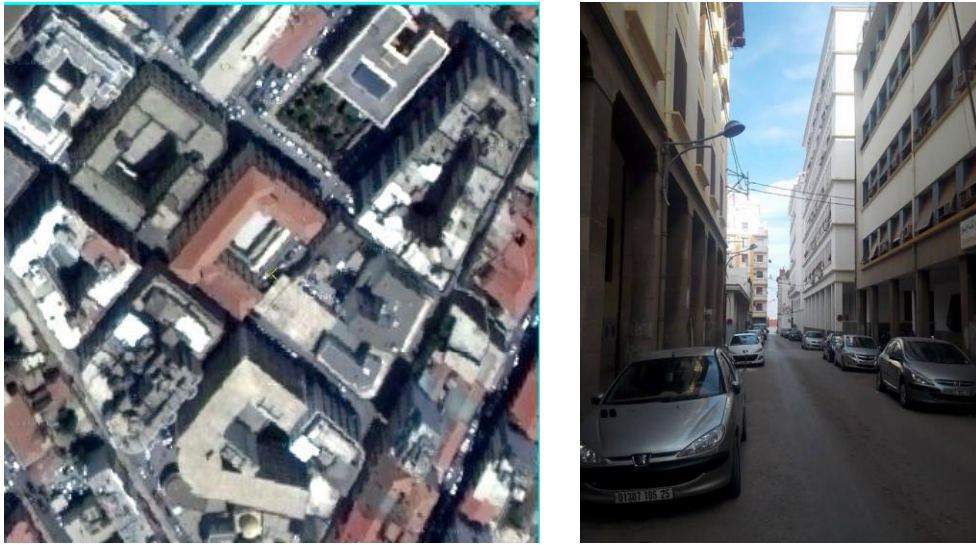
morphologie urbaine, deux (la hauteur et la classe de rugosité) des quatre paramètres concordent aux valeurs proposées, tandis que, Les intervalles suggérés dans le référentiel pour l'aspect ratio se trouvaient être trop réductives pour le centre ville de Constantine. Ainsi, Le SVF est légèrement inférieur à l'intervalle proposé.

Par ailleurs, l'entité spatiale de tissu urbain très dense qui couvre la 'Médina de Constantine' (figure 4.10) s'écarte de l'ensemble des dix-sept classes LCZ. Elle représente un type hybride de bâtiments à hauteurs basses à moyennes. Stewart I.D., et Oke T.R., (2012), ont avancé que les utilisateurs peuvent créer de nouvelles sous-classes en combinant deux types. Pour cela cet échantillon du site a été classé comme étant 'LCZ2/3', c.-à-d. compact Midrise/compact lowrise. En terme de couverture du sol, les propriétés observées correspond tout juste à une LCZ de type compact lowrise, tandis que, les valeurs de morphologie sont de type 'Midrise', en exception, les valeurs de SVF et de rapport d'aspect sont hors les limites suggérées (comme dans le cas précédent).

Les deux indicateurs (SVF et l'aspect ratio (AR)) dépendent fortement de la configuration et de la composition urbaine. Il faut noter que les intervalles des différentes classes proposées par Stewart et Oke dans les 'datasheets' du système de classification se sont basés sur les résultats des travaux dans trois villes représentatives de l'Europe, l'Amérique du nord et l'Asie, dont nos villes représentent des structures et des formes urbaines différentes. Ainsi, *le calcul des indicateurs correspond à la moyenne sur l'ensemble de la zone, y compris les cœurs des îlots, les places et les squares*⁷⁸. Leconte F., et al (2015a) ont utilisé un modèle numérique d'élévation (MNE), comme donnée d'entrée dans le logiciel SAGA-GIS pour calculer le facteur de vue du ciel pour chaque pixel du MNE. Il a avancé que sans cette couche MNE, la détermination du SVF aurait été significativement plus difficile. Dans cette étude, vu le manque des données, le travail s'est effectué au niveau des canyons seulement (les patios ne sont pas pris en considération).

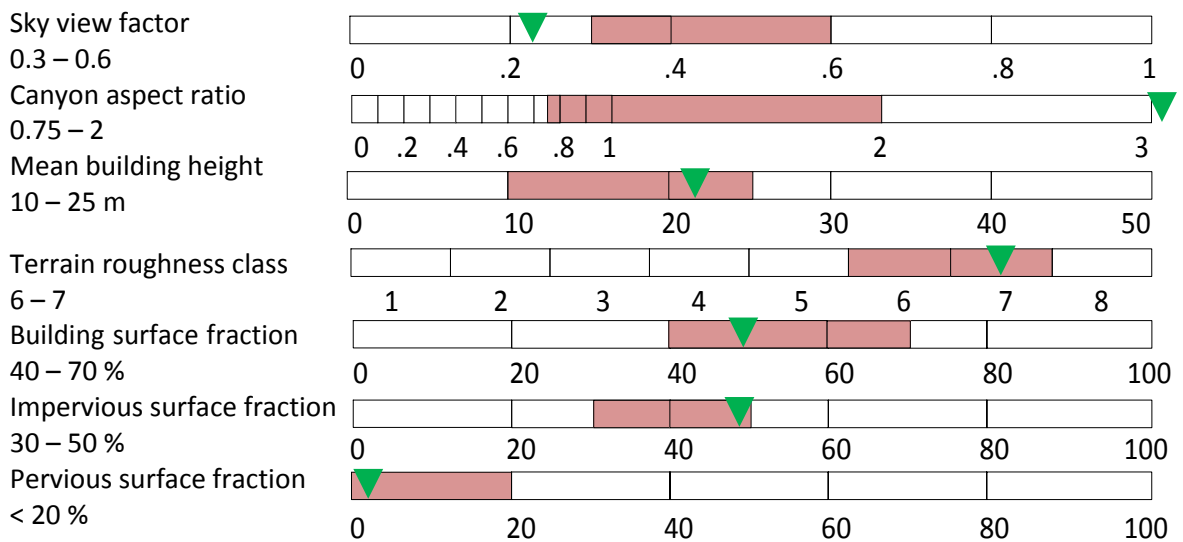
La classe LCZ5 'Open Midrise' (Figure 4.11), est affiliée au milieu d'occupation du sol principalement d'ensembles résidentiels (Cité 20 Aout 1955, Cité Fadila Saaden, Cité Filali...). Les métadonnées quantitatives et qualitatives observées indiquent une correspondance tout à fait avec celles de la classe 5 suggérés par Stewart.

⁷⁸ F, Leconte., et al. (2015a). *Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements*. Building and Environment 83, 39–49.



(a)

(b)



Intervalles suggérés pour une LCZ de type Compact Midrise. Valeurs observées *in-situ*.

(c)

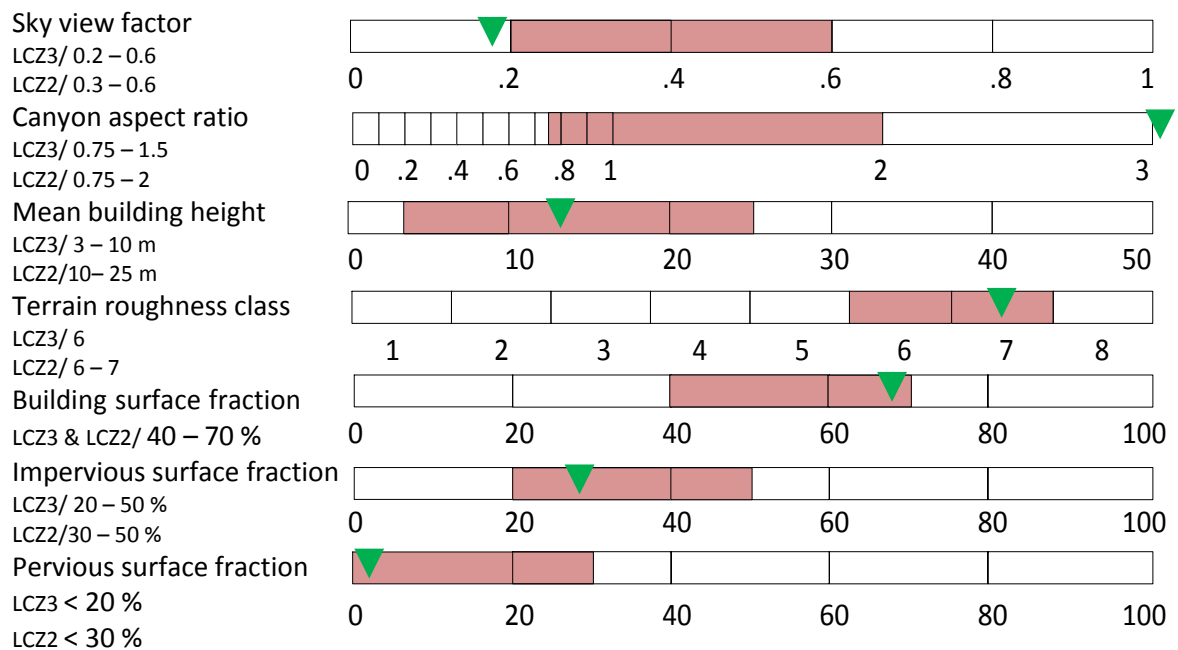
Figure 4.9 : (a). La zone source de la LCZ2. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs des indicateurs urbains calculés pour la LCZ2. *Source :* (Auteur, 2017).



(a)



(b)



Intervalles suggérés pour une LCZ de type Compact Midrise/Lowrise. Valeurs observées *in-situ*.

(c)

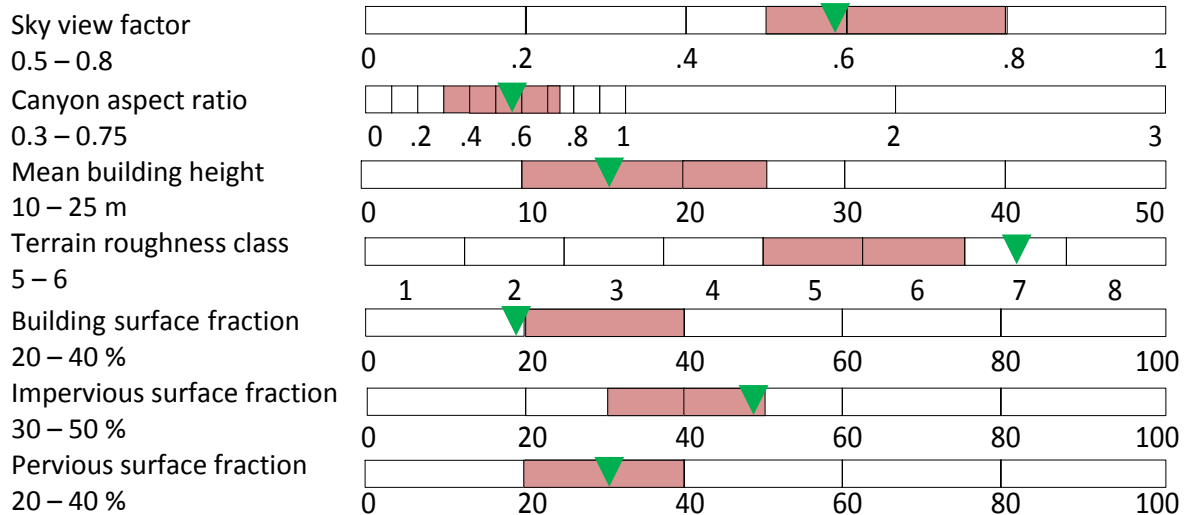
Figure 4.10 : (a). La zone source de la LCZ2/3. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs des indicateurs urbains calculés pour la LCZ2/3. *Source : (Auteur, 2017).*



(a)



(b)



Intervalles suggérés pour une LCZ de type Open Midrise. Valeurs observées *in-situ*.

(c)

Figure 4.11 : (a). La zone source de la LCZ5. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs des indicateurs urbains calculés pour la LCZ5. *Source : (Auteur, 2017).*

La catégorie LCZ6 "Open Lowrise" (Figure 4.12) coïncide avec une zone dominée par des quartiers résidentiel (Belle Vue, les Combattants) moyennement dense, qui se compose de maisons individuelles de 1 à 3 niveaux. De manière générale, les données observées (définitions, illustrations et propriétés physiques) ont montré une bonne corrélation avec celles proposées dans les lignes directrices du système de classification, pour la zone climatique locale de type "Open Lowrise".

Une zone de type "Large Lowrise" (Figure 4.13), a été sélectionnée au niveau de la zone industrielle "Rhumel". En accord avec ses activités (tertiaires, industrie légers), elle présente de grande bâtiments peu élevés ayant une emprise du sol considérable (entrepôt, usines...). Quant aux descripteurs physiques calculés, ils correspondent globalement avec les valeurs seuil du chercheur. Seulement, le pourcentage de l'ISF (impervious surface fraction) est légèrement supérieur à l'intervalle proposé.

Le seul échantillon de type "land cover" (Figure 4.14), retenu dans cette étude, représente un paysage à prédominance naturelle. Outre les descriptifs qualitatifs, les sept indicateurs urbains calculés permettent de mettre en évidence que ces paramètres ajustent parfaitement les valeurs seuil de la LCZ de type "bare soil (LCZF)".

De manières générales, les résultats constatés dans l'étendue de travail montre une correspondance acceptable entre les valeurs théoriques de référence proposées dans le référentiel, et celles relevées en réalité. Cependant, lorsqu'il s'agit d'une ville qui présente un profil moins homogène comme celui de Constantine, le schéma de classification LCZ montre quelques limites :

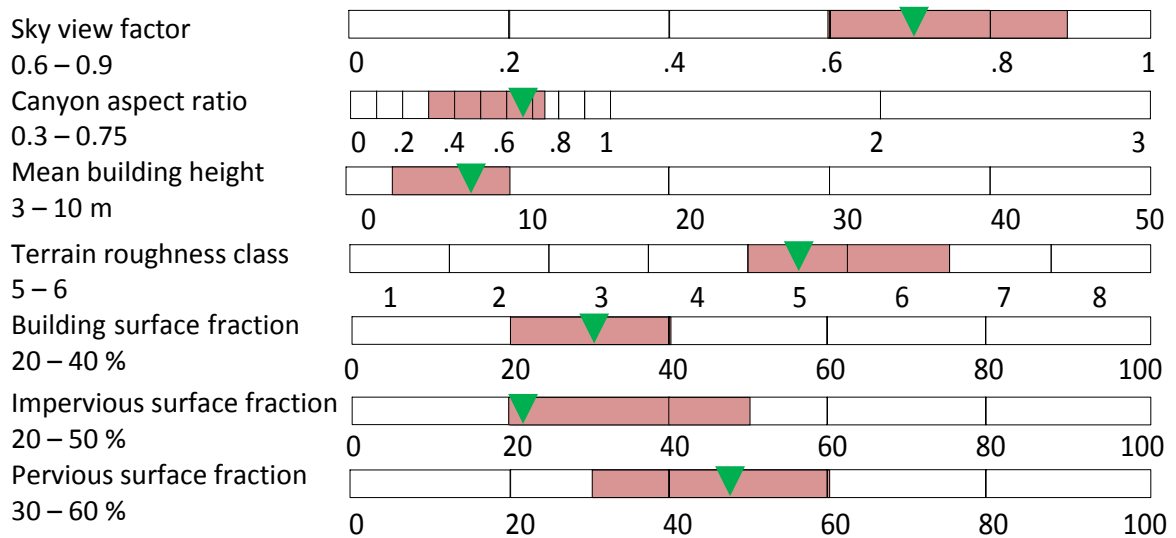
- Certains fragments urbains présentent des caractéristiques de plus d'une LCZ, comme le cas de la "Médina", où on trouve les caractéristiques de la LCZ2 et la LCZ3 dans le même périmètre. Ceci nous a obligé de créer de nouvelles classes en combinant les deux catégories.
- Les valeurs relevées présentent un certain décalage par rapport à celle suggérées dans les "Datasheets" des auteurs de la méthode. On cite comme exemple, les valeurs d'aspect ratio proposées par Stewart pour la LCZ "compact Midrise" se situent dans l'intervalle de 0,75 à 2, tandis qu'on trouve une valeur supérieure à 3.



(a)



(b)



■ Intervalles suggérés pour une LCZ de type Open lowrise. ▼ Valeurs observées *in-situ*.

(c)

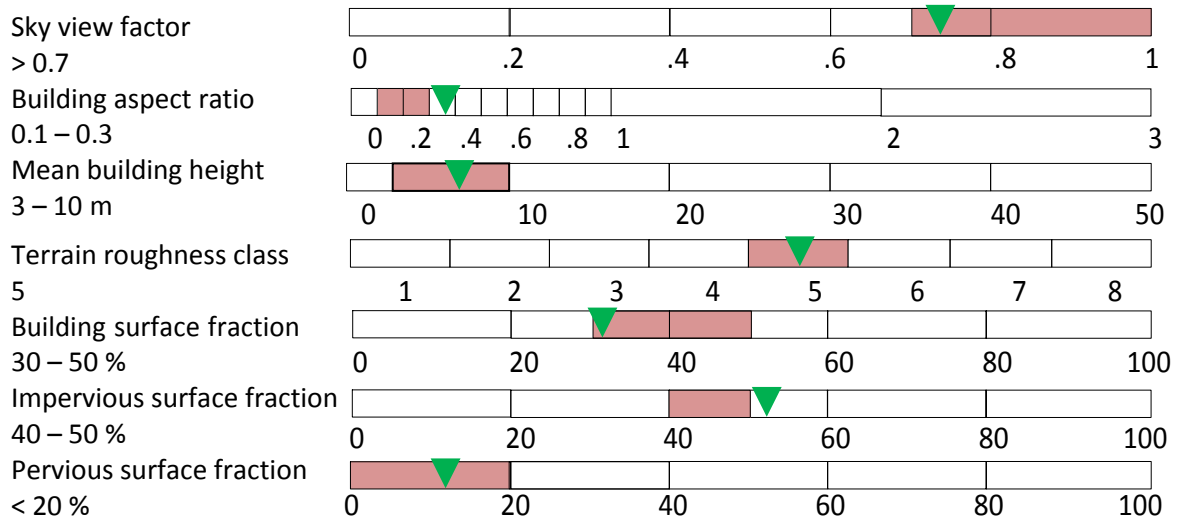
Figure 4.12 : (a). La zone source de la LCZ6. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs des indicateurs urbains calculés pour la LCZ6. *Source :* (Auteur, 2017).



(a)



(b)



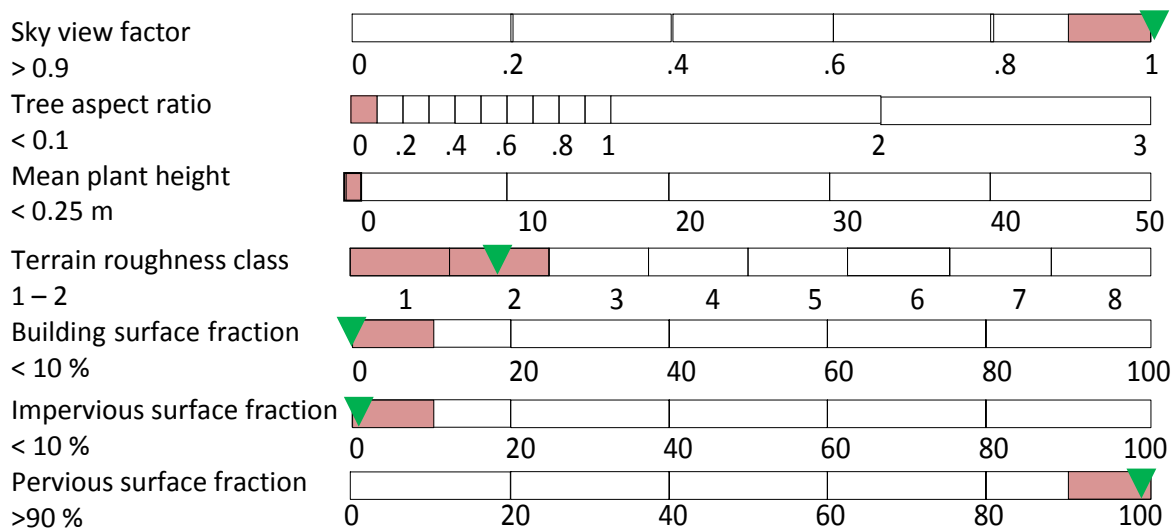
■ Intervalles suggérés pour une LCZ de type Large Lowrise. ▼ Valeurs observées *in-situ*.

