



Université de Constantine 3  
Faculté d'Architecture et  
d'Urbanisme

IMPACT DU COUVERT VÉGÉTAL SUR LES AMBIANCES  
THERMIQUES EXTÉRIEURES DANS LES ZONES CHAUDES ET  
ARIDES. SITE D'ÉTUDE : LA VILLE DE GHARDAÏA-ALGÉRIE

THESE

Présentée pour l'Obtention du  
Diplôme de Doctorat en sciences

Spécialité : Architecture et Environnement

Par  
Rachid AMIEUR

Année Universitaire  
2023-2024





Université de Constantine 3  
Faculté d'Architecture et d'Urbanisme  
Département d'Architecture

N° de Série :

N° d'Ordre :

IMPACT DU COUVERT VÉGÉTAL SUR LES AMBIANCES  
THERMIQUES EXTÉRIEURES DANS LES ZONES CHAUDES ET  
ARIDES. SITE D'ÉTUDE : LA VILLE DE GHARDAÏA-ALGÉRIE

THESE

Présentée pour l'Obtention du  
Diplôme de Doctorat en sciences  
Spécialité : Architecture

Par  
Rachid AMIEUR

Devant le Jury Composé de :

Pr. MAHIMOUD Aissa	Président	Université de Constantine 3
Pr. ROUAG SAFFIDINE Djamila	Rapporteur	Université de Constantine 3
Dr. BOUKHELKHAL Islam	Examineur	Université Constantine 3
Pr. BENCHEIKH Hamida	Examineur	Université de Laghouat
Dr. BOUDJADJA Rafik	Examineur	Université d'Oum Bouaghi
Pr. WEBER Christiane	Co-encadreur	Université de Montpellier, France

Année Universitaire  
2023-2024

## REMERCIEMENTS

Louanges à Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, la patience et la volonté d'accomplir ce travail.

En tout premier lieu, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance et mon estime à ma directrice de thèse Pr. Djamila ROUAG SAFFIDINE, qui a dirigé mon travail de thèse durant toutes ces années, pour son aide et son soutien indéfectible.

Je tiens à exprimer aussi tous mes remerciements et ma gratitude à ma co-directrice de thèse, Dr. Christiane WEBER pour avoir accepté de co-diriger cette thèse, et m'avoir accueilli au sein du laboratoire TETIS, pour son appui total durant la crise de COVID-19 pendant mon séjour en France. Un grand merci du fond de mon cœur.

Mes remerciements et ma gratitude s'adressent également aux honorables membres du jury qui m'ont fait honneur et plaisir d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail et ont donné de leur temps précieux pour le lire et l'évaluer :

- Professeur ..... de l'Université de .....
- Professeur ..... de l'Université de .....
- Professeur ..... de l'Université de .....

Mes plus vifs remerciements vont également aux personnels du laboratoire TETIS à Montpellier, pour leurs aides et leurs disponibilités. Je remercie tout particulièrement Mr. Kenji Ose pour sa disponibilité et sa précieuse aide dans les traitements des images satellitaires.

Je remercie infiniment mes chers parents pour leurs aides et leur soutien. Je remercie avec émotion mes frères et sœurs. Je présente mes vifs remerciements à mon épouse pour sa patience durant les moments de ce parcours. Je remercie toute ma famille très chaleureusement.

Enfin, Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à tous mes amis et collègues et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**Je vous dis à tous « MERCI »**

## DÉDICACES

*Je dédie ce travail de thèse :*

*À mes chers parents, pour leur soutien immense,*

*Que Dieu leur procure une bonne santé et une longue vie.*

*À mes frères et sœurs,*

*À ma femme et mes enfants.*

# TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES .....	xiv
LISTE DES TABLEAUX .....	xx
LISTE DES ABREVIATIONS .....	xxii
RÉSUMÉ .....	xxiv
ABSTRACT .....	xxv
ملخص .....	xxvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
PARTIE 1 : CONCEPTS ET CADRE THÉORIQUE .....	10
Introduction de la partie 1 .....	11
1. CLIMAT URBAIN, CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SURCHAUFFE URBAINE	
13	
1.1. Introduction .....	13
1.2. La climatologie urbaine .....	13
1.2.1. Evolution de la climatologie urbaine .....	13
1.2.2. La discipline de la climatologie urbaine .....	14
1.2.3. Le climat urbain .....	15
1.3. Les échelles climatiques .....	16
1.3.1. Les échelles climatiques horizontales .....	16
1.3.1.1. L'échelle globale .....	16
1.3.1.2. L'échelle méso.....	16
1.3.1.3. L'échelle locale.....	16
1.3.1.4. L'échelle microclimatique .....	16
1.3.2. Les échelles climatiques verticales .....	17
1.3.2.1. La couche limite atmosphérique.....	17
1.3.2.2. La couche limite urbaine .....	17
1.3.2.3. La couche limite de surface .....	19
1.3.2.4. La sous-couche inertielle .....	19
1.3.2.5. La sous-couche de rugosité .....	19
1.3.2.6. La couche de canopée urbaine .....	19
1.3.2.7. La couche de surface .....	20
1.4. Les caractéristiques du climat chaud et aride .....	20
1.5. Réchauffement global et vagues de chaleur .....	21
1.5.1. Vulnérabilité des zones chaudes et arides aux vagues de chaleurs et canicules ....	22
1.5.2. Changement climatique en Algérie.....	23

1.5.3. Les conséquences du réchauffement sur les zones chaudes et arides en Algérie ..	24
1.5.4. Consommations énergétiques dans le secteur de climatisation en Algérie.....	25
1.5.5. Les engagements de l'Algérie dans la lutte contre les changements climatiques..	26
1.6. Le bilan énergétique d'une zone urbaine.....	27
1.6.1. Bilan radiatif au-dessus d'une ville.....	27
1.6.1.1. Le rayonnement net ( $Q^*$ ).....	28
1.6.1.2. Le rayonnement global descendant à courte longueur d'onde ( $K \downarrow$ ).....	29
1.6.1.3. Le rayonnement ascendant à courte longueur d'onde ( $K \uparrow$ ).....	29
1.6.1.4. Le rayonnement descendant à grande longueur d'onde ( $L \downarrow$ ).....	29
1.6.1.5. Le rayonnement ascendant à grande longueur d'onde ( $L \uparrow$ ).....	29
1.6.2. Bilan d'énergie au-dessus d'une ville .....	29
1.6.2.1. Le flux du rayonnement net ( $Q^*$ ) .....	30
1.6.2.2. Le flux de chaleur anthropique ( $QF$ ) .....	30
1.6.2.3. Le flux de chaleur sensible ( $QH$ ).....	31
1.6.2.4. Le flux de chaleur latente ( $QE$ ) .....	31
1.6.2.5. Le flux de chaleur stockée ( $\Delta QS$ ).....	31
1.6.2.6. Le flux de chaleur advectif ( $\Delta QA$ ) .....	32
1.7. Conclusion .....	32
2. L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET LE CONFORT THERMIQUE EN ESPACE EXTÉRIEUR .....	34
2.1. Introduction .....	34
2.2. Définition de l'îlot de chaleur urbain et historique du phénomène .....	34
2.3. Les facteurs de formation de l'îlot de chaleur urbain .....	35
2.3.1. Climat et géographie .....	35
2.3.2. Urbanisation .....	36
2.3.3. Morphologie urbaine.....	36
2.3.3.1. Les effets aérodynamiques .....	37
2.3.3.2. Exposition solaire et piégeage radiatif .....	38
2.3.4. Matériaux et surfaces .....	39
2.3.5. Réduction de l'évapotranspiration par imperméabilisation et diminution du végétal .....	42
2.3.6. Pollution et émission de chaleur par les activités anthropiques.....	44
2.4. L'intensité du phénomène d'ICU .....	45
2.5. Caractéristiques temporelles et spatiales de l'îlot de chaleur urbain.....	45
2.5.1. Variabilité temporelle .....	45
2.5.2. Variabilité spatiale .....	46
2.6. L'îlot de chaleur urbain et le bilan énergétique.....	47