(c)

Figure 4.13 : (a). La zone source de la LCZ8. (b) prise de vue à la zone source. (c) valeurs des indicateurs urbains calculés pour la LCZ8. *Source : (Auteur, 2017).*



(a)



■ Intervalles suggérés pour une LCZ de type Bare soil. ▼ Valeur observée *in-situ*.

(b)

Figure 4.14 : (a). La zone source de la LCZF. (b) valeurs de indicateurs urbains calculés pour la LCZF. *Source : (Auteur, 2017).*

Quantifier ces paramètres physiques permet d'identifier les types LCZ des fragments urbains du site de travail, et ce parmi les catégories standards proposées par Stewart. La dernière étape dans la validation du schéma de classification LCZ est d'étudier les caractéristiques thermiques de l'ensemble des classes et qui sont par définition:

" Supposé à démontrer un comportement thermique spécifique " ⁷⁹

La partie suivante permet d'interroger cette définition.

4.21.2. Validation de la méthode LCZ :

Rappelons qu'un des objectifs à auquel cette partie est intéressée à répondre, à partir l'utilisation des images satellitaires intégrées dans le SIG, est d'analyser les altérations climatiques thermiques intra-zones (suggérées comme étant "stables"), et interzones (supposant qu'il existe des écarts de températures entre les classes).

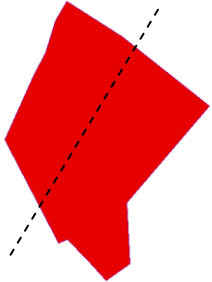
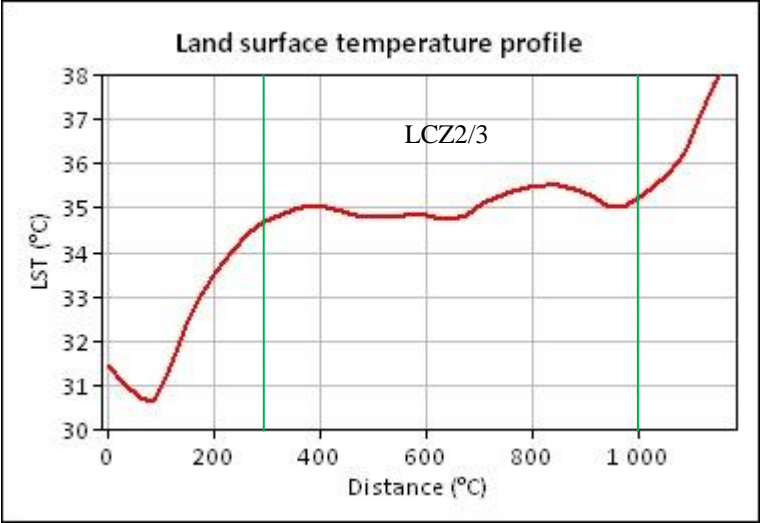
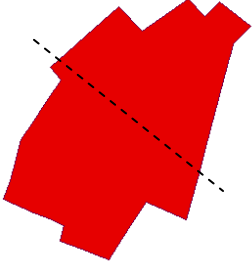
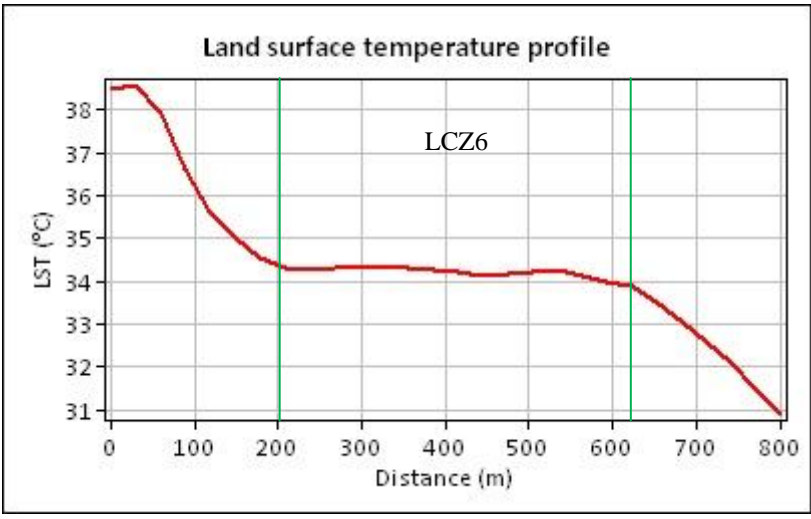
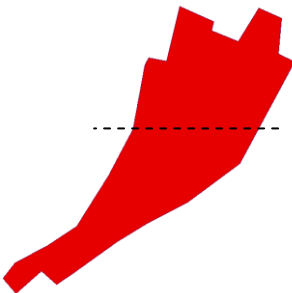
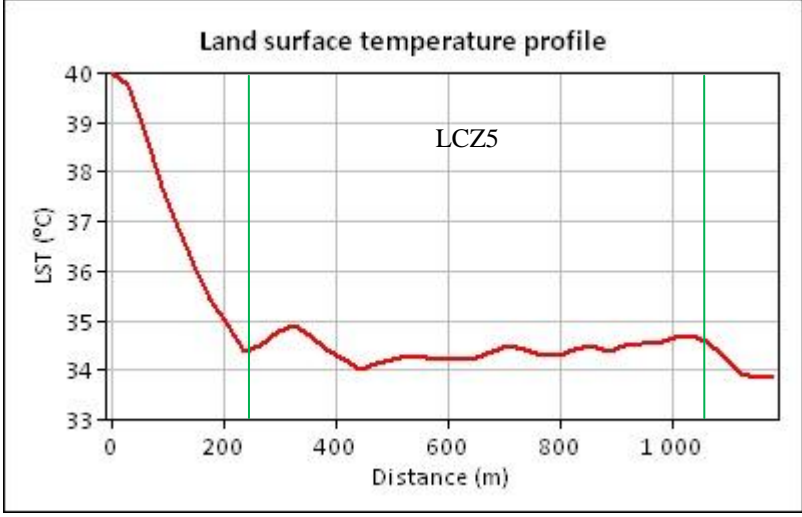
Afin de révéler le comportement thermique, et vérifier si les LCZs construites précédemment possèdent un comportement thermique spatialement homogène, une analyse portée sur l'utilisation de sections transversales a été mise au point. Ces plans de coupes s'avèrent plus utile pour refléter l'aspect topographique des champs thermiques par rapport aux cartes LST. Le tableau (4.7) suivant présente les profils LST pour les différentes classes approfondies plus haut, le jour de 15/07/2015.

Le tableau ci-dessus présente les profils LST observés à l'intérieur de chaque classe LCZ. L'interprétation de ces courbes permet de mettre en évidence que la température de surface est plutôt homogène de point de vue de sa distribution spatiale dans la première moitié des zones (LCZ2/3, LCZ5, LCZ6). En outre, La zone de type "compact midrise" se révèle généralement homogène, mais elle présente des points chauds localisés dans l'extrémité Est du fragment (LCZ2). Ce qui est inattendu, c'est la LCZ8 "large lowrise" qui démontre notamment une forte instabilité et des oscillations de température de plusieurs degrés. La zone naturelle de type "bare soil" est plutôt hétérogène. Les discussions de ces résultats sont présentées dans ce qui suit.

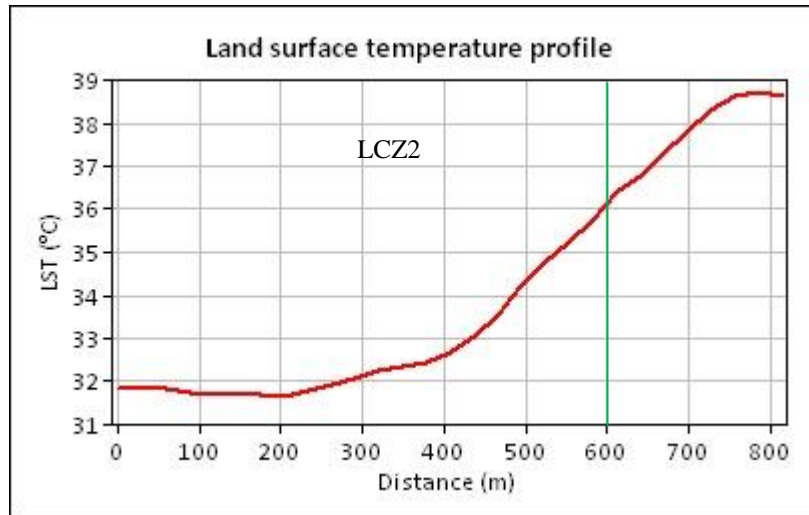
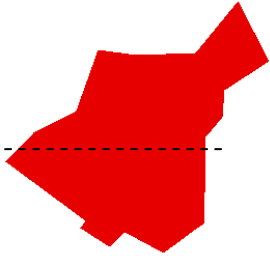
Il faut souligner d'abord, que les résultats de température issus des images thermiques détectées ne fournissent, comme a mentionné (Geletič J., et al., 2016), qu'un aperçu partiel (mais cohérent) de la nature de réponse thermique des LCZ, car les surfaces verticales sont négligées.

⁷⁹ F, Leconte., et al. (2015b). "Estimation of Spatial Air Temperature Distribution at Sub-Mesoclimatic Scale Using the LCZ Scheme and Mobile Measurements,". In ICUC9 - 9 Th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.,

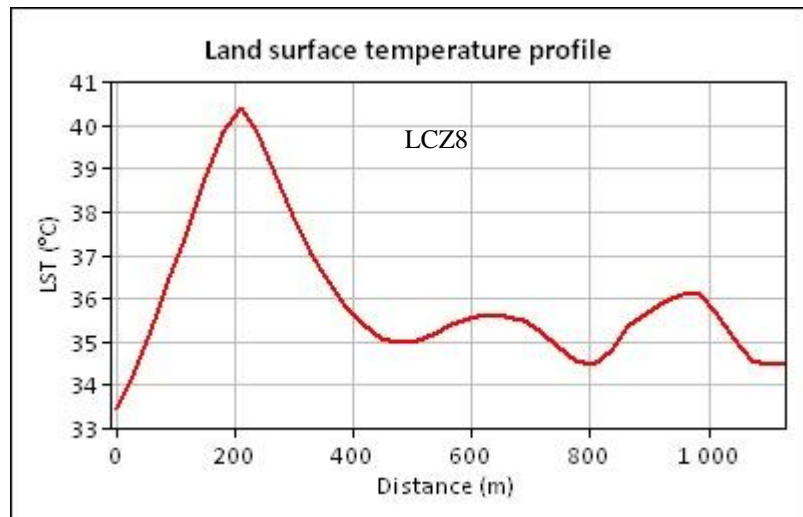
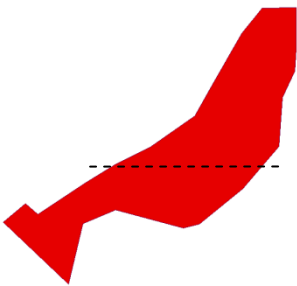
Tableau 4.7: les profils LST pour les six classes retenues dans l'étude. *Source : (Auteur, 2017)*

LCZ	Profil de température de surface
<p data-bbox="228 309 512 398">Compact Mid/lowrise (LCZ2/3)</p> 	<p data-bbox="754 349 1169 383">Land surface temperature profile</p> 
<p data-bbox="228 880 512 920">Open lowrise (LCZ6)</p> 	<p data-bbox="762 931 1177 965">Land surface temperature profile</p> 
<p data-bbox="228 1491 512 1532">Open Midrise (LCZ5)</p> 	<p data-bbox="762 1514 1177 1547">Land surface temperature profile</p> 

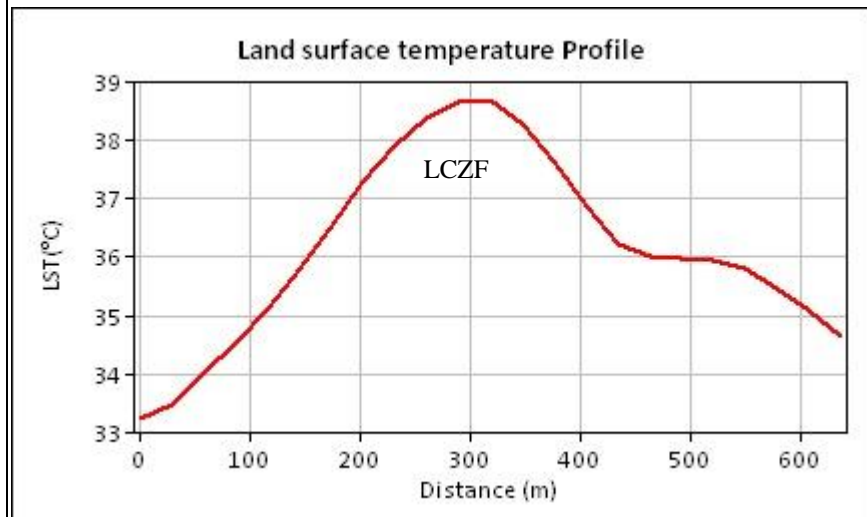
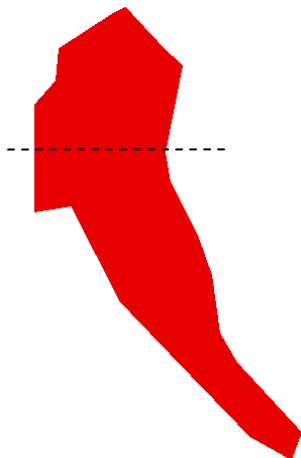
compact midrise
LCZ2



Large lowrise
LCZ 8



bare soil LCZF



Nous avons comme point de départ les valeurs indicatives fournies par (Stewart I.D., et al., 2014). Les chercheurs en se basant sur les simulations numériques par les modèles surface-atmosphère, et les observations météorologiques ont réussi à hiérarchiser la magnitude des écarts de température de l'air journalière des différents LCZ. La figure (4.15) montre les écarts entre les rangs journaliers des LCZ et la zone de référence (LCZ D), cette dernière correspond au point 0 (la moyenne du rang de température journalière de la LCZ D Low plants). Selon (Villadiego Bernal K., 2014) cette approche théorique permet une possible hiérarchie des zones par rapport à L'ICU, ainsi que des écarts entre elles.

L'hiérarchie montre clairement que la catégorie "compact midrise (LCZ2)" est plus chaude par rapport aux classes "built-up" : open midrise, open lowrise et large lowrise (qui correspondent à des classes retenues dans notre étude). Plusieurs travaux dans la littérature ont confirmé les résultats de (Stewart I.D., et al., 2014). Leconte F., (2015), a constaté que la température de l'air dans la LCZ2 tend à être plus élevée en comparaison avec les autres catégories. Des résultats similaires ont été appréciés à Nagano, Uppsala, et Vancouver (Stewart I.D., Oke T.R., 2009) et à Dublin (Alexander P.J., Mills G., 2014)

Il faut noter que dans ces travaux, il s'agit de températures de l'air, alors que cette analyse porte sur l'utilisation de la température de surface LST. Dans ce contexte, (Molnár G., 2016) a utilisé des images satellitaires landsat à Budapest pour déterminer les caractéristiques spatiales de distribution du LST, il a conclut que le centre historique de type "compact Midrise" souffre d'un excès de chaleur significatif. Les résultats de Brno et Prague (Geletič J., et al., 2016) sont dans la même ligne.

La logique de ces résultats se trouve dans les caractéristiques générales de la zone climatique LCZ2 qui présente une fraction de bâti et de surface imperméable plus élevée (supérieur à 96%), dont l'imperméabilisation du sol pourrait jouer un rôle important dans les ICUs.

A l'inverse, dans cette investigation à "Constantine", la catégorie LCZ2 enregistre les températures les plus basses et ce parmi les autres types sélectionnés dans l'étude, avec une valeur d'environ 32°C, et un écart de presque 3°C inférieur à la Médina. Cette dernière est représentée par une combinaison de deux zones "le compact lowrise et le compact Midrise", c-à-d que cette entité spatiale est similaire avec la LCZ2 en terme de fractions PSF (pervious surface fraction), ISF (impervious surface fraction) et BSF (building surface fraction), (voir les datasheets des deux zones en annexe A.1), ainsi que le type des

matériaux de construction. Le facteur particulier qui différencie ces deux zones est “la hauteur” des bâtiments.

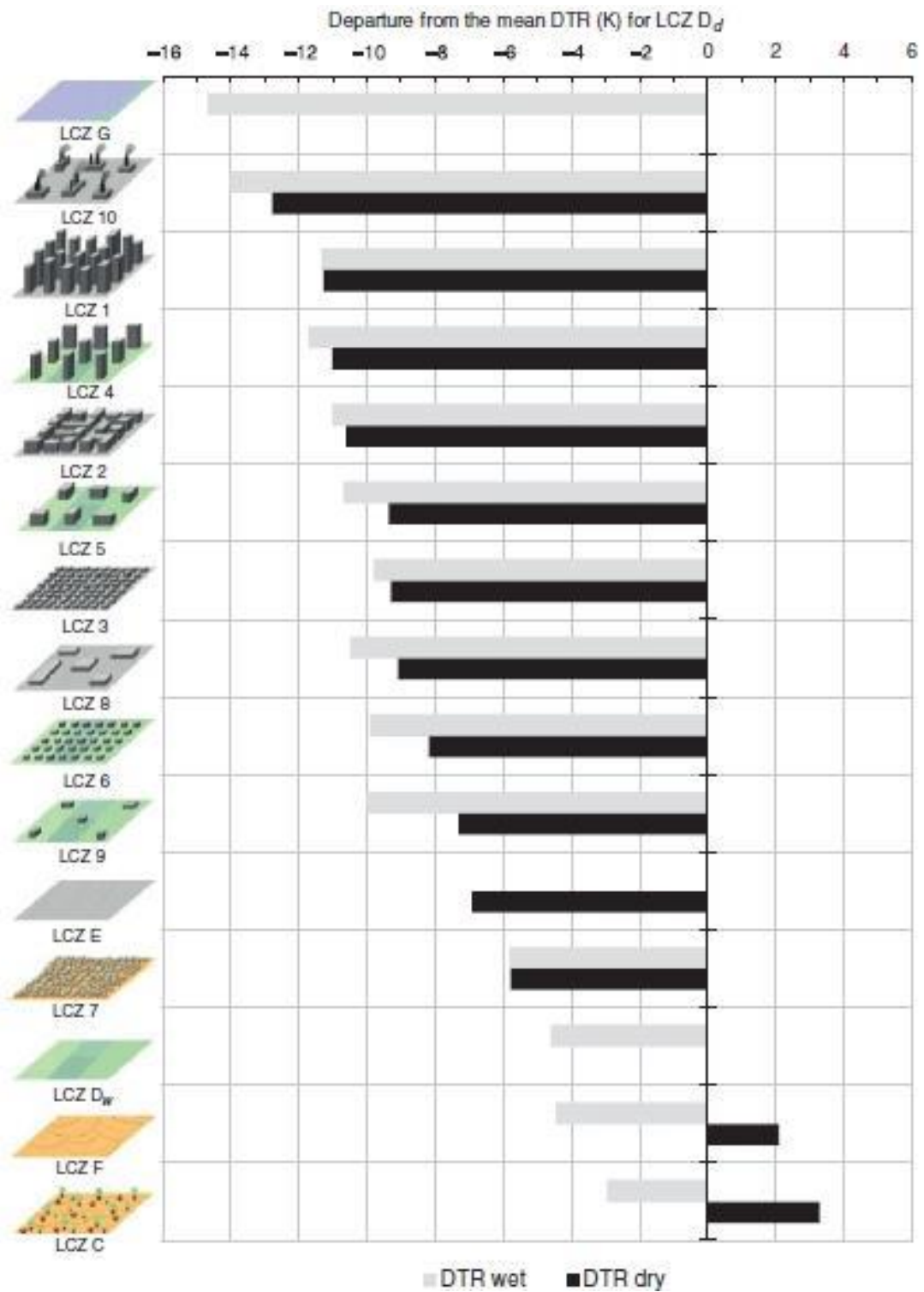


Figure 4.15: Simulation du rang des températures journalières selon les LCZ. *Source : (Stewart I.D., et al. 2014)*

(Geletič J., et al., 2016) a avancé que l'effet de la hauteur sur la température de surface apparente est négligé, du fait de la vision verticale du satellite. En d'autres termes, l'effet des émissions radiatives des éléments verticaux ne sont pas pris en considération. Cependant, la hauteur peut jouer un rôle important dans la création des ombres qui peut, selon (Bellara S., Abdou S., 2012; Lehmann S., Sharifi E., 2014), fournir la réduction de la température. Selon (Oke T.R., 1982) cité dans (Siu L.W., and Hart M.A., 2013), La zone urbaine se réchauffe lentement à cause de l'ombrage des canyons.