2.6.1. Le jour .....	48
2.6.2. La nuit .....	48
2.7. Impacts des îlots de chaleur urbains .....	49
2.7.1. Impact sur la santé humaine .....	49
2.7.2. Impact sur l'environnement .....	50
2.7.3. Impact sur la consommation d'énergie .....	50
2.8. Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains .....	51
2.8.1. Végétalisation.....	51
2.8.2. Bâtiments et infrastructures urbaines .....	52
2.8.3. Gestion des eaux pluviales .....	53
2.8.4. Réductions de la chaleur anthropique .....	54
2.8.5. Implication et sensibilisation des habitants.....	54
2.9. Le confort thermique des espaces extérieurs .....	54
2.9.1. Ambiance et confort thermique.....	55
2.9.2. Le confort thermique extérieur .....	55
2.9.3. La sensation thermique .....	57
2.9.4. Les paramètres du confort thermique.....	57
2.9.4.1. Paramètres relatifs à l'environnement .....	57
2.9.4.2. Paramètres relatifs à l'individu.....	58
2.9.4.3. Les mécanismes de thermorégulation.....	58
2.9.4.4. Le métabolisme .....	58
2.9.4.5. L'habillement .....	59
2.9.5. Les échanges thermiques .....	59
2.9.5.1. Les échanges radiatifs.....	59
2.9.5.2. Les échanges convectifs .....	60
2.9.5.3. Les échanges conductifs .....	60
2.9.5.4. Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau .....	60
2.9.5.5. Pertes par respiration .....	60
2.9.5.6. Pertes thermiques par sudation .....	61
2.9.6. Bilan thermique entre l'homme et son environnement .....	61
2.9.7. Les indices d'évaluation du confort thermique en espace extérieur .....	62
2.9.7.1. Effective Temperature (ET).....	63
2.9.7.2. Temperature-Humidity Index (THI).....	63
2.9.7.3. Heat Index (HI).....	64
2.9.7.4. Humidex (H).....	65
2.9.7.5. Wet Bulb Globe Temperature Index (WBGT).....	65
2.9.7.6. Thermal comfort Index for cities of Arid Zones (IZA).....	66
2.10. Conclusion.....	67
3. MESURE DES ILOTS DE CHALEUR URBAINS .....	69

3.1. Introduction .....	69
3.2. Les différentes échelles d'étude des îlots de chaleur urbains .....	69
3.2.1. L'îlot de chaleur urbain dans la canopée .....	69
3.2.2. L'îlot de chaleur dans la couche limite .....	69
3.2.3. L'îlot de chaleur urbain de surface .....	69
3.3. Mesures de l'îlot de chaleur (Méthodes d'observation) .....	70
3.3.1. Mesure du phénomène .....	70
3.3.2. Mesures de l'îlot de chaleur de la couche limite urbaine.....	71
3.3.3. Mesures de l'îlot de chaleur dans la canopée.....	71
3.3.4. Mesures de l'îlot de chaleur de surface.....	72
3.3.5. Mesures du confort thermique extérieur (indice de confort et choix de l'indice)..	72
3.4. La télédétection comme moyen pour l'analyse des ICUs .....	73
3.4.1. Généralités sur la télédétection .....	73
3.4.1.1. Bref historique sur la télédétection .....	73
3.4.1.2. Définition de la télédétection.....	73
3.4.1.3. L'image satellitaire : source d'information sur la nature d'une surface et sa température .....	74
3.4.2. Principe et processus de télédétection.....	74
3.4.3. Applications de la télédétection .....	76
3.4.4. Quelques bases physiques .....	77
3.4.4.1. Le rayonnement électromagnétique .....	77
3.4.4.2. Spectre électromagnétique.....	77
3.4.4.3. Interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière .....	78
3.4.5. Les vecteurs (Satellites) .....	79
3.4.6. Les capteurs de télédétection .....	79
3.4.7. Traitement numérique des images satellites .....	79
3.4.8. Prétraitement numérique des images satellites .....	79
3.4.8.1. Les corrections radiométriques.....	79
3.4.8.2. Les corrections géométriques .....	80
3.4.8.3. Les corrections atmosphériques.....	80
3.4.9. Les transformations des images multispectrales .....	80
3.4.10. Rehaussement de l'image.....	81
3.4.11. Calcul des néocanaux (indices spectraux) .....	81
3.4.12. La composition colorée .....	82
3.4.13. Cartographie de l'occupation du sol (Land Use/Land Cover LULC).....	82
3.4.14. Classification thématique d'images de télédétection .....	82
3.4.14.1. Classification non-supervisée .....	84
3.4.14.2. Classification supervisée .....	84
3.4.14.3. Evaluation de la précision de la classification.....	84