Donc, la cause probable de l'écart de température constaté entre les deux zones peut s'expliquer par l'effet de l'ombrage des bâtiments. D'une part, à la médina, le tissu est très dense avec des rues étroites (plus de 67% de bâti par rapport à 49% pour la LCZ2), et des hauteurs de faibles à moyennes. Ceux-ci réduisent considérablement les ombres procurées. D'une autre part, la hauteur dans la LCZ2 qui atteint dans certain cas 36m, peut accentuer les effets dues aux ombres portées et peuvent agir comme une protection contre le rayonnement solaire.

Il convient de souligner aussi que l'angle d'élévation du soleil à 10h matin (le temps de passage de satellite), ne pouvait pas laisser les surfaces se réchauffer autant qu'à midi et au début de l'après-midi où le phénomène de l'îlot de chaleur urbain de surface est le plus observable. Donc les valeurs LST sont demeurées plus faible.

La LCZ2 "compact Midrise", lieu de concentration des activités administratives et scolaires, connaît un important trafic routier. Environ 3°C de température a été constaté sur les axes routiers principales (comme la rue A. Ramdane). Comme déjà mentionné dans le chapitre 02, La température de surface est liée à l'énergie radiante ascendante détectée –à *distance*- par les capteurs thermiques. Elle est affectée par de nombreux facteurs -dans le cas du LCZ2- de source anthropique. Ceci pourrait être une justification de l'augmentation du LST dans le côté Est de la zone.

La catégorie LCZ8 "large lowrise" qui consiste à la zone ou des grandes surfaces destinées aux entreprises et à l'industrie légère. Elle est associée à une grande variabilité spatiale de température de surface relativement élevée, allant de 35.5°C à 41°C. À l'inverse, en regardant le schéma théorique des écarts de température (figure 4.15), cette zone climatique locale est considérée parmi les classes de faible température de l'air, Leconte F., (2015) a obtenu des résultats similaires à Nancy.

Les températures obtenues dans cette étude pourraient être justifiées par les caractéristiques des toits et des matériaux de construction utilisés dans la zone (acier, métal, béton...). Selon Roth M., et al (1989) cité dans (Houet T., Pigeon G., 2011), les températures de surfaces mesurées par satellite sont plus influencées par la variabilité thermique des types des toits que les autres éléments de surface urbaine. le travail de (Geletič J., et al., 2016) a confirmé notre appréciation.

Par rapport aux LCZ5 ‘‘open midrise’’ et LCZ6 ‘‘open lowrise’’, cette paire affichent des variations diurnes LST quelque peu semblables. Ces deux zones sont relativement proches en termes des caractéristiques de morphologie urbaine et de couverture du sol. Comme dans le premier cas, la hauteur est le paramètre physique particulier qui différencie les deux catégories, pendant que l’effet de la hauteur sur la température de surface apparente est négligé, du fait de la vision verticale du satellite, donc, uniquement les informations relatives aux propriétés thermiques des surfaces horizontales -qui sont semblables dans les deux classes- sont enregistrées dans l’image thermique acquis.

Les valeurs de températures de surface les plus élevées ont été observées dans la LCZF de type ‘‘land cover’’ qui correspond aux terres nues avec plus de 41°C, due à une plus forte réponse au rayonnement du sol nu (albedo inférieur, flux de chaleur latente réduit). Cela signifie que la différence de température entre cette zone ‘‘naturelle’’ et les classes ‘‘built-up’’ est négative qui pourrait se définir par un possible îlot de fraîcheur. Ce dernier est justifié par les conditions d’humidité du sol ; le sol nu et sec a une température LST plus élevé, due à la faible teneur en eau, donc ‘‘l’énergie stocké est dissipée en chaleur sensible’’. Par ailleurs, les zones urbaines à 10h matin sont encore sous la fraîcheur de la nuit, elles gardent un taux d’humidité relativement élevé (phénomène de rosée observé en fin de nuit) que la campagne environnante.

Pour conclure, les résultats précédents montrent que chacune des zones climatiques locales (détaillées par les paramètres physiques qui influent sur le microclimat) présente un comportement thermique spécifique, la plus part du temps homogène, et qui diffère sensiblement de celui des autres classes. La carte dans la figure (4.16) présente les variations de température de surface en fonction des zones climatiques identifiées préalablement.

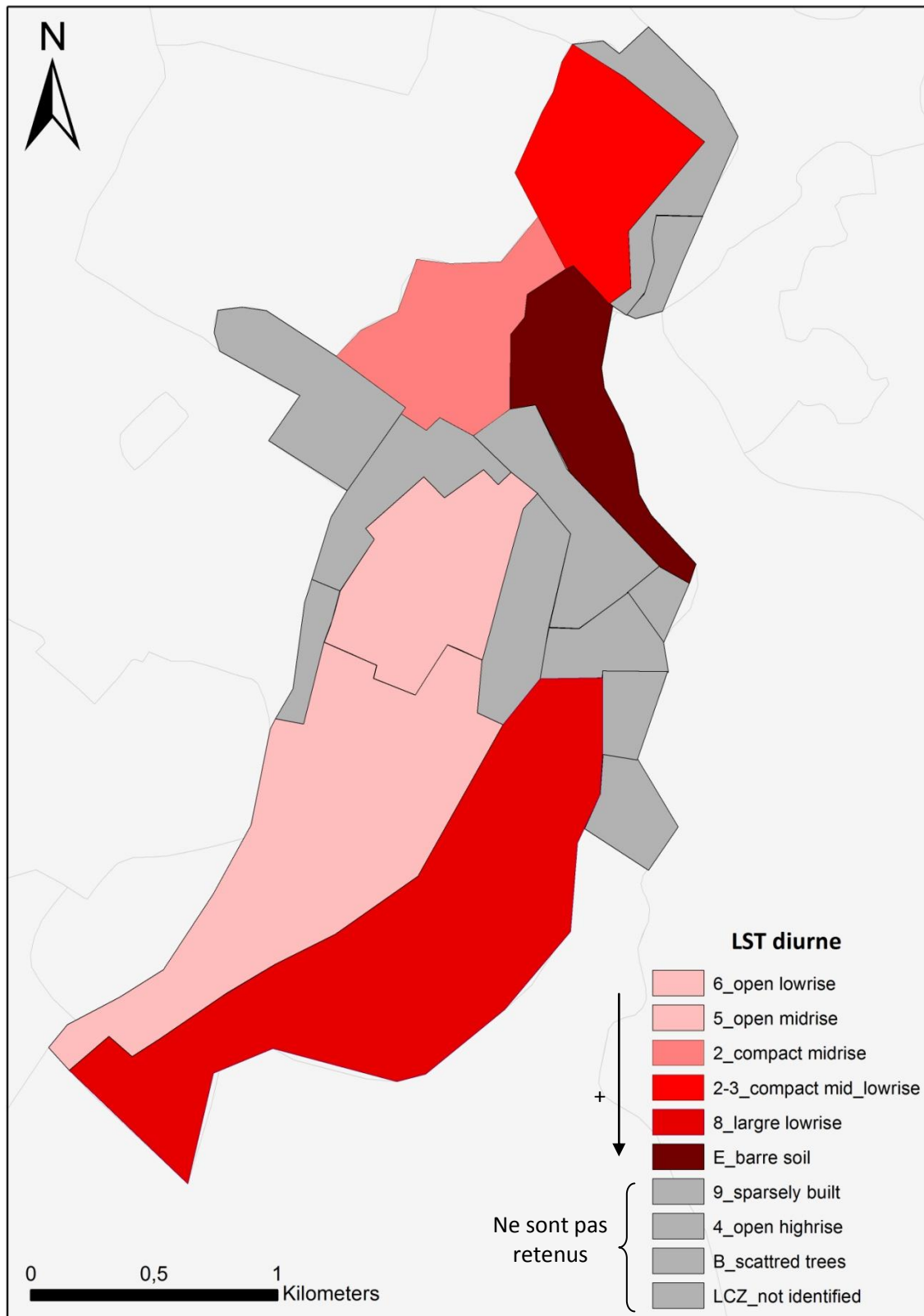


Figure 4.16: Carte des variations de température de surface diurne de l'étendue d'étude en fonction des zones climatiques retenues dans le travail. *Source (auteur, 2017).*

A la vue de cette carte, on peut constater que nos résultats diffèrent de ceux de l'hierarchie de Stewart dans l'ordre des zones par rapport à la température de surface. (Stewart I.D., et al., 2014) ont avancé que l'ordre proposé dans la figure (4.15) pourrait facilement être perturbé par les particularités locales (la forme urbaine, le relief, la chaleur anthropogénique ou l'humidité des sols). Le présent travail a été effectué dans un climat semi-aride via l'utilisation de température de surface LST, tandis que la classification de Stewart est principalement développée pour la température de l'air dans des villes ayant des caractéristiques différentes.

Il faut rappeler que cette partie ne tente pas de quantifier la magnitude d'ICU par LCZ, mais plutôt de valider le schéma de classification en exprimant les variations intra et interzones, via l'utilisation du LST (land surface temperature). Cette dernière dépend fortement de température des matériaux utilisés, ce qui justifie l'hétérogénéité dans la distribution de température à l'intérieur de quelques zones. Les écarts de températures se distinguent mieux en dehors de la période diurne, pour cela l'utilisation des images satellitaire nocturne pourrait être bénéfique. Le travail de (Skarbit N., et al., 2015) a confirmé cette appréciation. Cependant, ces données ne sont pas disponibles dans le cadre de ce travail.

Stewart I.D. et al., (2014) ont avancé *qu'un des avantages de la méthode LCZ est que chaque catégorie, ou classe, présente un comportement thermique unique qui permettrait d'établir par avance la possibilité d'un ICU entre les zones urbaines et rurales, ainsi que les variations thermiques entre les zones urbaines.* En partant de cette constatation, et en se basant sur l'hierarchie des rangs des températures journalières interzones (figure 4.15), (Villadiego Bernal K., 2014), a établi une carte hypothétique de l'intensité théorique des écarts de température diurne à Barranquilla en fonction des zones climatiques, qui lui a permis d'avancer sur la prévision d'un possible ICU dans la ville, et d'identifier les variables qui le favoriseraient et proposer des actions pour réduire leurs impacts. La carte a été validée en effectuant des observations de terrain dans cinq LCZ.

Au niveau de cette étude menée sur des quartiers à Constantine, une cartographie de l'intensité théorique du comportement thermique nocturne (figure 4.17) a été proposée en s'inspirant des résultats d'une étude expérimentale de (Stewart I.D, 2011a), dans laquelle le chercheur a proposé des limites de magnitude de températures de l'air nocturne

interzones. Les intervalles des valeurs indicatives suggérées sont présentés dans le tableau 4.8.

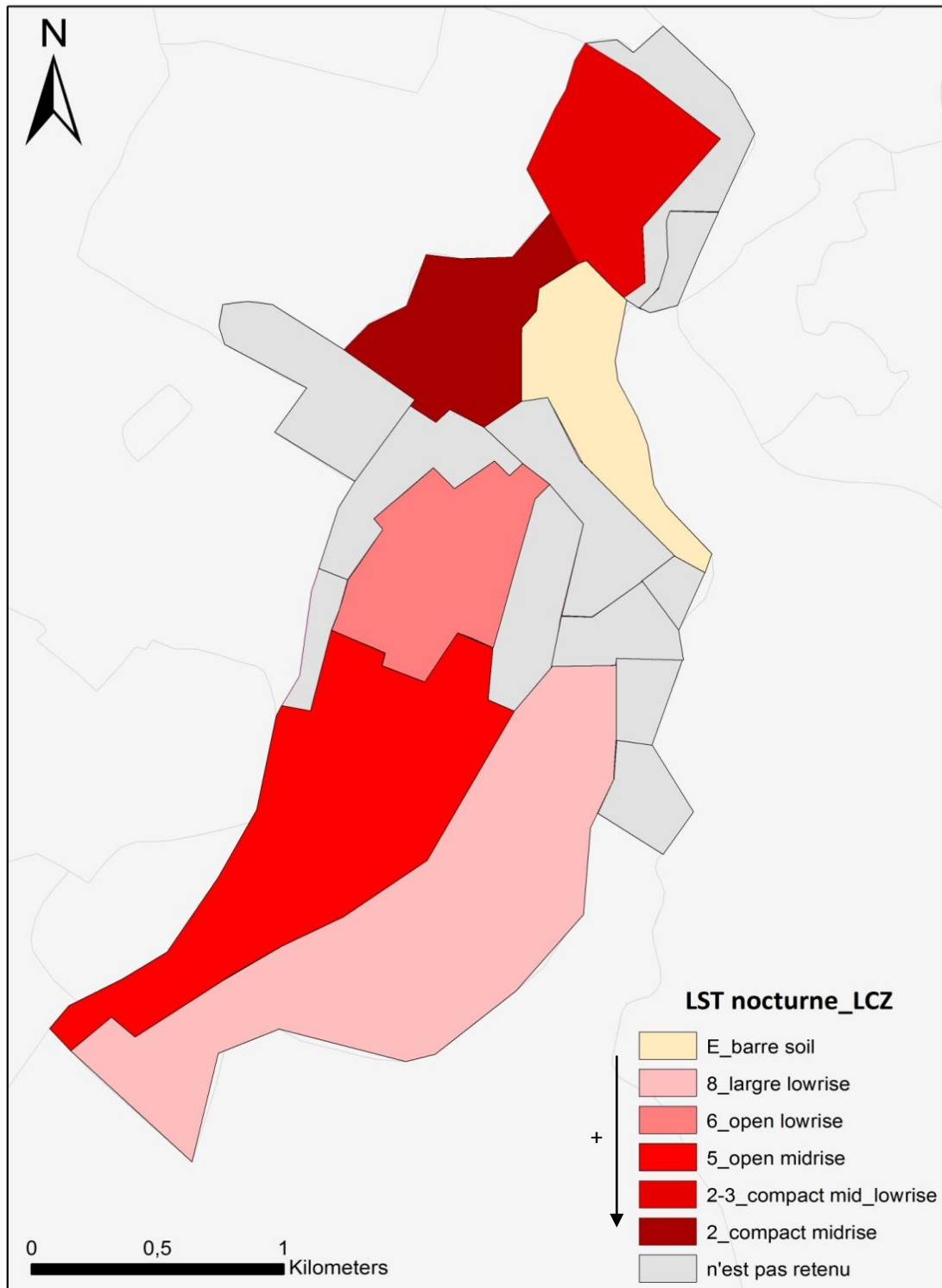


Figure 4.18: Températures de l'air mesurées dans la (LCZ2) et dans la zone (LCZ5). *Source :* (auteur, 2017)

Tableau 4.8 : Écart moyen nocturne suggéré par Stewart. *Source: adaptation du (Stewart I.D., 2011a)*

Large difference in fabric and morphology (exp: LCZ2 "compact midrise" and LCZF "bare soil")	Large UHI magnitude (>5°C)
Large difference in morphology or in fabric (exp: LCZ2 "compact midrise" and LCZ5 "open midrise")	Medium UHI magnitude (2 to 5°C)
Small difference in morphology and in fabric (exp: LCZ2 "compact midrise" and LCZ3 "compact lowrise")	Small UHI magnitude (<2°C)

La différenciation thermique des LCZ varie avec le degré de séparation de structure et des matériaux entre les zones⁸⁰, hypothétiquement, les classes doivent démontrer un gradient de température du plus compact vers le plus ouvert. La plus grande intensité de température se développerait au niveau du centre ville dominé par le type compact (LCZ2, LCZ2/3), s'expliquerait par le taux élevé d'imperméabilisation du sol (>97%) et la hauteur des constructions. En seconde place se trouve les fragments urbains ouverts (open midrise (LCZ5) suivi par la zone ouverte de basse hauteur (LCZ6) et la classe de grande surface (LCZ8)). La zone naturelle LCZF aurait un comportement favorable à la formation d'un îlot de fraîcheur.

Il faut rappeler qu'il s'agit seulement d'une proposition qui n'est pas définitive, elle reste à vérifier en effectuant des observations de terrain.

4.21.3. Les mesures in-situ:

Le travail sur terrain réalisé à travers la mise en place d'une campagne de mesure de température de l'air dans deux LCZs (la LCZ2 "compact Midrise" et la LCZ "Open Midrise"), vise à comparer les particularités climatiques de ces deux environnements. Les courbes de tendances de température de l'air sont illustrées dans la figure 4.18.

Les profils horaires de température de l'air montre que :

⁸⁰ Iain Stewart and Tim Oke, "1.1 Thermal Differentiation of Local Climate Zones Using Temperature Observations from Urban and Rural Field Sites," in *Ninth Symp. on Urban Environment, Keystone, CO, Amer. Meteor. Soc.*, 2010.

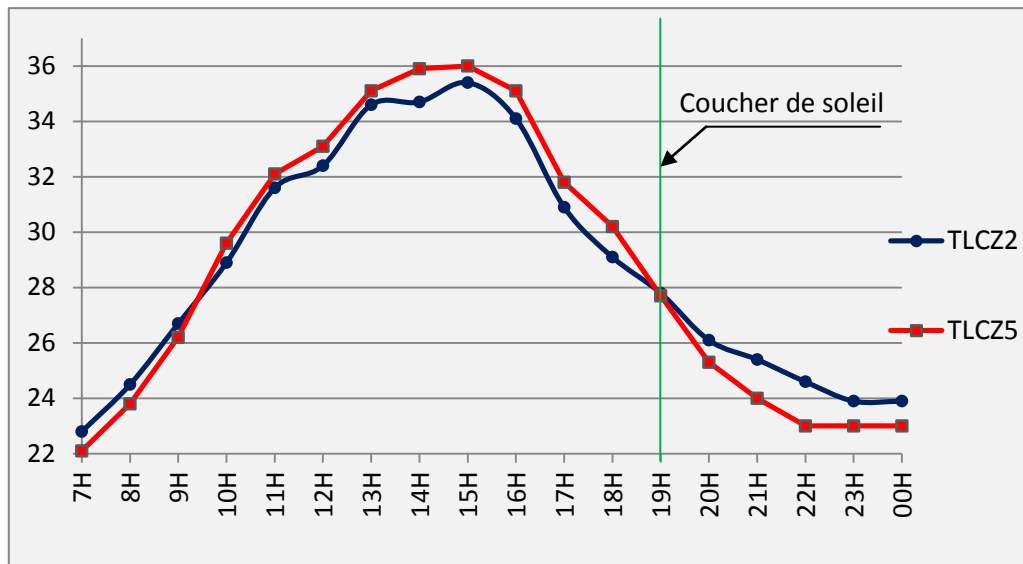


Figure 4.17 : carte hypothétique des variations de température nocturne de l'air de l'étendue d'étude en fonction des zones climatiques retenues dans le travail. *Source* : (Auteur, 2017)

En journée, la quantité d'énergie solaire captée augmente progressivement et participe à l'échauffement des surfaces urbaines, donc à l'accroissement des températures dans les deux zones, atteignant son max à environ 15h. Les valeurs de T_{air} enregistrées au niveau des deux fragments, ont une tendance très proche. La LCZ2 "compact Midrise" montre des T_{air} légèrement inférieures à celles observées à l'intérieur de la zone de type "Open Midrise", avec un faible écart varie entre 0,5 et 0,9°C.

Cette différence est imputable au fait que la pénétration du rayonnement solaire dans la zone LCZ5 (qualifiée comme étant dégagée), est plus important à cause de la valeur SVF élevé (0,59) par rapport à la LCZ2 (0,22).

Les résultats des observations effectuées à Uppsala par (Stewart I.D., Oke T.R., 2010), ont confirmé que la différence de température $\Delta T_{LCZ5 - LCZ2}$ est aussi faible de 0.8°C. Dans le travail de (Leconte F., et al, 2015a) sur la ville Nancy, l'écart constaté est inférieur à 0,4°C. (Villadiego Bernal K., 2014) dans son étude à Barranquilla a rapporté que les données horaires enregistrées montrent de petites variations diurnes dans la température de l'air. Ces résultats sont dans la même ligne avec l'appréciation de (Oke T.R., 1987) qui a avancé que les écarts de *température de l'air* diurne au sein d'une agglomération sont faibles.

Les résultats obtenus ici de T_{air} s'accordent avec la constatation précédente (comme le montre les simulations de température de surface LST réalisées plus haut), dans le fait que: $T_{\text{LCZ2}} < T_{\text{LCZ5}}$, mais différent dans la magnitude de différence de température, qui est plus important dans le cas du LST car cette dernière dépendent largement des températures des matériaux de surface.

Pendant la nuit, là où il n'y avait pas de rayonnement solaire directe dans les zones urbaines, les résultats de température de l'air ont tendance à inverser. Les valeurs observées dans la LCZ2 sont supérieures à celle de la zone ouverte avec écart max de $1,6^{\circ}\text{C}$ après trois à quatre heures du coucher du soleil. Ceci est attribué aux caractéristiques de surface des deux zones qui sont fortement différentes (matériaux et morphologie), et qui entraîne une différence dans la vitesse de refroidissement. Les pertes radiatives nettes vers le ciel sont développées dans la zone ouverte du fait des valeurs SVF élevé réduisant ainsi la température de l'air. A l'inverse, le piégeage radiatif au niveau des canyons de la zone compacte réduit considérablement le taux de refroidissement.

En vue du tableau (4.8) (magnitudes nocturnes proposée par Stewart), l'écart de température obtenue dans cette étude ($1,6^{\circ}\text{C}$) est inférieur à la limite proposée par le chercheur (2 à 5°C), par ailleurs, il montre des ressemblances avec celui obtenu à Nancy par (Leconte F., et al, 2015a), ($1,3$ à $1,8^{\circ}\text{C}$). Leconte F., et (2015a) ont avancé que la taille de l'agglomération et le nombre de population différente de Vancouver, Uppsala et Nagano, pourrait être une justification à cette différence.

4.22. Conclusion :

Le présent chapitre s'est intéressé à la mise en pratique du schéma de classification "LCZ" à l'échelle de quelques quartiers de l'agglomération de Constantine, dont l'objectif est de caractériser le comportement spatial thermique au sein de l'aire d'étude.

Le travail s'est articulé en trois phases :

La première a consisté à dresser une cartographie de l'étendue choisie en LCZ. Une typologie de catégories hiérarchisée en 9 LCZ a été établie. Certains fragments urbains n'ont pas été identifiés, il s'agit des zones hétérogènes en matière des caractéristiques de surface. A la suite de la cartographie du contexte, Six classes ont été retenues pour une

analyse approfondie. Les zones possédant un diamètre inférieur à 400m ont été écartées de l'étude.

La deuxième phase a porté sur la validation des classes qui consiste à interroger l'homogénéité de chaque zone climatique en matière de :

- propriétés de surface, et
- comportement spatial thermique.

S'agissant du premier point, un calcul des sept paramètres physique de surface urbaine sur dix, au niveau de site de control de chaque LCZ, a été opéré. Les données recueillies dans l'ensemble des LCZ ont démontré une correspondance acceptable avec les métadonnées des classes de référence suggérées par Stewart. Deux LCZ (LCZ2, LCZ2/3) ont révélé un certain décalage dans les valeurs observées par rapport aux bornes originales préconisées, lié au profil hétérogène de la forme urbaine à Constantine.

Pour le 2eme point, le travail de simulation développé, via l'utilisation de l'image satellitaire (15/7/2015), a permis de mettre en évidence que la plupart des LCZs possèdent un comportement thermique typique, globalement homogène et qu'il existe des variations dans les conditions microclimatiques entre les classes.

Une carte hypothétique des écarts nocturnes a été avancée, suggérant un gradient thermique allant des fragments plus compacts aux périphéries naturelles. Les observations in-situ de température de l'air au niveau de deux LCZ (LCZ5 "open midrise" et LCZ2 "compact midrise), ont permis d'enregistrer de faibles différences thermiques diurnes interzones. A l'inverse, le comportement nocturne, s'est amplifié et des températures plus élevée dans les zones compactes, validant ainsi la vision hypothétique d'ICU proposée.

Conclusion général :

Conclusion :

Le climat dans les villes a énormément évolué tout au long de ces dernières décennies, si de nombreuses manifestations peuvent expliquer cette évolution, la problématique de réchauffement local (ICU) est l'une des plus importantes à documenter. Dans ce contexte, la conception de l'espace urbain doit être réfléchi au-delà de la dimension physique en intégrant de nouvelles données d'ordre climatiques et environnementales.

Dans le cadre d'adaptation des villes aux interactions de climat, la compréhension des effets des différentes interventions et choix d'aménagements sur le climat local redevient un des impératifs pour les acteurs d'aménagement. Cependant, ceci est grandement conditionné par la disponibilité des informations détaillées concernant les aspects de formes et de fonction des villes. C'est dans ce contexte que ce travail a été initié. L'aspect qui constitue le cœur de la problématique de ce mémoire est lié au « *moyen d'action qui permet de quantifier l'influence des différents paramètres de surface urbaine sur la formation des ICUs, et de fournir des renseignements sous un format clair et mobilisable pour aider à la conception* ».

Afin de répondre à cette problématique, la recherche a été décomposée en sous-étapes. En préambule, une synthèse bibliographique relative à la climatologie urbaine a permis d'éclaircir les différents concepts et paramètres en relation avec le sujet du mémoire. Le chapitre a insisté sur les relations effets-causes qu'entretiennent la ville et le climat à l'échelle de la canopée urbaine.

Les tentatives pour quantifier la part de responsabilité des différents facteurs de surfaces urbaines dans la création des ICUs a été l'objet de réflexion du chapitre suivant. Les approches existantes y compris les simulations et les observations météorologiques ont été envisagées. A côté des restrictions liées aux outils de simulations, il a été mentionné que les données issues des études observationnelles sont très peu mobilisables pour les concepteurs des projets d'aménagement, imputables aux lacunes de communications interdisciplines. Dans ce cadre, quelques efforts visant à structurer les études observationnelles d'ICU en faisant appel aux approches de classification de paysage ont été abordés. Il a été démontré à travers une étude comparative, que le système de classification 'zone climatique local (LCZ), est l'outil le plus adapté pour répondre à l'objectif de ce mémoire qui consiste à la quantification d'ICU à Constantine.

La partie méthodologique qui vise à répondre à l'objectif de caractérisation de l'îlot de chaleur urbain, a été organisé autour deux parties:

L'objectif de la première partie est de réaliser un diagnostic climatique dans l'ensemble de l'agglomération de Constantine. La démarche méthodologique principale développée a consisté à établir une carte d'occupation du sol et une carte de spatialisation thermique de la ville, puis de les croiser dans le système d'information géographique (GIS) afin de localiser les champs spatiaux les plus vulnérables à l'accroissement des températures.

A partir des données satellitaires relative au territoire d'étude (landsat 8, OLI/TIRS, de 2015 en saison estivale), une cartographie préliminaire d'occupation du sol a été réalisé sur la totalité de l'agglomération de Constantine, aboutissant à la construction d'une hiérarchie de quatre types différents. Pour l'ensemble de la ville, l'indice de végétation (NDVI) et l'indice de bâti (NDBI) ont été ensuite calculés. La détermination de ces deux indicateurs a permis d'effectuer les corrections des erreurs relevées lors de l'établissement de la carte initiale. Après avoir construit la carte d'occupation du sol, l'étape suivante a consisté à analyser le comportement thermique de la ville. Durant cette phase l'objectif était de vérifier si la température de surface est sensible à la différence des types des propriétés biophysique de surface. Les résultats ont révélé un signal conforme à l'occupation du sol.

La définition de la magnitude d'ICU à Constantine –basée sur la différence entre l'urbain et le rural– s'avérait problématique, car elle a été l'objet d'interprétation différente, liée à la variété du contexte de l'arrière plan climatique sélectionné pour dérivé la température de référence (site rural). Deux contextes principaux ont été mis en évidence, un environnement rural présenté par la végétation et le contexte des terres dénudées. Les résultats ont indiqué la présence, à la fois, d'un îlot de chaleur urbain journalier et aussi d'un îlot de fraîcheur dans la ville. L'interprétation différente de magnitude d'ICU pourrait empêcher les comparaisons inter-ville.

Une étude quantitative a été ensuite menée, basée sur des simulations acquises en effectuant des profils de température de surface (LST), NDVI et NDBI. Les résultats obtenus ont démontré le fort potentiel de la présence de l'eau et de la végétation dans l'atténuation de la chaleur à Constantine. Ces résultats pourraient s'avérer utile dans le domaine d'aménagement urbain pour anticiper à l'ICU.

Ce travail de caractérisation d'ICU a été envisagé sur l'ensemble de territoire de l'agglomération, cette échelle a permis de fournir des renseignements globaux concernant les principaux leviers urbains susceptibles de réduire l'intensité de l'anomalie positive de température. Par contre, les informations à l'échelle locale et micro seront diluées avec cette dimension spatiale, tandis que ce sont les données d'ICU et les mesures d'adaptation à l'échelle d'une rue, d'un quartier, que les aménageurs souhaitent avoir accès. C'est dans ce contexte que la deuxième partie de la méthodologie a été développée, il s'agit de simplifier l'étude de l'agglomération en la dissociant à une étude climatique à l'échelle locale.

La deuxième partie de la méthodologie a visé à structurer l'étude climatique par l'application du schéma de classification LCZ à l'échelle de quelques quartiers de l'agglomération de Constantine. En s'inspirant de la méthode proposée par les inventeurs de système, la segmentation de paysage de l'aire d'étude a conduit à la différenciation de 20 classes regroupées en neuf LCZ dont sept sont de type 'built-up'. L'étape suivante a consisté à valider le type LCZ attribué à chaque fragment urbain.

L'étude est approfondie sur un échantillon réduit de six zones climatique. D'abord, les sept paramètres physiques de surface, liés à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol ont été quantifiés, les valeurs obtenues ont été ensuite comparées avec les bornes originales de référence de système de classification. L'objectif est d'analyser à quelle mesure les LCZ construites aboutissent sur une homogénéité en matière des caractéristiques de surface. Les résultats ont démontré une correspondance acceptable avec les différentes typologies du système.

La phase suivante a été guidée par son objectif qui a consisté à interroger l'homogénéité thermique de chaque fragment urbain étudié. Pour ce faire, des profils de températures ont été dérivés pour la date de 15/7/2015. A l'issue des interprétations de ses simulations, chaque LCZs est globalement représentative en termes des conditions microclimatiques thermiques régnées. Des écarts thermiques entre les zones étudiées ont été aussi enregistrés. Il a été démontré que les espaces les plus chauds ne sont pas le centre ville ancien de type compact, mais plutôt les secteurs ouverts.

La mise en pratique du système de classification, en aire d'étude à Constantine, à conduit à la construction des pans urbains représentatifs de point de vue des paramètres de surface urbaine et de dynamique spatiale thermique, donc à la possibilité de définir la

magnitude de température en effectuant des comparaisons interzones. Le système de classification LCZ a été principalement développé pour les études observationnelles de température de l'air, cette étude a permis de mettre en évidence la potentialité de l'utilisation des températures de surface dans la discrimination des différents LCZ.

En partant de ces considérations, une vision hypothétique d'un possible îlot de chaleur nocturne a été avancée, suggérant un gradient thermique allant des fragments les plus compacts aux plus ouverts. Une cartographie du site a été établie permettant l'interrogation de chaque LCZ en termes du niveau de vulnérabilité à la chaleur, cette carte hypothétique reste à valider. Une étude de cas a été réalisée au niveau de deux LCZ (LCZ5 "open midrise" et LCZ2 "compact midrise), basée sur un monitoring des données de température de l'air. Ces observations météorologiques ont aidé à tracer un diagnostic de températures de l'air dans les deux classes. De faibles oscillations thermiques caractérisant les mesures diurnes sont validées par plusieurs travaux de la littérature. Pour le comportement nocturne, l'écart interzone s'est amplifié et des températures plus élevées dans les zones compactes.

L'application du système de classification LCZ s'avère pertinent dans le domaine de climat urbain, il permet de classer le tissu urbain en fonction des propriétés de surface qui donnent lieu à des différences de température, et de fournir un regard général sur les conditions microclimatiques. Il définit la magnitude d'ICU de façon plus objective comme une différence de température interzone, ce qui facilite la comparaison avec d'autres villes. C'est un outil de cartographie, qui permet l'interrogation géographique de niveau de vulnérabilité à la chaleur de chaque LCZ, à travers laquelle on peut définir des traitements différenciés dans l'aménagement urbain.

Limites de la recherche :

Quelques restrictions liées à l'utilisation des images satellitaires sont avancées:

- D'abord, lorsqu'il s'agit d'une ville qui présente un profil moins homogène comme celui de Constantine, le processus de classification en utilisant des images satellitaires de 30 m montre quelques limites. Les données de haute résolution spatiale rendent indispensable l'acquisition de meilleurs résultats dans le domaine de la télédétection urbaine.

- Le travail s'est basé sur la température de surface dérivée d'une seule scène satellitaire (une seule date), une analyse multi-date pourrait être bénéfique, pour mieux comprendre les dynamiques thermo-spatiales de la ville.
- Ces résultats ne sont qu'une étude de cas où sont employées les températures de surfaces diurne. L'utilisation des images thermiques nocturnes peut fournir des informations plus utiles concernant l'ICU, qui est plus prononcé après le coucher du soleil.
- L'étude effectuée n'est qu'un point de départ pour l'analyse des ICUs à Constantine, à laquelle plusieurs facteurs (qui ne sont pas pris en considération dans cette étude) doivent être ajoutés, y compris : les effets de la topographie, la localisation géographique par rapport à la ventilation, les conditions climatiques locales...

A coté à ces restrictions, Certaines limitations ont été assignées à la méthodologie LCZ :

- D'abord, la détermination de la plupart des indicateurs urbains est une tâche difficile et longue (n'est pas automatique), surtout en absence d'une base de données de périmètre d'étude. Les méthodes de calculs procédées, telle l'estimation manuelle des fractions perméables et imperméables et l'aspect ratio, pourraient associer à des incertitudes. La précision des résultats obtenus est liée à la méthodologie de calcul, pour cela l'utilisation des images satellitaires de haute résolution pourrait être un alternatif.
- La procédure utilisée pour définir les contours des différentes LCZs, qui s'est basé sur l'estimation visuelle de l'auteur, pose des problèmes surtout dans le cas des villes qui présentent un profile hétérogène comme celui de Constantine. Des méthodes de construction automatiques, dont plusieurs existent dans la littérature, sont donc nécessaires.

Bibliographie

1. Ali-Toudert, F., and Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment* 41, 94–108
2. Alexander, P.J., and Mills, G. (2014). Local climate classification and Dublin's urban heat island. *Atmosphere* 5, 755–774.
3. Alexander, P.J., Mills, G., and Fealy, R. (2015). Using LCZ data to run an urban energy balance model. *Urban Climate* 13, 14–37.
4. Aniello, C., Morgan, K., Busbey, A., and Newland, L. (1995). Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS. *Computers & Geosciences* 21, 965–969.
5. Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23, 1–26.
6. Auer Jr, A.H. (1978). Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *Journal of Applied Meteorology* 17, 636–643.
7. Baklanov, A.A., and Nuterman, R.B. (2009). Multi-scale atmospheric environment modelling for urban areas. *Advances in Science and Research* 3, 53–57.
8. Bechtel, B. (2011). Multitemporal Landsat data for urban heat island assessment and classification of local climate zones. In 2011 Joint Urban Remote Sensing Event, (IEEE), pp. 129–132.
9. Bechtel, B., Langkamp, T., Böhner, J., Daneke, C., O's senbrügge, J., and Schempp, S. (2012). Classification and modelling of urban micro-climates using multisensoral and multitemporal remote sensing data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 39, 463–468.
10. Bechtel, B., Alexander, P.J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L., and Stewart, I. (2015a). Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4, 199–219.

11. Bechtel, B., Foley, M., Mills, G., Ching, J., See, L., Alexander, P., O'Connor, M., Albuquerque, T., Andrade, M. de F., Brovelli, M., et al. (2015b). CENSUS of Cities: LCZ Classification of Cities (Level 0)–Workflow and Initial Results from Various Cities. In ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment,.
12. Bellara, S.L., and Abdou, S. (2012). Effet de l'ombrage sur le confort thermique et visuel dans les espaces extérieurs: cas de l'esplanade de l'Université Mentouri de Constantine, Est de l'Algérie. *Nature & Technology* 7, 26–37.
13. Bellara, S.L., and Abdou, S. (2016). Vegetation effects on urban street microclimate and thermal comfort during overheated period under hot and dry climatic conditions. *Advanced Journal of Civil and Environmental Engineering* 6, 87–94.
14. Benidir, F. (2007). Urbanisme et planification urbaine, le cas de Constantine. thèse de doctorat d'état, université de Constantine.
15. Bhatti, S.S., and Tripathi, N.K. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & Remote Sensing* 51, 445–467.
16. Boucheriba, F. (2006). Impact de la géométrie des canyons urbains sur le confort thermique extérieur. Cas du Coudiat de Constantine. thèse de magister, Université Mentouri de Constantine.
17. Bourbia, F., and Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy* 35, 343–347.
18. Bouyer, J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains-Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
19. Bouyer, J., Musy, M., Huang, Y., and Athamena, K. (2009). Mitigating urban heat island effect by urban design: forms and materials. In *Proceedings of the 5th Urban Research Symposium, Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda*, Marseille, pp. 28–30.

20. Bouzekri, A., and Benmassaud, H. (2015). Use of Data of the Remote Sensing for Spatiotemporal Analysis Land Use Changes in the Eastern Aurès (Algeria). World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering 9, 955–958.
21. Bruse, M., and Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software 13, 373–384.
22. Caloz, R. (1992). Télédétection satellitaire: cours: système d'information géographique I et II (École polytechnique fédérale de Lausanne, Département de génie rural).
23. Champiat, C., du Rhône, D., Maissonny, M., Deguen, S., and Potelon, J.-L. (2008). Prévention des effets sanitaires des vagues de chaleur. Elaboration d'une méthodologie d'identification des îlots de chaleur urbains sur le territoire du Grand Lyon. Mémoire d'Ingénieur du Génie sanitaire Rennes: EHESP.
24. Chen, C. (2007). Image processing for remote sensing (CRC Press).
25. Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., and He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. International Journal of Climatology 32, 121–136.
26. Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X., and Yin, Z.-Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sensing of Environment 104, 133–146.
27. Chow, W.T., and Roth, M. (2006). Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. International Journal of Climatology 26, 2243–2260.
28. Cleugh, H.A., and Oke, T.R. (1986). Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, BC. Boundary-Layer Meteorology 36, 351–369.
29. Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat

- urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
30. Connors, J.P., Galletti, C.S., and Chow, W.T. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology* 28, 271–283.
 31. Coseo, P., and Larsen, L. (2014). How Local Climate Zones Predict Urban Heat Islands in Eight Chicago Neighborhoods. In *The Association of Collegiate Schools of Planning*, pp. 1–16.
 32. Davenport, A.G., Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., and Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. In *Proceedings 12th Conference on Applied Climatology*, Asheville, NC, American Meteorological Society, Boston, pp. 96–99.
 33. Deb, S.K., and Nathr, R.K. (2012). Land use/cover classification-An introduction review and comparison. *Global Journal of Research In Engineering* 12, 1-13
 34. Debbage, N. (2013). Sky-view factor estimation: A case study of Athens, Georgia. *The Geographical Bulletin* 54, 49.
 35. De Munck, C. (2013). Modélisation De La Végétation Urbaine Et Stratégies D'adaptation Pour L'amélioration Du Confort Climatique Et De La Demande Energétique En Ville. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
 36. Doya, M. (2010). Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle.
 37. Du, P., Liu, P., Xia, J., Feng, L., Liu, S., Tan, K., and Cheng, L. (2014). Remote sensing image interpretation for urban environment analysis: methods, system and examples. *Remote Sensing* 6, 9458–9474.
 38. Dubois, J.-M., Donnay, J.-P., Ozer, A., Boivin, F., and Lavoie, A. (1997). Télédétection des milieux urbains et périurbains (AUPELF-UREF).