3.4.15. Cartographie thermique : Estimation de la température de surface LST depuis l'espace.....	85
3.5. Conclusion.....	86
4. EFFETS MICROCLIMATIQUES DE LA VÉGÉTATION.....	89
4.1. Introduction .....	89
4.2. Typologie et morphologie végétale .....	89
4.2.1. Typologie de la végétation.....	89
4.2.1.1. Les arbres.....	89
4.2.1.2. Les palmiers.....	90
4.2.1.3. Les arbustes et arbrisseaux .....	90
4.2.1.4. Les plantes grimpantes .....	91
4.2.1.5. Les herbacées.....	91
4.2.1.6. Les succulentes .....	91
4.2.2. Formes du végétal urbain.....	92
4.2.2.1. Les parcs, jardins et forêts urbaines .....	92
4.2.2.2. Les arbres d'alignement et l'arbre isolé .....	93
4.2.2.3. La végétalisation des sols urbains (pelouse, fleurs, ...)	93
4.2.2.4. Toit vert et mur végétal .....	94
4.2.2.5. Les plantes grimpantes (treillis et pergolas).....	94
4.2.2.6. Les haies .....	95
4.2.3. Morphologie végétale .....	95
4.2.3.1. Les feuilles.....	95
4.2.3.2. L'indice Foliaire (LAI) .....	96
4.2.3.3. Le port des arbres .....	96
4.2.4. La végétation caduque et persistante .....	96
4.3. Rôles et fonctions écosystémiques de la végétation urbaine.....	97
4.3.1. Rôles environnementaux.....	97
4.3.1.1. Atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain .....	97
4.3.1.2. Biodiversité et conservation de la nature : habitats et corridors écologiques..	98
4.3.1.3. Séquestration du carbone : Puits de carbone .....	98
4.3.1.4. Réduction et filtration de la pollution et la poussière.....	99
4.3.1.5. Gestion des eaux pluviales et contrôle de l'érosion .....	99
4.3.2. Bienfaits économiques .....	100
4.3.2.1. Réduction de la consommation énergétique des bâtiments.....	100
4.3.2.2. Valeur de la propriété et attractivité des villes .....	100
4.3.2.3. Déchets recyclés, bois d'œuvre .....	100
4.3.2.4. Agriculture urbaine.....	101
4.3.2.5. Autres bienfaits économiques.....	101
4.3.3. Bienfaits sur la santé humaine .....	101

4.3.3.1. Amélioration de la qualité de l'air .....	101
4.3.3.2. Santé physique .....	101
4.3.3.3. Santé mentale, bien-être psychologique .....	102
4.3.3.4. Atténuation du bruit (Confort acoustique).....	102
4.3.4. Bénéfices socio-culturels .....	103
4.3.5. Rôle symbolique et esthétique .....	103
4.4. Effets microclimatiques de la végétation urbaine.....	104
4.4.1. Principaux mécanismes de régulation du climat par la végétation urbaine .....	104
4.4.1.1. Évapotranspiration.....	104
4.4.1.2. Ombrage .....	105
4.4.1.3. Écoulements aérauliques .....	109
4.4.1.4. Apport de la télédétection dans l'étude du rôle du végétal sur le microclimat .....	109
4.5. Synthèse bibliographique : Impact du végétal sur le microclimat urbain .....	111
Conclusion de la partie 1 .....	118
PARTIE 2 : INVESTIGATION .....	119
Introduction de la partie 2.....	120
5. MÉTHODOLOGIE, DONNÉES ET ZONE D'ÉTUDE .....	122
5.1. Introduction .....	122
5.2. Mesures de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique.....	122
5.2.1. Présentation de la ville et la zone d'étude.....	122
5.2.2. Caractéristiques morphologiques et architecturales de la ville de Ghardaïa .....	123
5.2.3. Méthodes .....	125
5.3. Mesures du confort thermique dans les espaces extérieurs .....	133
5.3.1. Présentation de la zone d'étude.....	133
5.3.2. L'indice du confort choisi .....	133
5.4. Mesure de l'îlot de chaleur urbain de surface via télédétection .....	133
5.4.1. Zone d'étude .....	133
5.4.2. Images satellitaires de Landsat-8 et traitement numérique .....	134
5.4.2.1. Caractéristiques du capteur Landsat-8 .....	134
5.4.2.2. Acquisition des images Landsat 8.....	135
5.4.2.3. Traitement de l'image satellitaire Landsat-8 .....	136
5.4.2.4. Logiciel utilisé.....	137
5.4.2.5. Correction géométrique.....	137
5.4.2.6. Correction atmosphérique .....	138
5.4.2.7. Calcul de la Radiance spectrale TOA (Top of Atmosphere) à partir de DN .....	138

5.4.2.8. Conversion de la température TOA en luminosité (Température de brillance) .....	138
5.4.2.9. Calcul de l'NDVI .....	139
5.4.2.10. Calcul de la proportion de végétation Pv .....	139
5.4.2.11. Calcul de l'émissivité .....	140
5.4.2.12. Calcul de la température de surface terrestre LST .....	140
5.4.2.13. La cartographie de l'îlot de chaleur de surface .....	141
5.4.2.14. Calcul de l'indice SAVI .....	142
5.4.2.15. Calcul de l'indice NDBI .....	142
5.4.3. Images satellitaires de Sentinel-2 et traitement numérique .....	143
5.4.3.1. Caractéristiques du capteur Sentinel-2 .....	143
5.4.3.2. Acquisition des images Sentinel-2A .....	144
5.4.3.3. Traitement de l'image satellitaire Sentinel-2A .....	146
5.4.3.4. Logiciel utilisé .....	147
5.4.3.5. Correction géométrique .....	147
5.4.3.6. Correction atmosphérique .....	147
5.4.3.7. Calibration radiométrique .....	147
5.4.3.8. La composition colorée .....	147
5.4.3.9. Classification de la zone d'étude et carte d'occupation du sol .....	147
5.5. Conclusion .....	148
6. ÉTUDE DE LA VARIATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR DE L'AIR ET DU CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR .....	151
6.1. Introduction .....	151
6.2. La variation de l'îlot de chaleur de l'air .....	151
6.2.1. Variation de la température de l'air .....	151
6.2.1.1. Variation diurne (14h30) .....	152
6.2.1.2. Variation nocturne (00:00h et 05 :00h) .....	154
6.2.2. Variation de l'humidité relative de l'air .....	155
6.2.2.1. Variation diurne (14h30) .....	155
6.2.2.2. Variation nocturne (00:00h et 05 :00h) .....	156
6.2.3. Variation de la vitesse de l'air .....	156
6.3. Discussion de l'îlot de chaleur de l'air à Ghardaïa .....	157
6.3.1. La variation intra-urbaine de la température d'air : l'effet de la végétation et l'impact des caractéristiques des sites .....	157
6.3.1.1. Variation diurne de la température de l'air (14h30) .....	157
6.3.1.2. Variation nocturne de la température d'air (00:00h et 05 :00h) .....	160
6.3.2. L'impact de la végétation sur les taux d'humidité .....	162
6.3.2.1. Variation diurne (14h30) .....	162
6.3.2.2. Variation nocturne (00:00h et 05 :00h) .....	163

6.3.3. Effet de la vitesse de l'air sur les écarts de température et d'humidité.....	164
6.4. L'étude du niveau confort thermique extérieur .....	164
6.5. Conclusion.....	169
6.5.1. La variation de l'îlot de chaleur de l'air.....	169
6.5.2. Le confort thermique en espace extérieur .....	170
7. ÉTUDE DE L'ÎLOT DE CHALEUR DE SURFACE.....	172
7.1. Introduction .....	172
7.2. La cartographie de l'occupation du sol à Ghardaïa .....	172
7.2.1. La composition colorée.....	172
7.2.2. Classification de la zone d'étude et carte d'occupation du sol .....	174
7.2.2.1. L'évaluation de la précision de la classification.....	175
7.2.3. Cartographie du végétal par les indices de végétation.....	176
7.2.3.1. L'indice NDVI.....	176
7.2.3.2. La proportion de la végétation Pv.....	178
7.2.3.3. L'indice SAVI .....	178
7.2.4. Cartographie du bâti.....	179
7.2.4.1. Cartographie du bâti via l'indice NDBI .....	179
7.3. Cartographie de l'émissivité de surface.....	181
7.4. Cartographie de la température de surface LST .....	181
7.4.1. La corrélation entre le LST et les NDVI, SAVI et NDBI.....	183
7.4.1.1. Corrélation entre le LST et les indices spectraux dans toute la zone d'étude	183
7.4.1.2. Corrélation entre le LST et les indices spectraux dans le centre-ville de	
Ghardaïa.....	185
7.4.1.3. Statistiques de LST, NDVI, NDBI et SAVI par classe .....	186
7.5. Discussion.....	187
7.5.1. Carte d'occupation du sol de Ghardaïa .....	187
7.5.2. Répartition du couvert végétal à Ghardaïa.....	189
7.5.3. Répartition du bâti à Ghardaïa (Analyse de NDBI).....	189
7.5.4. Variation de la température de surface LST à Ghardaïa : spatialisation de l'îlot de	
chaleur de surface.....	190
7.5.5. Relation du couvert végétal avec la température de surface .....	196
7.5.6. Relation du bâti avec la température de surface .....	198
7.5.7. Impact du type des tissus urbains sur la LST.....	199
7.6. Relation entre l'ICU et le l'ICUS .....	200
7.7. Conclusion .....	201
Conclusion de la partie 2 .....	202