39. Dubreuil, V., Quénot, H., Nédélec, V., Mallet, J.F., Durieux, L., and Maitelli, G. (2008). Etude de l'impact du changement de l'occupation du sol sur les températures dans la région d'Alta Floresta, Brésil. *Bulletin de La Société Géographique de Liège* 51, 79–90.
40. Efe, S.I., Cheke, L.A., and Ojoh, C.O. (2013). Effects of Solid Waste on Urban Warming in Warri Metropolis, Nigeria. *Atmospheric and Climate Sciences* 3, 6–12.
41. Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning* 48, 31–44.
42. Ellefsen, R. (1991). Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten us cities. *Energy and Buildings* 16, 1025–1049.
43. Emmanuel, R. (2005). Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment* 40, 1591–1601.
44. Fernando, H.J. (2012). *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements* (Crc Press).
45. Feyisa, G.L., Dons, K., and Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning* 123, 87–95.
46. Gal, T., Lindberg, F., and Unger, J. (2009). Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 111–123.
47. Gartland, L.M. (2012). *Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas* (Routledge).
48. Geletič, J., and Lehnert, M. (2016). GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports* 24, 2–12.
49. Geletič, J., Lehnert, M., and Dobrovolný, P. (2016). *Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities.*

Remote Sensing 8, 788.

50. Gémes, O., Tobak, Z., and Leeuwen, B. van (2016). Satellite based analysis of surface urban heat island intensity. *Journal of Environmental Geography* 9, 23–30.
51. Giannaros, T.M., and Melas, D. (2012). Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: the case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research* 118, 103–120.
52. Giguère, M. (2009). Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. *Revue de Littérature, Direction Des Risques Biologiques, Environnementaux et Occupationnels*, Institut National de Santé Publique, Gouvernement Du Québec.
53. Gomez, F., Gaja, E., and Reig, A. (1998). Vegetation and climatic changes in a city. *Ecological Engineering* 10, 355–360.
54. Guendouze B. (2014). La problématique du développement durable d'une ville minière Ouenza, une ville de l'est algérien. Thèse de Magistère, Université Badji Mokhtar.
55. Harman, I.N. (2003). The energy balance of urban areas. PhD thesis, University of Reading.
56. Harris, R., and Coutts, A. (2011). Airborne thermal remote sensing for analysis of the urban heat island. Melbourne: School of Geography and Environmental Science, Monash University.
57. Hebbert, M. (2014). Climatology for city planning in historical perspective. *Urban Climate* 10, 204–215.
58. Hoang, K.H., Bernier, M., and Villeneuve, J.-P. (2009). Les Changements De L'occupation Du Sol Dans Le Bassin Versant De La Rivière Cáu (Viêt-Nam). *Téledétection* 8, 227–236.
59. Houet, T., and Pigeon, G. (2011). Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors—an application on Toulouse urban area (France). *Environmental Pollution* 159, 2180–2192.

60. Jarraud, M. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation (wmo-no. 8).
61. Jusuf, S.K., Hien, W.K., La Win, A.A., Thu, H.K., Negara, T.S., and Xuchao, W. (2006). Study on effect of greenery in campus area. In Proceedings of PLEA Conference Proceedings,.
62. Juuso, S., Hjort, J., and Käyhkö, J. (2012). Effects of scale on modelling the urban heat island in Turku, SW Finland. *Climate Research* 55, 105–118.
63. King, V.J., and Davis, C. (2007). A case study of urban heat islands in the Carolinas. *Environmental Hazards* 7, 353–359.
64. Krayenhoff, S., Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2009). Estimating thermal responsiveness of local-scale climate “zones” with a numerical modeling approach. In Joint Eighth Symposium on the Urban Environment and Timothy R. Oke Symposium, Phoenix, AZ. American Meteorological Society.
65. Kumar, K.S., Bhaskar, P.U., and Padmakumari, K. (2012). Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using LANDSAT ETM+ image. *International Journal of Engineering Science and Technology* 4, 771–778.
66. Kuşçu, Ç., and Şengezer, B. (2011). Determination of heat islands from Landsat TM data: relationship between surface temperature and urbanization factors in Istanbul. In İçinde 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Sydney, Australia.
67. Lau, K.K.-L., Yim, S.H.L., Lai, D.Y.F., and Edward, N.G. (2015). Applying “Local Climate Zone (LCZ)” into a High-density High-rise Cities-A Pilot Study in Hong Kong. In ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, pp. 1–6.
68. Leconte, F. (2014). Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles: Cas de Nancy. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
69. Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R., and Pétrissans, M. (2015a). Estimation of

- spatial air temperature distribution at sub-mesoclimatic scale using the LCZ scheme and mobile measurements. In ICUC9 - 9 Th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment.
70. Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R., and Pétrissans, M. (2015b). Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment* 83, 39–49.
 71. Lehmann, S., and Sharifi, E. (2014). Local measures to mitigate the urban heat island effect in hot and humid climate: comparative case study of Sana'a, Bushehr and Dubai Marina. *International Journal of Development and Sustainability* 3, 38–54.
 72. Li, H., and Liu, Q. (2008). Comparison of NDBI and NDVI as indicators of surface urban heat island effect in MODIS imagery. In *International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis*, (International Society for Optics and Photonics), pp. 728503–728503.
 73. Liang, S., Fang, H., and Chen, M. (2001). Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, 2490–2498.
 74. Liang, S., Fang, H., Morissette, J.T., Chen, M., Shuey, C.J., Walthall, C.L., and Daughtry, C.S. (2002). Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. II. Validation and applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40, 2736–2746.
 75. Liu, K., Su, H., Zhang, L., Yang, H., Zhang, R., and Li, X. (2015). Analysis of the urban heat island effect in Shijiazhuang, China using satellite and airborne data. *Remote Sensing* 7, 4804–4833.
 76. Lo, C.P., Quattrochi, D.A., and Luvall, J.C. (1997). Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing* 18, 287–304.
 77. Lowry, W.P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology* 16, 129–135.

78. Lwin, K.K., and Murayama, Y. (2013). Evaluation of land cover classification based on multispectral versus pansharpened landsat ETM+ imagery. *GIScience & Remote Sensing* 50, 458–472.
79. MacKillop, F. (2012). Climatic city: Two centuries of urban planning and climate science in Manchester (UK) and its region. *Cities* 29, 244–251.
80. Mansouri, O. (2008). L'influence de la réflectivité des matériaux (Albedo) sur la modification du microclimat et le confort thermique extérieur dans un canyon urbain: Cas du Coudiat de Constantine. Thèse de magister, Université Mentouri de Constantine.
81. Martin, P. (2008). Analyse diachronique du comportement thermique de Montréal en période estivale de 1984 à 2005. Université du Québec.
82. Masson, V. (2006). Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 35–45.
83. Masson, V., Marchadier, C., Adolphe, L., Aguejdad, R., Avner, P., Bonhomme, M., Bretagne, G., Briottet, X., Bueno, B., de Munck, C., et al. (2014). Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach. *Urban Climate* 10, 407–429.
84. Milošević, D.D., Savić, S.M., Unger, J., and Gál, T. (2015). Urban climate monitoring system suitability for intra-urban thermal comfort observations in Novi Sad (Serbia)–with 2014 examples. In *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*,.
85. Mirzaei, P.A., and Haghghat, F. (2010). Approaches to study urban heat island–abilities and limitations. *Building and Environment* 45, 2192–2201.
86. Mohan, M., Kikegawa, Y., Gurjar, B.R., Bhati, S., Kandya, A., and Ogawa, K. (2012). Urban heat island assessment for a tropical urban airshed in India. 2, 127–138.
87. Molnár, G. (2016). Analysis of land surface temperature and NDVI distribution for Budapest using Landsat 7 ETM+ data. *Acta Climatologica Et Chorologica* 49, 49–61.

88. Morris, C.J.G., and Simmonds, I. (2000). Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology* 20, 1931–1954.
89. Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., and Cai, X.-M. (2013). Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94, 1161–1185.
90. Najjar, G., Kastendeuch, P., Ringenbach, N., Colin, J.R., Stoll, M.P., Nerry, F., Bernard, J., De Hatten, A., Luhahe, R., and Viville, D. (2005). Bilans radiatif et d'énergie dans un canyon urbain. *Annales de l'AIC* 2, 41–54.
91. Nawel, A.-B. (2006). La Relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bâti. Thèse de magistère, Université de Constantine.
92. Nduka, I.C., and Abdulhamed, A.I. (2011). Classifying urban climate field sites by “thermal climate zones” the case of Onitsha metropolis. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 3, 75–80.
93. Ng, Y.X. (2015). A Study of Urban Heat Island using “Local Climate Zones”—The Case of Singapore. *British Journal of Environment & Climate Change* 5, 116–133,.
94. Noilhan, J., and Mahfouf, J.-F. (1996). The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change* 13, 145–159.
95. Oke, T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967) 7, 769–779.
96. Oke, T.R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere* 14, 268–277.
97. Oke, T.R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* 1, 237–254.
98. Oke, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. 2nd. Methuen, 289p.

99. Oke, T.R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Rapport technique 81, World Meteorological Organization.
100. Oke, T.R., and Stewart, I.D. (2013). Local Climate Zones, Towards a Protocol for Assessing Heat Island Magnitude in the Canopy Layer. In icuc8_dublin2.
101. Paolini, R., Mainini, A.G., Poli, T., and Vercesi, L. (2014). Assessment of thermal stress in a street canyon in pedestrian area with or without canopy shading. *Energy Procedia* 48, 1570–1575.
102. Perera, N.G.R., and Emmanuel, M.P.R. (2015). A“ Local Climate Zone” based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka. In ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment,.
103. Perera, N.G.R., and Langappuli, B.L.T. (2013). Surface Fraction as a variable for Urban Heat Island Amelioration in Colombo. FARU International Research Symposium 2013 13th and 14th December 2013, At Hambantota, Sri Lanka.
104. Perera, N.G.R., and Samanthilaka, K. (2014). Effect of Street Canyon Materials on the Urban Heat Island Phenomenon in Colombo. In Proceedings of International Conference on Cities, People and Places, pp. 1–12.
105. Perera, N.G.R., Emmanuel, M.P.R., and Mahanama, P.K.S. (2012). 576: Mapping “Local Climate Zones” and relative Warming Effects in Colombo, Sri Lanka. In ICUC8–8th International Conference on Urban Climates. Dublin, Ireland.
106. Perera, N.G.R., Emmanuel, M.P.R., and Mahanama, P.K.S. (2013). Projected urban development, changing “Local Climate Zones” and relative warming effects in Colombo, Sri Lanka. In International Conference on “Cities, People and Places”-ICCPP-2013.
107. Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., and Hidalgo, J. (2008). De l’observation du microclimat urbain à la modelisation intégrée de la ville.

Météorologie 39–47.

108. Provencher, L., and Dubois, J.M. (2007). Précis de télédétection: Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image (Puq).
109. Puliafito, S.E., Bochaca, F.R., Allende, D.G., and Fernandez, R. (2013). Green areas and microscale thermal comfort in arid environments: A case study in Mendoza, Argentina. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3, 372–384.
110. Ren, C., Lau, K.L., Yiu, K.P., and Ng, E. (2013). The application of urban climatic mapping to the urban planning of high-density cities: The case of Kaohsiung, Taiwan. *Cities* 31, 1–16.
111. Rizwan, A.M., Dennis, L.Y., and Chunho, L.I.U. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* 20, 120–128.
112. Roberts, S.M., Oke, T.R., Grimmond, C.S.B., and Voogt, J.A. (2006). Comparison of four methods to estimate urban heat storage. *Journal of Applied Meteorology And Climatology* 45, 1766–1781.
113. Rosheidat, A. (2014). Optimizing the effect of vegetation for pedestrian thermal comfort and urban heat island mitigation in a hot arid urban environment. PhD thesis, Arizona state university.
114. Rosheidat, A., Bryan, H., and Hoffman, D. (2008). Using Envi-met Simulation as a Tool to Optimize Downtown Phoenix's Urban Form for Pedestrian Comfort. In *SOLAR 2008: Catch the Clean Energy Wave, Including 37th ASES Annual Conference, 33rd National Passive Solar Conference and 3rd Renewable Energy Policy and Marketing Conference*.
115. Roux, J. (2014). L'Ilot de Chaleur Urbain à Dijon. Mémoire de master, Université de Bourgogne.
116. Roth, M., Emmanuel, R., Ichinose, T., and Salmond, J. (2011). ICUC-7 Urban Climate Special Issue. *International Journal of Climatology* 31, 159–161.
117. Sailor, D.J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat

- and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology* 31, 189–199.
118. Sakhy, A., Madelin, M., and Beltrando, G. (2011). Les échelles d'étude de l'îlot de chaleur urbain et ses relations avec la végétation et la géométrie de la ville (exemple de Paris). In *Dixièmes Rencontres de Théo Quant*,.
 119. Sandholt, I., Rasmussen, K., and Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment* 79, 213–224.
 120. Santamouris, M. (2004). *Cooling the cities* (Presses des MINES).
 121. Savić, S., Milošević, D., Lazić, L., Marković, V., Arsenović, D., and Pavić, D. (2013). Classifying Urban Meteorological Stations Sites by “Local Climate Zones”: Preliminary Results for the City of Novi Sad (Serbia). *Geographica Pannonica* 17, 60–68.
 122. Schmid, H.P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology* 113, 159–183.
 123. Sharifi, E., and Lehmann, S. (2014). Comparative analysis of surface urban heat island effect in central Sydney. *Journal of Sustainable Development* 7, 23.
 124. Shigeta, Y., Ohashi, Y., and Tsukamoto, O. (2009). Urban Cool Island in daytime- analysis by using thermal image and air temperature measurements. In *The Seventh International Conference on Urban Climate*,.
 125. Siu, L.W., and Hart, M.A. (2013). Quantifying urban heat island intensity in Hong Kong SAR, China. *Environmental Monitoring and Assessment* 185, 4383–4398.
 126. Skarbit, N., and Gál, T. (2015). Urban surface parameter (SVF, roughness) calculation using 3D urban database. http://real.mtak.hu/28576/1/POSTER_12-2-1531002_a.pdf.
 127. Skarbit, N., Gal, T., and Unger, J. (2015). Airborne surface temperature

- differences of the different Local Climate Zones in the urban area of a medium sized city. In Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2015 Joint, (IEEE), pp. 1–4.
128. Souza, D.O. de, and dos Santos Alvalá, R.C. (2014). Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil. *Meteorological Applications* 21, 186–193.
 129. Stewart, I.D. (2007). Landscape representation and the urban-rural dichotomy in empirical urban heat island literature, 1950–2006. *Acta Climatologica et Chorologica* 40, 111–121.
 130. Stewart, I.D. (2011a). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology* 31, 200–217.
 131. Stewart, I.D. (2011b). Redefining the urban heat island. University of British Columbia.
 132. Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2009a). Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: The case of Nagano, Japan. In IN: Seventh International Conference on Urban Climate,.
 133. Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2011). the local climate zone classification system: Origins, development, and application to urban heat islands. In Of the Association of American Geographers Annual Meeting, Seattle, WA, USA,.
 134. Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2006). Methodological concerns surrounding the classification of urban and rural climate stations to define urban heat island magnitude. *Preprints of ICUC6 Göteborg* 431.
 135. Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 1879–1900.
 136. Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2009b). Newly developed “thermal climate zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In Eighth Symposium on Urban Environment, Phoenix, AZ,.

137. Stewart, I.D., and Oke, T.R. (2010). 1.1 thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. In Ninth Symp. on Urban Environment, Keystone, CO, Amer. Meteor. Soc.,
138. Stewart, I.D., Oke, T.R., and Krayenhoff, E.S. (2014a). Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology* 34, 1062–1080.
139. Stone Jr, B., and Rodgers, M.O. (2001). Urban form and thermal efficiency: how the design of cities influences the urban heat island effect. *Journal of the American Planning Association* 67, 186–198.
140. Streutker, D.R. (2002). A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing* 23, 2595–2608.
141. Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings* 25, 99–103.
142. Thomas, G., Sherin, A.P., Ansar, S., and Zachariah, E.J. (2014). Analysis of urban heat island in Kochi, India, using a modified local climate zone classification. *Procedia Environmental Sciences* 21, 3–13.
143. Tukiran, J.M., Ariffin, J., and Ghani, A.N.A. (2015). Review on urban heat island mitigation strategy through vegetation and pavements characterization. *Advances in Environmental Biology* 9, 1–3.
144. Unger, J., Savić, S., and Gál, T. (2011). Modelling of the annual mean urban heat island pattern for planning of representative urban climate station network. *Advances in Meteorology* 2011, 1–9.
145. Unger, J., Lelovics, E., and Gál, T. (2014). Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin* 63, 29–41.
146. Villadiego Bernal, K. (2014). Une lecture de la forme urbaine et des microclimats: le cas de Barranquilla. Thèse de doctorat, université Aix-Marseille.
147. Vinet, J. (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéroulque du microclimat urbain. Caractérisation de l’impact de l’eau et de la végétation sur les

- conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
148. Voogt, J.A., and Oke, T.R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* 86, 370–384.
 149. Vyas, A., Shastri, B., and Joshi, Y. (2014). Spatio-Temporal Analysis of UHI using Geo-Spatial Techniques: A case study of Ahmedabad. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40, 997.
 150. Vysoudil, M. (2015). Urban space and climate: Introduction to the Special Issue. *Moravian Geographical Reports* 23, 2–7.
 151. Wang, Z.-H. (2014). Monte Carlo simulations of radiative heat exchange in a street canyon with trees. *Solar Energy* 110, 704–713.
 152. Wang, J., Wang, K., and Wang, P. (2007). Urban heat (or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature. *Journal Of Remote Sensing-Beijing- 11*, 330.
 153. Wang, Z., Xing, W., Huang, Y., and Xie, T. (2016). Studying the Urban Heat Island Using a Local Climate Zone Scheme. *Polish Journal of Environmental Studies* 25, 2609–2616.
 154. Weber, C. (1995). *Images satellitaires et milieu urbain* (Paris).
 155. Wei, C.Z., and Blaschke, T. (2016). Identifying Local Scale Climate Zones Of Urban Heat Island From Hj-1b Satellite Data Using Self-Organizing Maps. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 40.
 156. Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 335–344.
 157. Weng, Q., and others (2010). *Remote sensing and GIS integration: theories, methods, and applications* (McGraw-Hill New York).

158. Xu, H. (2007). Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic oriented index combination technique. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73, 1381–1391.
159. Xu, H., Wang, X., Xiao, G., and others (2000). A remote sensing and GIS integrated study on urbanization with its impact on arable lands: Fuqing City, Fujian Province, China. *Land Degradation & Development* 11, 301–314.
160. Yang, J., Wang, Z.-H., and Kaloush, K.E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a “silver bullet” for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, 830–843.
161. Zha, Y., Gao, J., and Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24, 583–594.
162. Zhang, Y., Yiyun, C., Qing, D., and Jiang, P. (2012). Study on urban heat island effect based on Normalized Difference Vegetated Index: a case study of Wuhan City. *Procedia Environmental Sciences* 13, 574–581.
163. Zhou, Y., Weng, Q., Gurney, K.R., Shuai, Y., and Hu, X. (2012). Estimation of the relationship between remotely sensed anthropogenic heat discharge and building energy use. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67, 65–72.
164. Modélisation urbaine: de la représentation au projet - ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Modelisation-urbaine-de-la.html>.