CONCLUSION GÉNÉRALE .....	203
BIBLIOGRAPHIE .....	212
ANNEXES .....	261

## LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1.1	Représentation schématique des différentes couches. (source : : Leroyer (2006), dans Piringer et al. 2002).	17
1.2	Structure verticale de la couche limite urbaine pour des vitesses de vent inférieures et supérieures à 3 m/s (tiré de Ringenbach (2004), : D'après Mestayer et Anquetin, (1995)).	18
1.3	La couche de canopée urbaine (Urban Canopy Layer UCL) et la : couche de surface (Surface Layer SL) (Source : Boukhabla, 2015)	20
1.4	Classification des climats du monde selon Köppen-Geiger (source : Peel et al., 2007). Les zones chaudes et arides sont en rouge : (BWh).	21
1.5	: Consommation d'énergie en Algérie par secteur (BEN, 2023)	26
1.6	Bilan radiatif au-dessus d'une ville. D'après Oke (1987) (Tiré de : Foissard, 2015).	28
1.7	Termes de l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de : Oke, 1987). (Tiré de Leconte, 2014).	30
2.1	Illustration du profil thermique caractéristique d'un îlot de chaleur : urbain. D'après Akbari et al. (1992).	35
2.2	Facteur de Vue du Ciel dans un canyon urbain et rapport d'aspect. H représente la hauteur du bâti et W la largeur de la rue. Adaptée : de Oke (1981) (Tirée de Parmentier, 2010)	37
2.3	Variations des profils de la vitesse du vent pour différentes : surfaces. Source : Gratia et UCL, 2000.	38
2.4	Exposition solaire et piégeage radiatif en milieu urbain : (Colombert, 2008).	39
2.5	Exemple d'albédos par type de matériaux et surfaces dans l'espace : urbain. (Tirée de : ICU, 2017)	40
2.6	Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain (USEPA, : 2008).	43
2.7	Profil schématique de la variation de la température de l'air en : zone urbaine. (Tiré de Pigeon, et al., 2008, adapté de Oke, 1987)	47

2.8	Schéma des flux d'énergie et de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine (à gauche) et rural (à droite) pour une journée avec un ciel clair (Gill, 2004), d'après Bridgman et al. (1995)).	49
2.9	Facteurs influençant le confort thermique des individus. : (Source :Grosdemouge, 2020)	57
2.10	Paramètres déterminant le confort thermique (Source : Perrineau, 2013, cité dans Benamouma, 2018)	58
2.11	Les différents types d'échanges thermiques entre le corps et son ambiance (Source : Depecker et al., 1989).	59
3.1	Schématisation des trois types d'îlots de chaleur urbains. Tiré de Carpentier, 2012 (adapté de Oke, 1997).	70
3.2	: L'image satellite. (Source : CCT, 2019)	74
3.3	: Processus de télédétection. (Source : CCT, 2019).	75
3.4	: L'onde électromagnétique (Envcal, 2008).	77
3.5	Le spectre électromagnétique simplifié. Source : <a href="https://www.lelivrescolaire.fr">https://www.lelivrescolaire.fr</a>	78
3.6	Comportement spectral de certaines surfaces dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. (Envcal, 2008).	78
3.7	La classification thématique d'image numérique. : (Source : CCT <a href="https://www.rncan.gc.ca/">https://www.rncan.gc.ca/</a> )	83
3.8	: Exemple de classification d'image (Tébourbi, 2009).	83
4.1	: Structure d'un arbre. Source : <a href="http://www.aquisav.com">www.aquisav.com</a>	89
4.2	Le palmier dattier. Source : <a href="http://relais-sciences.org">relais-sciences.org</a> , 2012 in Achoura (2013).	90
4.3	Arbre, arbuste, arbrisseau et sous-arbrisseau. Source : <a href="http://www.mabiologie.com">www.mabiologie.com</a>	90
4.4	: Plantes grimpantes. Source : <a href="http://www.gerbeaud.com">www.gerbeaud.com</a>	91
4.5	: Les herbacées. Source : <a href="http://www.anglevert-services.com">www.anglevert-services.com</a>	91
4.6	: Les succulentes. Source : <a href="https://espacepouirlavie.ca">https://espacepouirlavie.ca</a>	92

4.7	Les parcs, jardins. Central Park à New York. Source :	92
	: <a href="http://www.futura-sciences.com">www.futura-sciences.com</a>	
4.8	Arbres d'alignement. Los-angeles-tree-tunnels.	93
	: Source : Pernell Quilon, <a href="http://www.buzzfeed.com">www.buzzfeed.com</a>	
4.9	La végétalisation des sols. Pelouse et bordure fleurie –	93
	: Source : Dude Pascalou / <a href="http://www.flickr.com">www.flickr.com</a>	
4.10	Toit vert. Gap's headquarters in San Bruno, California.	94
	: Source: Photographer: Steve Proehl/ <a href="http://www.gettyimages.fr">www.gettyimages.fr</a>	
4.11	: La façade végétalisée. Source : <a href="http://www.istockphoto.com">www.istockphoto.com</a>	94
4.12	Les plantes grimpantes (treillis et pergolas).	95
	: Source : <a href="https://designmag.fr/jardins-et-terrasses">https://designmag.fr/jardins-et-terrasses</a>	
4.13	: Les haies. Source : <a href="http://www.rustica.fr">www.rustica.fr</a>	95
4.14	: Ports d'arbre. Source : <a href="https://cicadelle.org">https://cicadelle.org</a>	96
4.15	L'usage de la végétation caduque ou persistante.	97
	: Source : <a href="http://www.marine-bezia-architecte.com">www.marine-bezia-architecte.com</a>	
4.16	Les incidences du microclimat et de la pollution sur la végétation.	99
	: (Source : Gillig et al., 2008)	
4.17	Diminution du bruit en présence d'une bande végétale.	102
	: Source : Bruxelles Environnement (2021).	
4.18	Effet d'ombrage (à gauche) et L'évapotranspiration au niveau de	105
	: l'arbre (à droite). Source : APUR, Cahier numéro 1 (2012).	
4.19	Effet du port de l'arbre sur l'ombrage. Source : Meerow et Black	106
	: (1993).	
4.20	Comparaison de la surface d'ombre créée pour une canopée étalée	106
	: et érigée. Source : Kotzen (2003).	
4.21	Interaction de la végétation avec le rayonnement solaire. Source :	107
	: Reiter (2007).	
4.22	: Absorption, transmission et réflexion des feuilles d'arbres. Source	107

	: Kotzen (2003)	
4.23	Température de surface d'un arbre. Ligne blanche = isothermes de 27, 28 et 29°C. Source : Alvarez et al., (2000) cité dans Vinet (2000).	108
4.24	Différence de température de surface du gazon et des surfaces asphaltées. Source : Apur (2012).	108
4.25	Différence de température de surface du gazon et des surfaces pavées. Source : Apur (2012).	109
4.26	L'effet brise-vent de la végétation. Source: Tree Windbreaks for Farms and Homes, Purdue University Extension. : <a href="http://ag.purdue.edu/extension/eden/Disasters/Tree%20Windbreaks.pdf">ag.purdue.edu/extension/eden/Disasters/Tree%20Windbreaks.pdf</a>	109
4.27	Différence de température entre les surfaces végétales et minérales. Vues aériennes sur le Champs-de-Mars vers 20h peu après le coucher du soleil. Source : Apur (2012).	110
4.28	L'influence de l'eau et de la végétation dans la lutte contre l'ICU. (Données Landsat 8, 2019). Exemple d'un quartier à Besançon, France. Source : AUDAB (2021).	110
4.29	Les couverts végétaux étendus présentent des températures plus fraîches. Source : AboElata (2017)	114
5.1	: Situation de la ville de Ghardaïa. Source : Bensalah et al. (2018).	123
5.2	: La vallée du M'zab (d'après OPVM, 2012).	123
5.3	Morphologie originale de la vallée du M'zab (le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude). (D'après Ravéreau et al., 2003).	124
5.4	Vue aérienne sur le ksar de Ghardaïa. Source : Arthus-Bertrand (2014).	125
5.5	Les points de mesure dans le long du parcours urbain (fond de carte : GoogleEarth)	126
5.6	: Profil schématique sur la zone d'étude. (Source : Auteur)	127
5.7	Aperçu sur l'image sélectionnée du Landsat 8 OLI-TIRS. Source: l'USGS (United States Geological Survey)	136
5.8	Chaîne de traitement des données Landsat-8 pour l'extraction de la température de surface LST. Source Kaplan et al. (2018).	137