Annexe A.1 :
**L'ensemble des « DATASHEETS » qui décrivent
les dix-sept zones climatiques locales (LCZ)**

LCZ

COMPACT HIGHRISE

1

DEFINITION

Form: Dense mix of tall buildings to tens of stories. Buildings free-standing, closely spaced. Sky view from street level significantly reduced. Buildings of steel, concrete, and glass construction. Land cover mostly paved; few or no trees. High space heating/cooling demand. Heavy traffic flow. **Function:** Commercial (office buildings, hotels); residential (apartment towers). **Location:** Core (downtown, central business district); periphery (highrise subcentre, highrise sprawl). **Correspondence:** UCZ1 (Oke 2004); Dc1 and Dc8 (Ellefsen 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

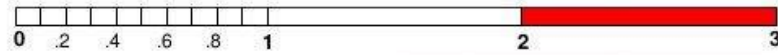
Sky view factor

0.2 – 0.4



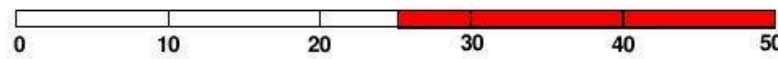
Canyon aspect ratio

> 2



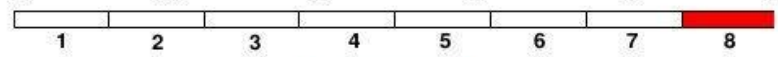
Mean building height

> 25 m



Terrain roughness class

8



Building surface fraction

40 – 60 %



Impervious surface fraction

40 – 60 %



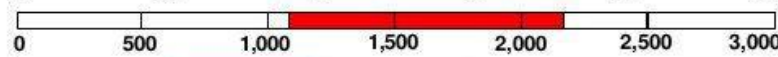
Pervious surface fraction

< 10 %



Surface admittance

1,100 – 2,200 J m⁻² s^{1/2} K⁻¹



Surface albedo

0.10 – 0.20



Anthropogenic heat flux

50 – 300 W m⁻²



Figure A.1.1: LCZ 01 -Compact high-rise-

DEFINITION

Form: Attached or closely spaced buildings 3–9 stories tall. Buildings separated by narrow streets and inner courtyards. Buildings uniform in height. Sky view from street level significantly reduced. Heavy building materials (stone, concrete, brick, tile) and thick roofs and walls. Land cover mostly paved; few or no trees. Moderate space heating/cooling demand. Moderate to heavy traffic flow. **Function:** Residential (multi-unit housing; multistorey tenements); commercial (office buildings, hotels, retail shops); industrial (warehouses, factories). **Location:** Core (old city, old town; inner city, central business district); periphery (high-density sprawl). **Correspondence:** UCZ2 (Oke, 2004); A1, A2, A4, Dc2 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

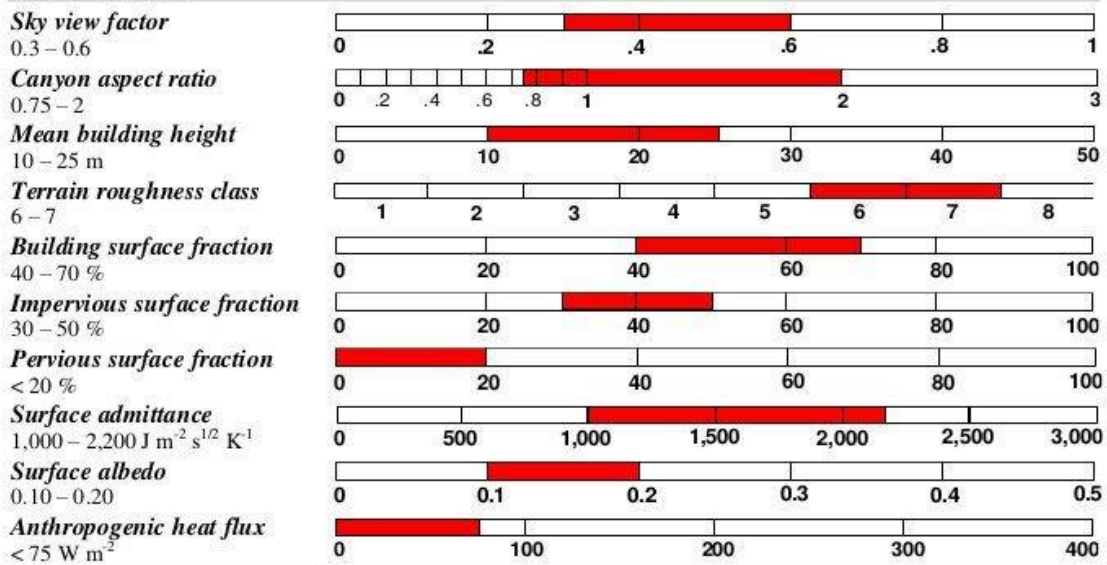


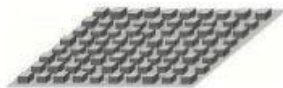
Figure A.1.2: LCZ 02 -compact midrise-

DEFINITION

Form: Attached or closely spaced buildings 1–3 stories tall. Buildings small and tightly packed along narrow streets, often without discernable alignment. Sky view from street level significantly reduced. Heavy building materials (stone, concrete, brick, tile) and thick roofs and walls. Land cover mostly paved; few or no trees. Moderate space heating/cooling demand. Low-moderate traffic flow. **Function:** Residential (single-unit housing, high-density terrace/row housing); commercial (small retail shops). **Location:** Old or densely populated cities, towns, villages. Core (central or inner city); periphery (high-density sprawl). **Correspondence:** UCZ3 (Oke, 2004); Dc3 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

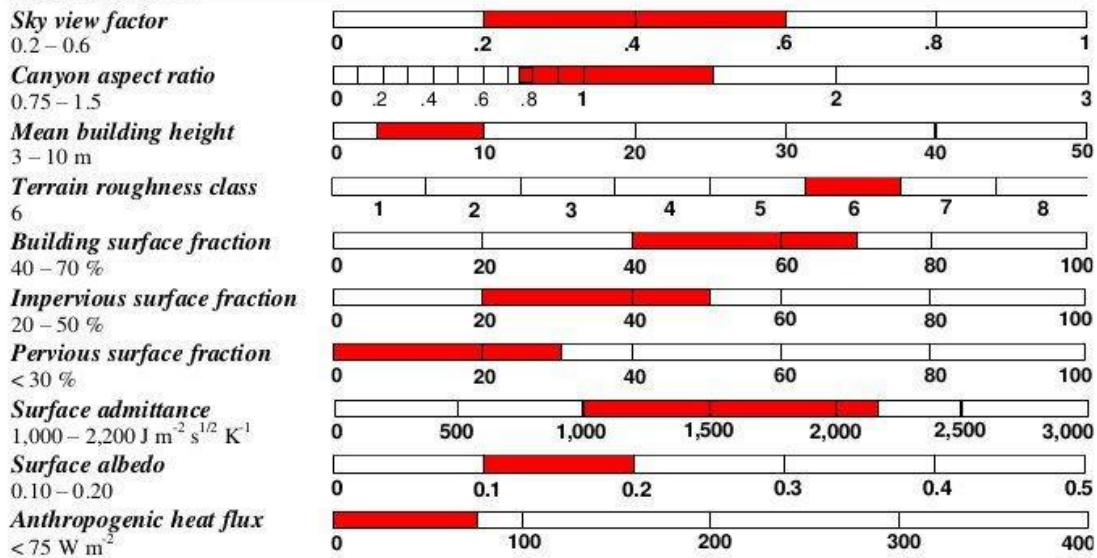


Figure A.1.3: LCZ 03 -compact lowrise-

DEFINITION

Form: Buildings tens of stories tall, set in open, geometric arrangement. Buildings uniform in height, width, and spacing. Sky view from ground level significantly reduced. Heavy building materials (concrete, steel, stone, glass) and thick roofs and walls. Roofs typically flat. Scattered trees and abundant plant cover. Moderate-low space heating/cooling demand. Moderate traffic flow. **Function:** Residential (apartment blocks, highrise housing estates, multistorey tenements). **Location:** Periphery. Densely populated cities. Socialist-style cities. **Correspondence:** Do2 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



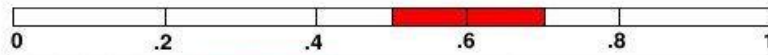
Low level



PROPERTIES

Sky view factor

0.5 – 0.7



Canyon aspect ratio

0.75 – 1.25



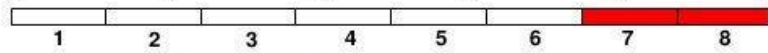
Mean building height

> 25 m



Terrain roughness class

7 – 8



Building surface fraction

20 – 40 %



Impervious surface fraction

30 – 40 %



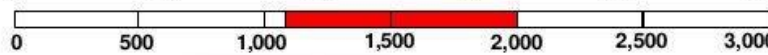
Pervious surface fraction

30 – 40 %



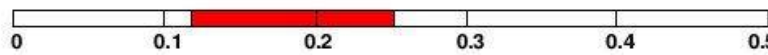
Surface admittance

1,100 – 2,000 J m⁻² s^{1/2} K⁻¹



Surface albedo

0.12 – 0.25



Anthropogenic heat flux

< 50 W m⁻²

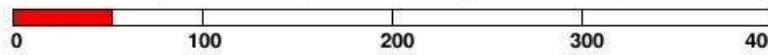


Figure A.1.4: LCZ 04 - Open Highrise -

DEFINITION

Form: Open arrangement of buildings 3–9 stories tall. Sky view from street level slightly reduced. Heavy building materials (concrete, steel, stone, glass) and thick roofs and walls. Scattered trees and abundant plant cover. Low space heating/cooling demand. Low traffic flow. **Function:** Residential (multi-unit housing, multistorey tenements, apartment blocks); institutional (research/business parks, campuses); commercial (office buildings, hotels). **Location:** Periphery. **Correspondence:** UCZ6 (Oke, 2004); Do6 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

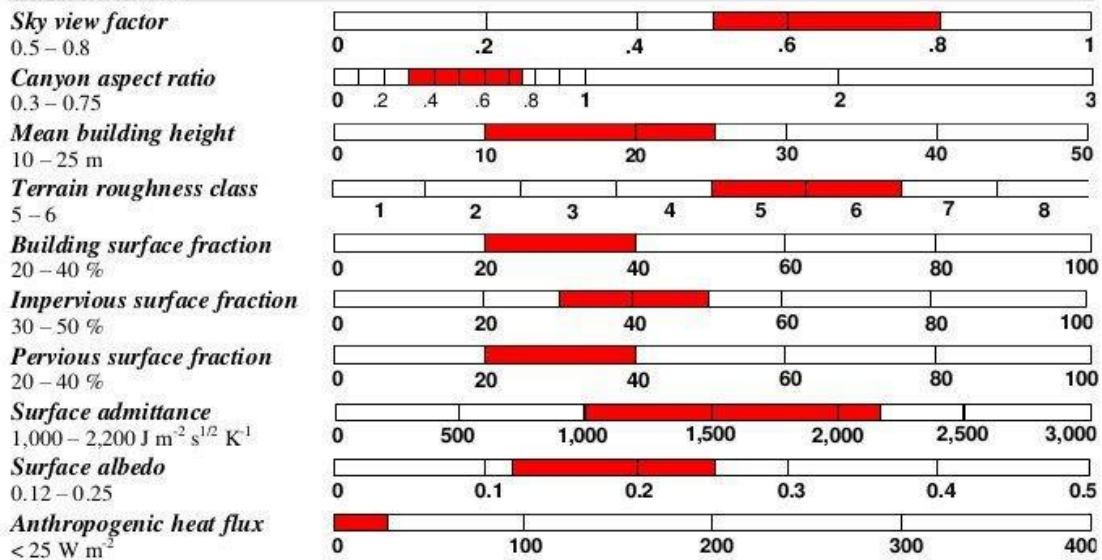


Figure A.1.5: LCZ 05 - Open Midrise-

DEFINITION

Form: Small buildings 1–3 stories tall; detached or attached in rows, often in grid pattern. Sky view from street level slightly reduced. Building materials vary (wood, brick, stone, tile). Scattered trees and abundant plant cover. Low space heating/cooling demand. Low traffic flow. **Function:** Residential (single or multi-unit housing, low density terrace/row housing); commercial (small retail shops). **Location:** City (medium density); periphery (suburbs). Commuter towns. Rural towns. **Correspondence:** UCZ5 (Oke 2004); Do3 (Ellefsen 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

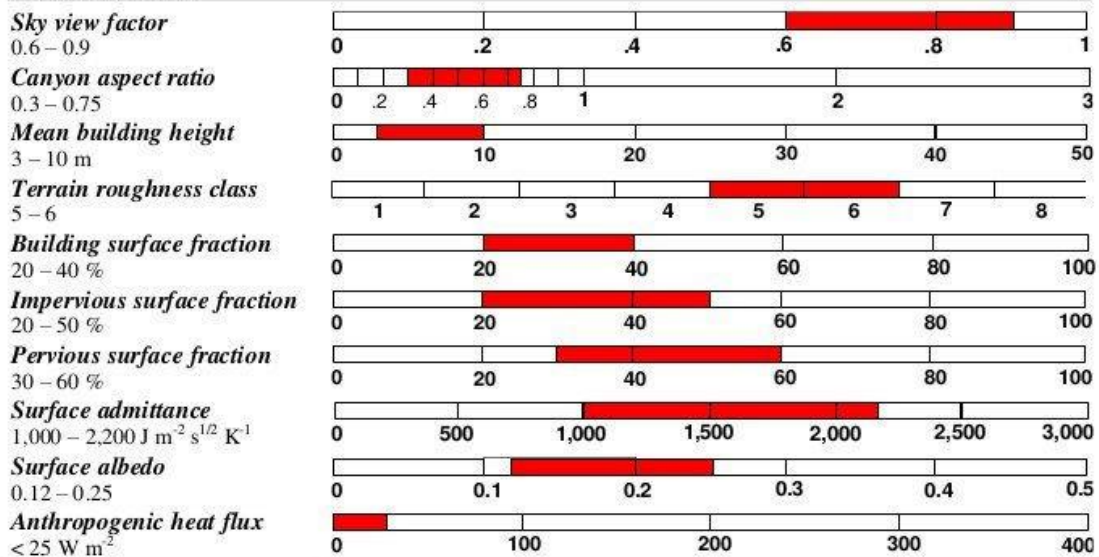


Figure A.1.6: LCZ 06 -Open Lowrise-

DEFINITION

Form: Single-story buildings set in compact (often formless) arrangement, attached or closely spaced. Buildings separated by narrow roads and alleys. Little or no consolidated infrastructure. Sky view from ground level significantly reduced. Lightweight building materials (thatch, wood, bamboo, corrugated metal); thin walls and flat roofs. Few or no trees. Land cover hard packed (bare soil, sand). Population density high. Space heating/cooling demand nil. Low traffic flow. **Function:** Residential (informal settlements, low-cost housing, shantytowns, squatter settlements, mobile housing); agricultural (small-holder lots). **Location:** Periphery of large, developing cities. Extended metropolitan regions. Inner city. Rural towns.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

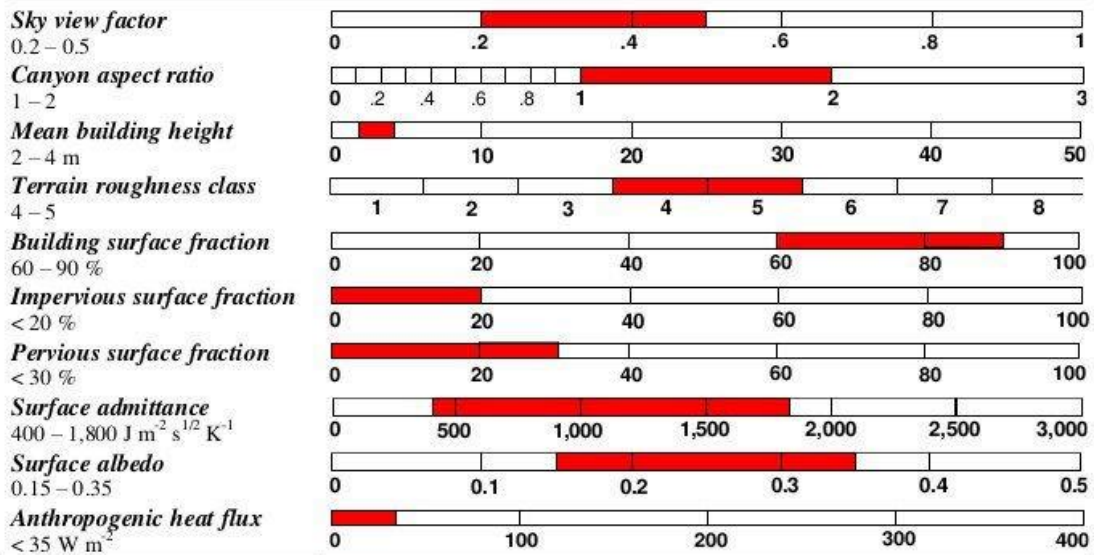


figure A.1.7: LCZ 07 -Lightweight low-rise-

DEFINITION

Form: Large, low buildings 1–3 stories tall, separated by extensive paved surfaces. Buildings extend outward not upward; roofs flat. Sky view from ground level slightly reduced. Building materials vary (steel, concrete, metal). Few or no trees; land cover mostly paved. Moderate-low space heating/cooling demand. Moderate-heavy traffic flow. **Function:** Light industrial (modern warehousing); commercial (shopping centres, storage facilities); transportation hub (air, rail, truck, ship). **Location:** Periphery. **Correspondence:** UCZA (Oke, 2004); Do1, Do4 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

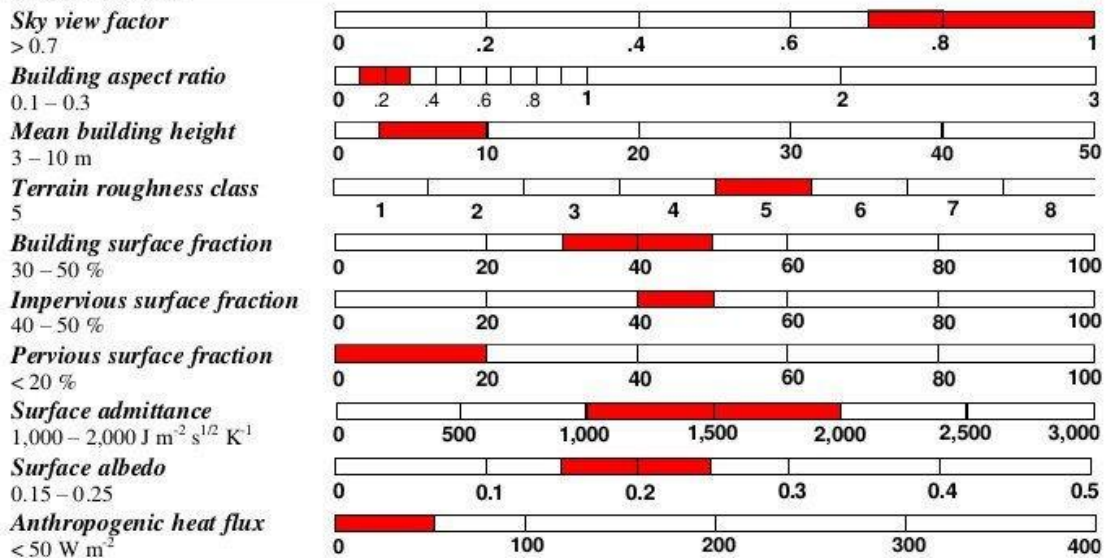


Figure A.1.8: LCZ 08 -Large Low-Rise-

DEFINITION

Form: Small or medium-sized buildings widely spaced across natural landscape. Full sky view from ground level. Building materials vary. Scattered trees and abundant plant cover. Space heating/cooling demand negligible. Low traffic flow. **Function:** Residential (single or multi-unit housing); commercial (retail shops, office buildings); institutional (research/business parks, campuses); agricultural (farms, country estates). **Location:** Periphery (low-density suburbs). Extended metropolitan regions. Newly developed urban tracts. Rural towns. Lightly settled countryside. **Correspondence:** UCZ7 (Oke, 2004).

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

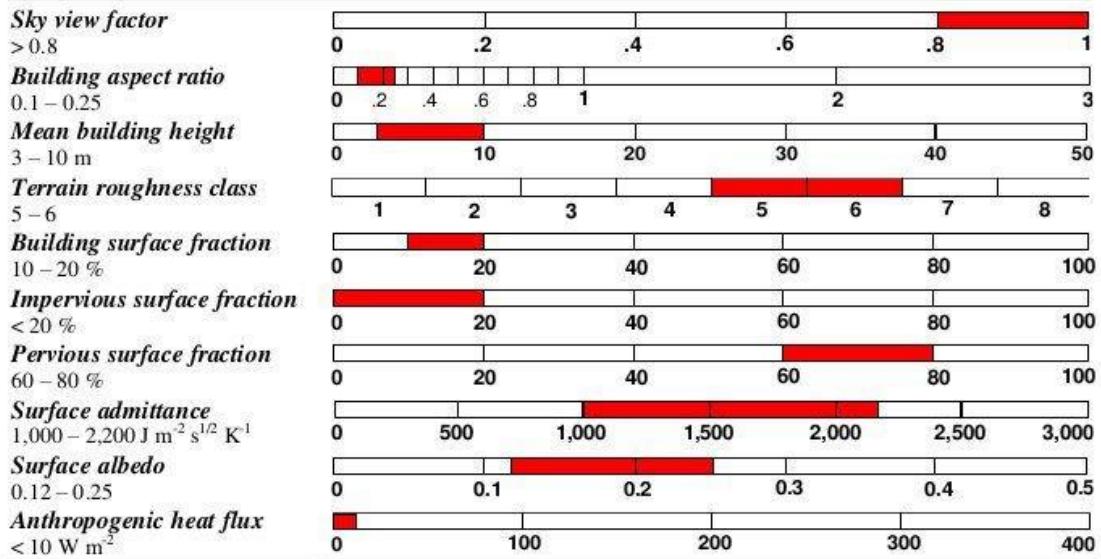


Figure A.1.9: LCZ 09 -Sparsely built -

DEFINITION

Form: Highly irregular mix of low and midrise industrial structures (tanks, towers, stacks). Structures openly spaced on hard-packed surfaces. Sky view from ground level slightly reduced. Building materials vary (steel, concrete, metal). Few or no trees. High demand for space heating/cooling. Large quantities of waste heat and atmospheric pollutants released from mechanical and chemical processing (smelting, pulping, distilling). Low traffic flow. **Function:** Industrial (factories, refineries, mills, plants). **Location:** City or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

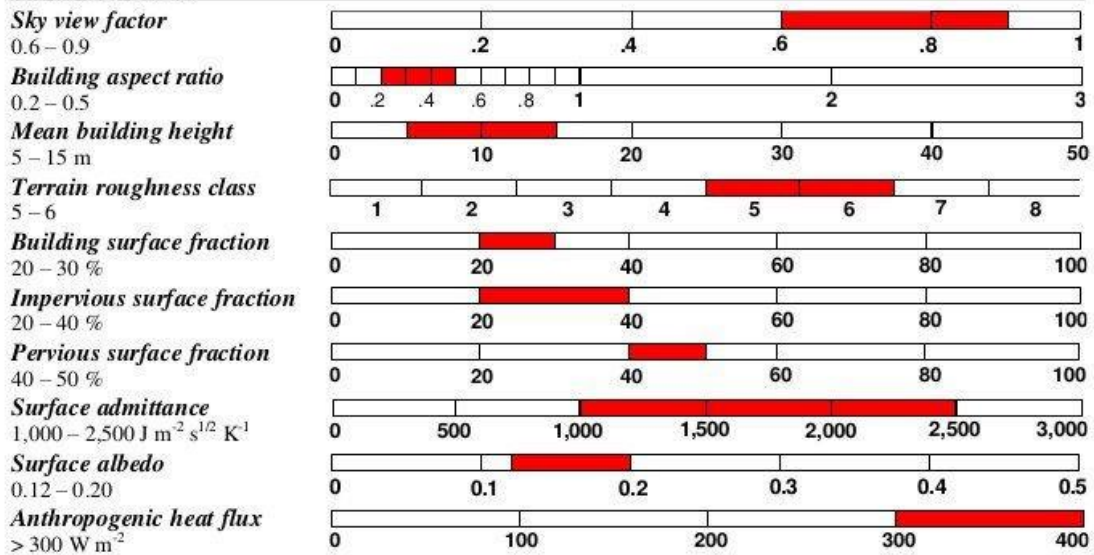


Figure A.1.10: LCZ 10 -Heavy industry-

LCZ

DENSE TREES

A

DEFINITION

Form: Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Trees closely spaced across pervious ground (low plants). Sky view from ground level significantly reduced. Few or no roads or buildings. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. **Function:** Natural forest (equatorial, tropical, midlatitude). Tree cultivation (dense orchards, plantations). Urban recreation (wooded parks, greenbelts). **Location:** City or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

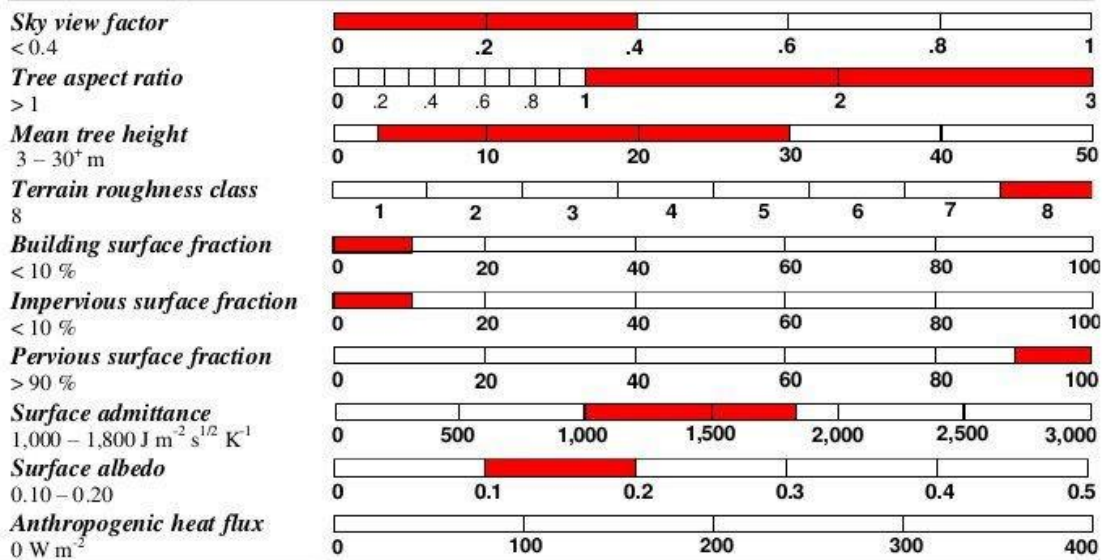


Figure A.1.11: LCZ A -Dense trees-

LCZ

SCATTERED TREES

B

DEFINITION

Form: Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Trees scattered across pervious ground (low plants). Sky view from ground level slightly reduced. Few or no roads or buildings. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. **Function:** Natural forest (savannah, parkland, high latitude). Tree cultivation (orchards, groves, plantations). Urban recreation (parks, green spaces). **Location:** City or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

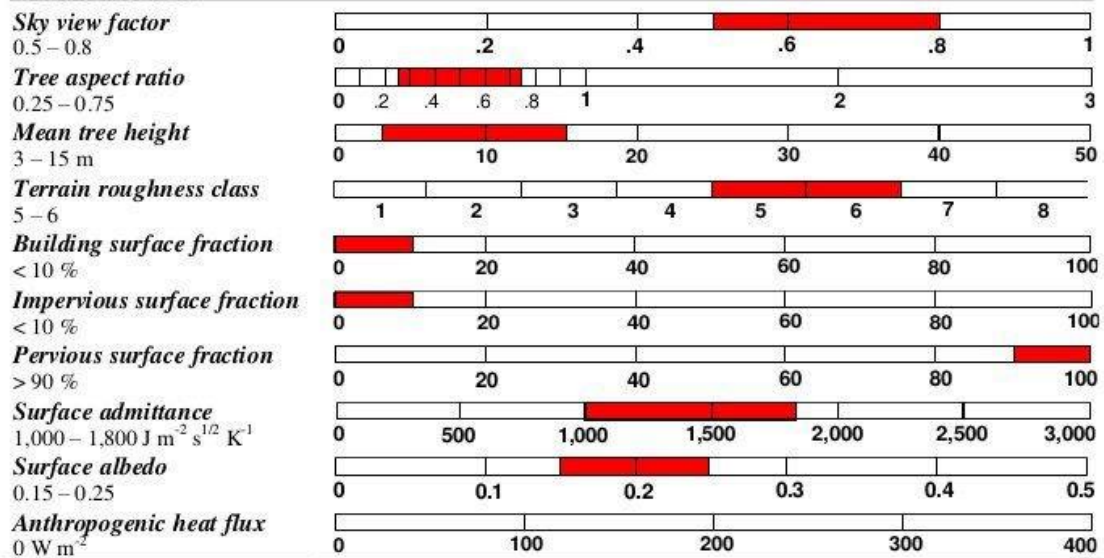


Figure A.I. 12: LCZ B -Scattered trees -

LCZ

BUSH, SCRUB

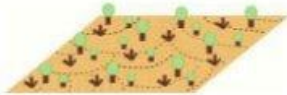
C

DEFINITION

Form: Open shrubs, bushes, and short, woody trees on pervious ground (bare soil or sand; sparse plant cover). Full sky view from ground level. Few or no roads or buildings. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. **Function:** Desert scrubland; interior scrubland; Mediterranean scrubland. Tree cultivation (orchards/plantations of dwarf or bush trees). Agriculture (unimproved pasture). **Location:** City or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

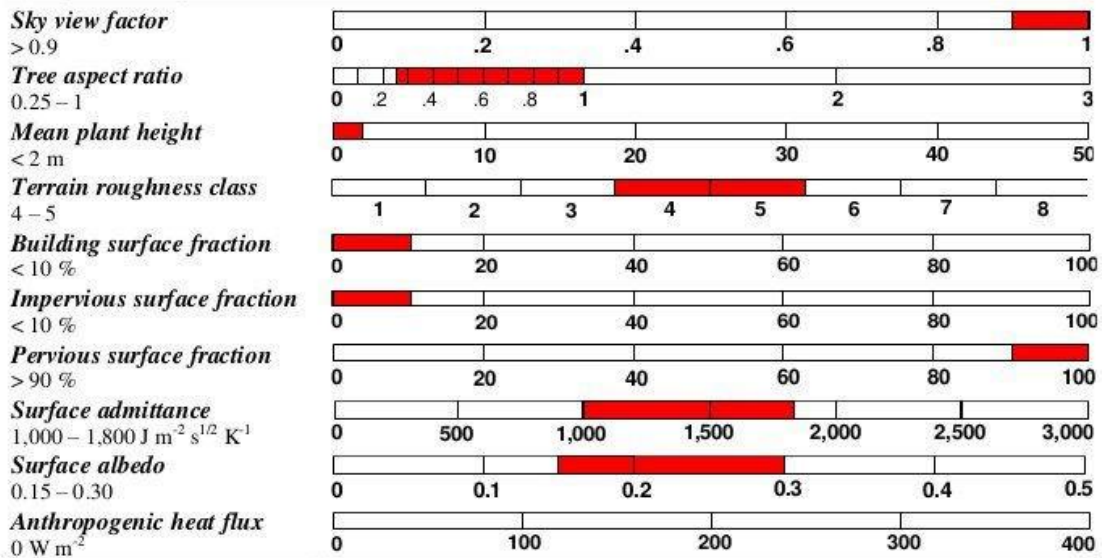


Figure A.1.13: LCZ C -Bush, scrub-

LCZ LOW PLANTS D

DEFINITION

Form: Featureless landscape of pervious ground, predominantly low plant cover. Few or no trees, roads, or buildings. Full sky view from ground level. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow.
Function: Natural grassland (savannah, steppe). Agriculture (pasture, arable farmland). Urban recreation (grassy parks, green spaces). **Location:** City or country. **Correspondence:** UCZ7 (Oke 2004).

ILLUSTRATION



PROPERTIES

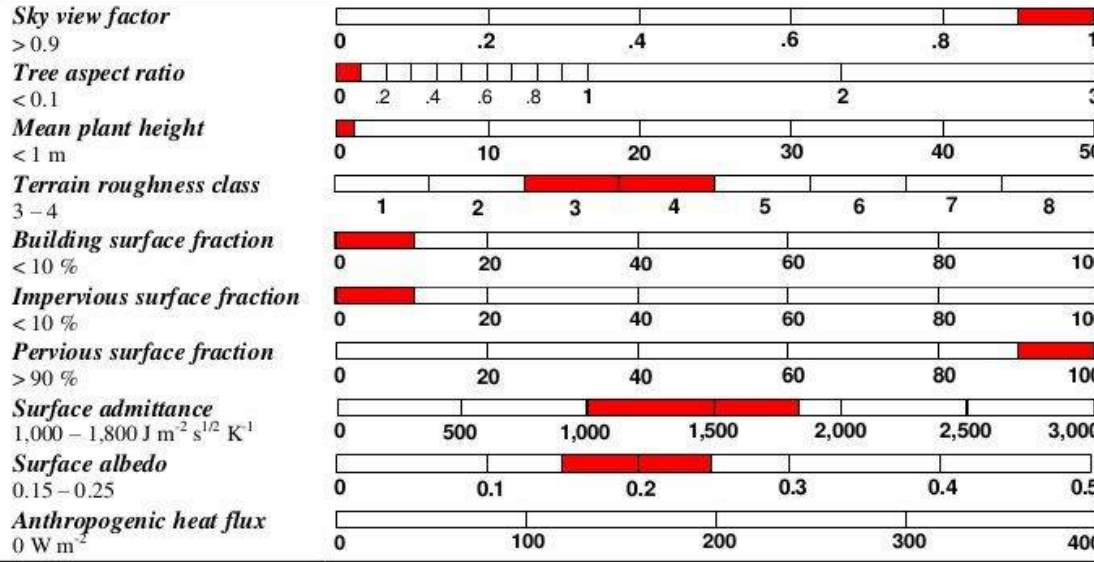


Figure A.1.14: LCZ D- Low plants-

LCZ BARE ROCK OR PAVED E

DEFINITION

Form: Featureless landscape of impervious ground, predominantly rock, paved, or hard packed. Ground cover varies (gravel, laterite, exposed bedrock; asphalt, concrete). Few or no trees, plants, or buildings. Full sky view from ground level. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. **Function:** Natural desert (cold, rock); geological shield. Transportation (car parks, container ports, freight terminals, airport aprons). **Location:** City or country.

ILLUSTRATION



PROPERTIES

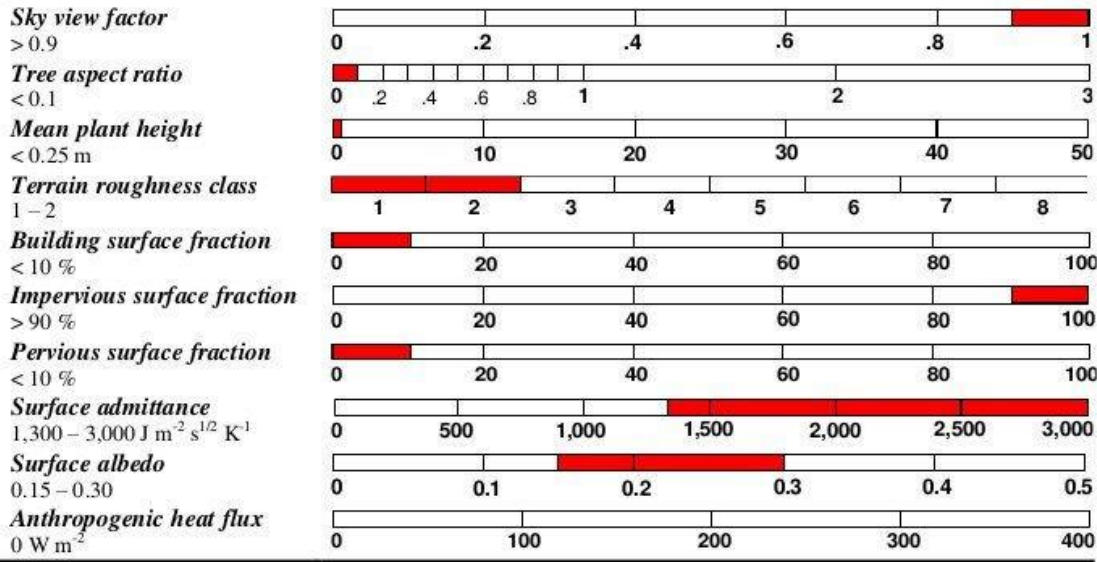


Figure A.1.15: LCZ E -Bare rock or paved-

LCZ

BARE SOIL OR SAND

F

DEFINITION

Form: Featureless landscape of pervious ground, predominantly soil or sand. Few or no trees, plants, roads, or buildings. Full sky view from ground level. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. **Function:** Natural desert (hot). Agriculture (plowed or fallow fields). Barren land. **Location:** City or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

Sky view factor > 0.9	
Tree aspect ratio < 0.1	
Mean plant height < 0.25 m	
Terrain roughness class 1 - 2	
Building surface fraction < 10 %	
Impervious surface fraction < 10 %	
Pervious surface fraction > 90 %	
Surface admittance $1,000 - 1,800 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{1/2} \text{ K}^{-1}$	
Surface albedo 0.20 - 0.35	
Anthropogenic heat flux 0 W m^{-2}	

Figure A.1.16: LCZ F- Bare soil or sand-

LCZ

WATER

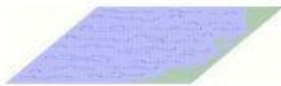
G

DEFINITION

Form: Large, open water bodies such as seas, lakes, and bays, or smaller bodies like rivers, reservoirs, and lagoons. Few or no roughness features. Full sky view. **Function:** Natural water systems. Recreation. Transportation. Industry. **Location:** City (urban lakes, rivers, harbours) or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level



PROPERTIES

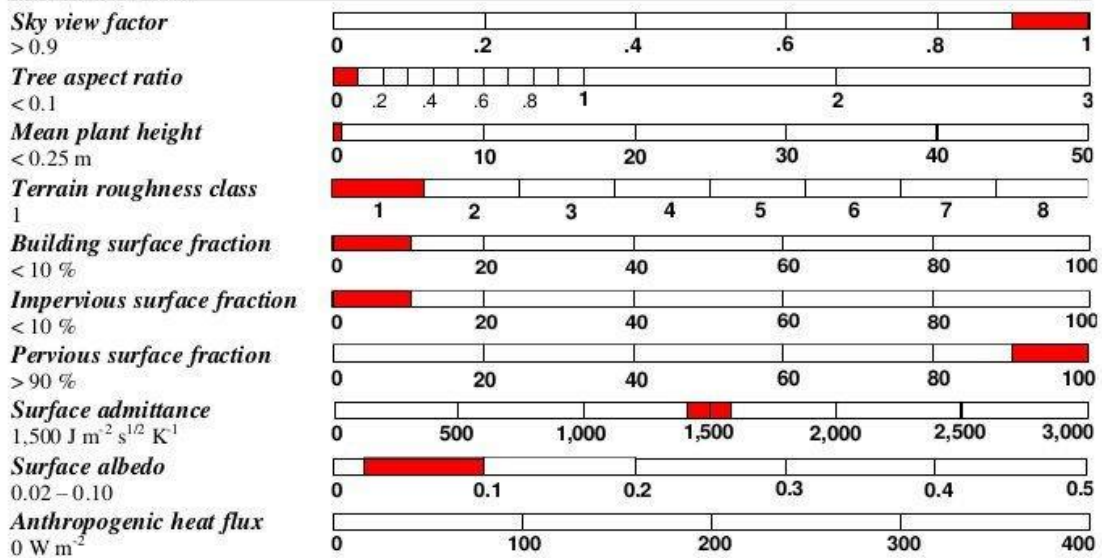


Figure A.1.17: LCZ G-water-

Annexe A.2 :
Principes fondamentaux de la
téledétection

A.2.1. Introduction :

Le développement de la télédétection a rendu possible l'acquisition et le traitement des données à référence spatiale et spectrale pour l'ensemble de la planète⁸¹. Cette partie aborde de manière générale les principes de la télédétection, qui servent à faciliter la discussion sur l'intégration des produits satellitaire, présentée dans le chapitre méthodologique.

A.2.2. Définition :

La télédétection concerne étymologiquement "la détection à distance" quel qu'en soit le type d'éléments de la surface terrestre ou d'une autre planète⁸². C'est la discipline scientifique qui fait référence à l'ensemble des connaissances et des techniques d'observation et de perception des différents phénomènes et objets de la surface, permet l'acquisition et l'analyse des données à référence spatiale obtenues par l'intermédiaire de plateformes aéroportées. La figure A.2.1 présente les différents processus de télédétection allant du milieu observé à l'utilisateur des données.

A.2.3. Principe :

En télédétection les capteurs ne sont pas en contact directe avec la terre. Le vecteur porteur d'information relative aux éléments de sa surface c'est le rayonnement électromagnétique (REM). Ce dernier pour qu'il soit détecté, les objets dont ils émanent doivent être illuminés.

Le rayonnement émis par le soleil (à l'origine de la lumière), se déplaçant sous forme d'ondes (spectre électromagnétique), et traversent une certaine épaisseur de l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre. L'atmosphère est un élément perturbateur due aux gazes et aux particules solides et liquides qu'elle contienne, elle affecte la propagation du rayonnement solaire par absorption et diffusion. Selon (Provencher L., Dubois J.M., 2007), *seulement 50% du rayonnement solaire incident atteint la surface terrestre, tandis que 25% est absorbés et 25% est diffusés par l'atmosphère.*

⁸¹ L, Provencher., J.M, Dubois. (2007). *Précis de Télédétection: Méthodes de Photointerprétation et D'interprétation D'image*. Puq.

⁸² C, Weber. (1995). *Images Satellitaires et Milieu Urbain*. Hermès. Paris.

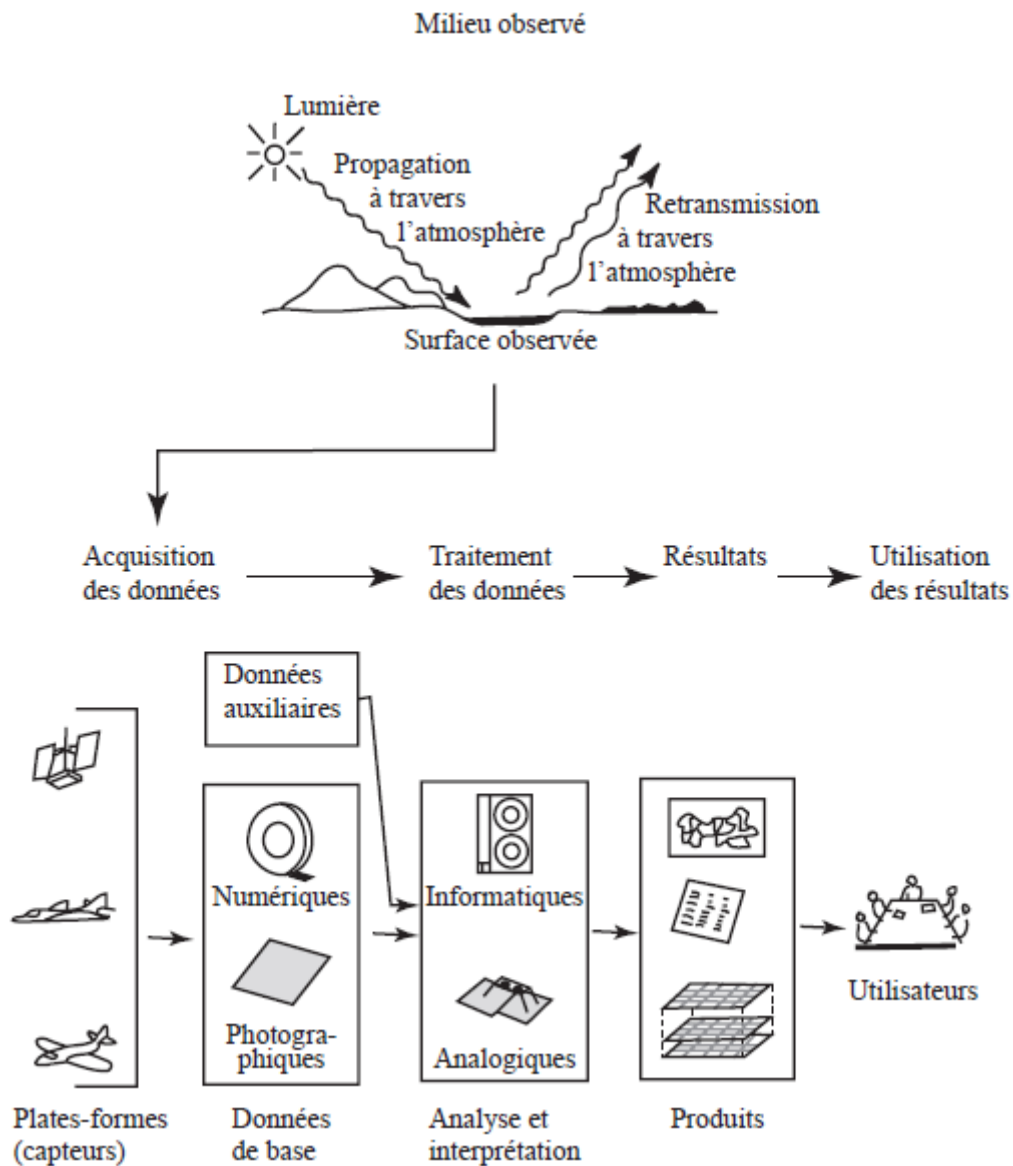


Figure A.2.1 : schéma des grandes étapes de la télédétection. *Source : (Provencher L., Dubois J.M., 2007)*

La partie d'énergie fournie par le rayonnement solaire qui atteint la terre, en interagissant avec ses multiples caractéristiques, est divisée en trois types, énergie absorbée (E_a), énergie transmise (E_t) et énergie réfléchies (E_r), selon la règle de conservation d'énergie :

$$E_i = E_a + E_t + E_r \dots\dots\dots (A.2.1)$$

Dont: E_i l'énergie incidente.

Les particularités des éléments observés conduisent à la façon distincte dont ils vont réagir aux rayonnements, donc aux variations dans les proportions d'énergie ainsi

caractérisées. Le signal enregistré grâce aux moyens de détection, concerne la partie d'énergie des radiations *réfléchies et/ou émises* par un objet pour une longueur d'onde, appelé "*luminance*" ou "*radiance*".

La reconnaissance d'un élément considéré est liée à leurs caractéristiques spectrales⁸³, qui sont déterminés par la capacité de ces objets à réfléchir l'énergie reçu (réflectance), sur toute la gamme du spectre électromagnétique. La réflectance d'un élément est déterminée à travers des courbes générales qui représente les valeurs spectrales de l'élément en fonction des longueurs d'onde des bandes du capteur, appelé "*signature spectrale*" (figure A.2.2). Cette dernière permet de faire des mesures de luminance de l'objet et d'utiliser ces courbes pour choisir les bandes spectrales jugées adéquates pour l'étude de tel ou tel phénomène⁸⁴.

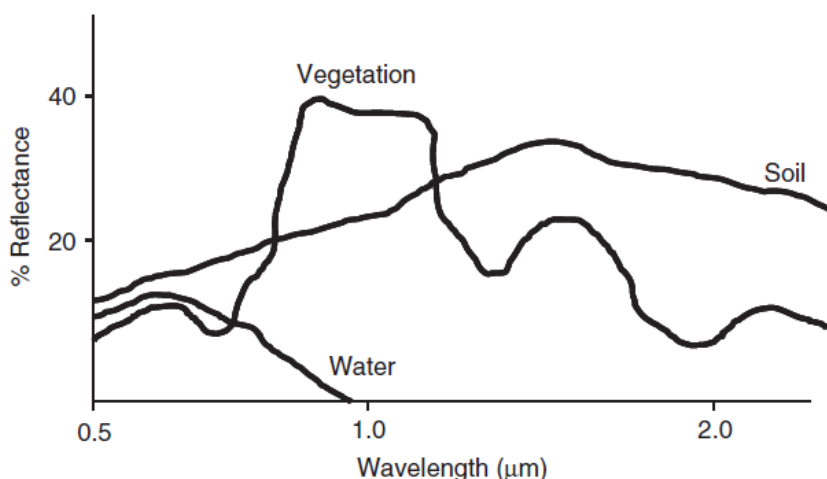


Figure A.2.2 : les courbes théoriques de signature spectrale. Source : (Weng Q., 2010)

A.2.4. Les ondes électromagnétiques (EM) :

Les ondes électromagnétiques résultent de la propagation simultanée à travers le temps et l'espace, d'un couple de champs transversaux et indissociables, soit le champ électrique et magnétique. Ces deux vecteurs définissent un plan qui est perpendiculaire à la direction de propagation des ondes.

Le REM se caractérise par sa longueur d'onde (λ), sa fréquence (f) qui est le nombre d'oscillations par unité de temps, et sa vitesse de propagation (v). La relation entre ces trois

⁸³ C, Weber. (1995). *Images Satellitaires et Milieu Urbain*. Hermès. Paris.

⁸⁴ Ibid.

propriétés est exprimée en équation (A.2.2). Elle met en évidence une corrélation inverse entre la fréquence et la longueur d'onde, plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte est inversement.

$$f = v/\lambda \quad \dots\dots\dots (A.2.2)$$

Le soleil émet des REM de différentes longueurs d'onde. Ils peuvent être fractionnés en diverses classes, par des conventions scientifiques (figure A.2.3), en fonction des phénomènes qui sont à l'origine de leurs productions. Les portions du spectre mesurées en télédétection sont présentées dans le tableau A.2.1.

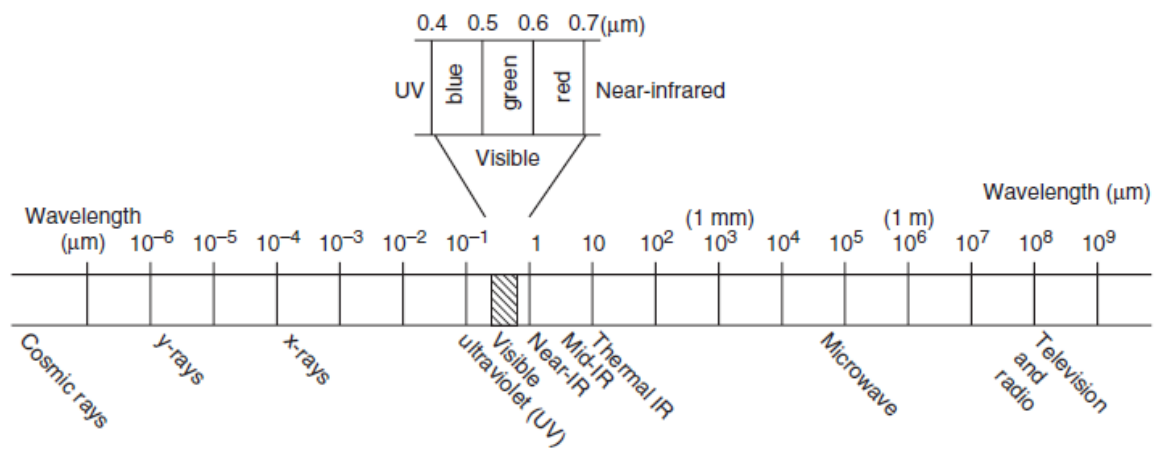


Figure A.2.3 : les principales zones du spectre EM. *Source: (Weng Q., 2010)*

Table A.2.1: zones du spectre EM mesurées en télédétection. *Source : (Martin P., 2008)*

Onde	Longueur d'onde
le visible	de 0,4 à 0,7 μm
l'infrarouge proche,	de 0,7 à 1,5 μm
l'infrarouge moyen	de 1,5 à 3 μm
l'infrarouge thermique	de 3 à 15 μm
les micro-ondes	de 1 mm à 1 m

A.2.4. Systèmes d'observation :

Les capteurs sont des appareils de mesure capable de recevoir le REM et de le convertir à un signal portant de l'information relatives aux différents objets de surface, puis de l'enregistrer sous forme d'un produit numérique (image). Ils sont embarqués à bord de

plateformes aéroportées (avions, ballon, satellite). Deux modes d'acquisition en télédétection, en fonction de la façon dont l'énergie est utilisée et détectée.

- *Les capteurs passifs* : développés afin de pouvoir mesurer la réflectance des éléments de surface, sur la base de l'énergie naturellement réfléchi ou rayonnée par ces éléments.
- *Les capteurs actifs* : des instruments qui fournissent artificiellement leur propre énergie, et enregistrent le rayonnement réfléchi par l'objet après l'avoir sollicité.

Les capteurs sont conçus pour tous les secteurs du spectre électromagnétique, mais selon (Weng Q., 2010), *chacun est unique en ce qui concerne la ou les parties du spectre qu'il détecte*. Certains se focalisent sur l'enregistrement de quelques segments particuliers pour étudier un élément de surface, d'autres ont le potentiel à capter une large gamme de bandes allant du visible jusqu'à l'infrarouge thermique. La capacité d'un capteur à détecter une information dépend de ses caractéristiques particulières de résolution spatiale et spectrale et radiométrique :

- *La résolution spatiale*: (dimension du pixel), est une mesure de la distance minimale entre deux objets, qui leur permet de se différencier les uns des autres dans une image⁸⁵. C'est la taille la plus petite d'une unité du sol discernable par un capteur.
- *La résolution spectrale* : réfère à la mesure de la longueur d'onde ou de l'intervalle de longueur d'onde d'une bande d'un capteur⁸⁶. C'est l'aptitude d'un système de détection à distinguer des REM de longueur d'onde différente.
- *La résolution radiométrique* : définie selon (Caloz R., 1992) comme le seuil de sensibilité du radiomètre, c'est à dire la plus faible intensité réfléchi ou émise par la scène que le capteur est capable de détecter dans chaque bande spectrale.

Après le captage, l'énergie détectée est enregistrée sous forme d'image numérique (matrice), qui se compose d'un nombre précis de Pixel. Ce dernier représente d'après (Weber C., 1995), *la plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée*. Selon (Martin, 2008), La valeur assignée au pixel est fonction de l'intensité du rayonnement de cette surface.

⁸⁵ Q, Weng. (2010). *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications*. McGraw-Hill. New York.

⁸⁶ L, Provencher., J.M, Dubois. (2007). *Précis de Télédétection: Méthodes de Photointerprétation et D'interprétation D'image*. Puq.

A.2.5. Champs d'application des produits satellitaire:

Les produits satellitaires peuvent être profitables pour une série de problématiques associées au milieu naturel et anthropique. Le tableau A.2.2 permet d'avoir un aperçu visuel de différentes applications.

Table A.2.2 : Domaines d'application de la télédétection. *Source (Martin P., 2008)*

Domaines	Applications
Géosciences	Géologie, pédologie, géomorphologie
Milieu marin et littoral	Qualité de l'eau, circulation océanique, végétation marine
Atmosphère et climat	Météorologie, bilans énergétiques et hydriques
Hydrologie	Comportement et cycles de l'eau
Glaciologie	Suivi des glaciers
Biosphère	Cartographie de la végétation
Espace aménagé	Statistiques agricoles, foresterie, croissance des villes
Archéologie	Cartographie de sites archéologiques
Santé	Prévision des épidémies, relations avec changements globaux
Catastrophes environnementales	Feux de forêts, inondations, marées noires, sécheresses etc.
Changements globaux	Désertification, variations et composition de l'atmosphère
Espaces agraires	Type de culture, irrigation, drainage

La télédétection est utilisée dans le domaine du microclimat thermique urbain. La température de surface LST est un indicateur important dans la compréhension de celui-ci. Plusieurs recherches antérieures sont portées sur la relation entre les variations LST et les attributs biophysique de surface, on cite : (Chen X.-L., et al., 2006; Harris R., and Coutts A., 2011; Kuşçu Ç., and Şengezer B., 2011; Lo C.P., et al., 1997; Streutker D.R., 2002; Weng Q., 2009).

Résumé :

Le nombre d'enjeux assigné aux risques d'îlot de chaleur urbain a mis en évidence le caractère extrêmement problématique de cette anomalie qui touche le climat spécifique des villes. Dans ce contexte, les aménageurs sont fortement sollicités pour l'intégration de la dimension climatique dans la conception des différents projets urbains. Cependant, les moyens dont ils disposent sont limités à des recommandations et de bonne pratique. L'objectif de ce travail est de proposer un outil d'aide à la conception qui permet de quantifier l'impact des différents choix d'aménagement sur le climat local urbain.

L'étude englobe d'abord, une recherche de simulation à l'échelle globale, dont l'objectif est d'établir un diagnostic climatique général au sein de l'agglomération de Constantine. Le comportement thermique de la ville est analysé –durant la période estivale- à l'aide des données satellitaires Landsat 08, OLI/TIRS. Une étude quantitative a été menée, vise à explorer la relation entre les températures de surface et les différents modes d'occupation du sol, basée sur l'utilisation de l'indice de végétation NDVI, et l'indice de bâti NDBI. Les résultats ont démontré une forte corrélation négative entre NDVI et LST, et positive entre NDBI et LST.

Afin de structurer l'étude climatique à Constantine, une méthode basée sur la classification de paysage en fragments urbains à l'échelle locale a été appliquée, sur un petit échantillon de territoire de la ville. Pour explorer à quel point les contours des différents fragments sont correctement définis, l'homogénéité des classes s'est interrogée, en matière, d'une part, des propriétés de surface en calculant les indicateurs physiques liés à l'occupation du sol et la morphologie urbaine et faisant la correspondance avec les métadonnées des LCZs de référentiel. Et d'une d'autre part, en matière de la réponse thermique générale de chaque LCZ, en effectuant des simulations de température de surface issue des images satellitaires. Les résultats ont démontré que les différent LCZ révèlent une représentativité acceptable de point de vue des propriétés physiques et thermique. Cela permet d'explorer la magnitude d'ICU en effectuant des comparaisons des températures interzones.

Une cartographie de caractérisation d'ICU nocturne a été établie, basée sur une vision hypothétique des magnitudes de température interzone, elle suggère un gradient thermique du centre de type compact à la périphérie de type naturel. Deux campagnes de mesure ont été mise en place, en période estivale à l'aide de deux stations fixe, permettent

d'observer les températures de l'air dans deux LCZ (open midrise et compact midrise), afin de vérifier l'hypothèse précédente. Les zones ont révélé un faible écart journalier, et connaissent une amplitude nocturne plus élevée, les résultats ont montré que les zones compactes sont les plus chaudes.

Le système de classification LCZ est un outil de diagnostic de climat à l'échelle local, permet de normaliser les études observationnelles d'ICU. C'est un modèle applicable pour la cartographie spatiale urbaine, permet de différencier des zones représentatives, d'établir des typologies et de fournir des informations d'ordre qualitatif et quantitatif sous un format clair et normalisé pour les aménageurs.

Abstract:

The number of problems allocated to the risks of urban heat island has highlighted the extremely problematic nature of this anomaly that affects the specific climate of cities. In this context, planners are strongly solicited for the integration of the climate dimension in the design of the various urban projects. However, the means at their disposal are limited to recommendations and good practice. The objective of this work is to propose a design assistance tool that allows quantifying the impact of different management choices on the local urban climate.

First, the study encompasses a simulation research on a global scale, the objective of which is to establish a general climate diagnosis within the Constantine agglomeration. The thermal behavior of the city is analyzed - during the summer period - using Landsat 08, OLI / TIRS satellite data. As a result of image processing, the location of the thermal fields has been established. A quantitative study was conducted to explore the relationship between land surface temperatures (LST) and different land-use patterns, based on the use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) . The results showed a strong negative correlation between NDVI and LST, and positive correlation between NDBI and LST.

In order to structure the climate study in Constantine, a method based on the classification of landscape into local fragments was applied to a small sample of the city. In order to explore the extent to which the contours of the different fragments are correctly defined, the homogeneity of classes has been questioned, on surface properties by calculating the physical indicators related to land use and morphology and matching the metadata of the repository LCZs. And on the other hand, in terms of the general thermal response of each LCZ, by performing simulations of surface temperature from satellite images. The results showed that the different LCZs display an acceptable representativeness in terms of physical and thermal properties. This allows us to explore the magnitude of ICU by comparing inter-zone temperatures.

A nocturnal ICU characterization mapping was established, based on a hypothetical view of the interzone temperature magnitudes, suggesting a thermal gradient from the center of compact type to the periphery of natural type. Two measurement companions were set up during the summer period using two fixed stations to observe the air temperatures in two LCZs (open midrise and compact midrise), in order to verify the

previous hypothesis. The zones revealed a small daily gap, and experienced higher nighttime amplitude, the results showed that the compact zones were the hottest.

The LCZ classification system is a local climate diagnostic tool, which allows standardization of ICU observational studies. It is an applicable model for urban spatial mapping, allows differentiating representative areas, establishing typologies and providing qualitative and quantitative information in a clear and standardized format for planners.