5.9	Aperçu sur l'image sélectionnée du Sentinel 2 (tuile 1).	145
	: Source:Copernicus Open Access Hub.	
5.10	Aperçu sur l'image sélectionnée du Sentinel 2 (tuile 2).	145
	: Source:Copernicus Open Access Hub.	
5.11	: Fusion des deux tuiles sélectionnées du Sentinel-2A.	146
6.1	: Température moyenne de l'air des sites de mesure.	152
6.2	: Vue globale sur les collines et la vallée du M'zab. Source : [2]	155
6.3	: Humidité relative de l'air des sites de mesure.	156
6.4	: Les vitesses de l'air dans les sites de mesure.	157
6.5	: Valeurs de l'indice THI dans l'ensemble des sites.	165
7.1	Composition couleurs-naturelles de la zone d'étude	173
	: (Image Sentinel-2A 16/08/2015).	
7.2	Composition de fausses couleurs de la zone d'étude (image Sentinel-2A 16/08/2015). La couleur rouge met en évidence la	174
	: végétation.	
7.3	Carte d'occupation du sol de la zone de Ghardaïa.	175
	: (Image Sentinel-2A du 16/08/2015).	
7.4	: Carte d'occupation du sol du « centre-ville » de Ghardaïa.	175
7.5	: L'indice NDVI de la zone d'étude (image Landsat-8).	177
7.6	: L'indice NDVI du « centre-ville » de Ghardaïa.	177
7.7	: La proportion de végétation de la zone d'étude. (Image Landsat-8).	178
7.8	: L'indice SAVI de la zone d'étude (image Landsat-8).	179
7.9	: L'indice SAVI du « centre-ville » de Ghardaïa.	179
7.10	: L'indice NDBI de la zone d'étude (image Landsat-8).	180
7.11	: L'indice NDBI du centre-ville de Ghardaïa.	180
7.12	: La carte des valeurs de l'émissivité de surface (image Landsat-8).	181
7.13	: Température de surface (LST) de la ville de Ghardaïa et ses	182

alentours, pour la journée du 27 Juillet 2015 à 10h20.

7.14	Température de surface (LST) du « centre-ville » de Ghardaïa : pour la journée du 27 Juillet 2015 à 10h20.	182
7.15a	: La relation entre le LST et le NDVI (la zone d'étude entière).	183
7.15b	: La relation entre le LST et le SAVI (la zone d'étude entière).	184
7.15c	: La relation entre le LST et le NDBI (la zone d'étude entière).	184
7.16a	: La relation entre le LST et NDVI (dans le centre-ville).	185
7.16b	: La relation entre le LST et SAVI (dans le centre-ville).	185
7.16c	: La relation entre le LST et NDBI (dans le centre-ville).	186
7.17	Classification de l'occupation du sol dans cinq villes désertiques : différentes (Fan et al., 2017).	188
7.18	Les points chauds (hot spots) des cimetières dans la ville de Ghardaïa. L'image LST (en transparence de 50 %) est superposée : à l'image de couleurs réelles.	196

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	: Classes de l'indice thermo-hygrométrique THI. Source : Ghani et al., (2017).	64
2.2	: Échelle de valeurs de l'indice HI. Source : Emmanuel et al., (2016) cité dans Grosdemouge (2020).	65
2.3	: Echelle de référence pour l'indice Humidex. Source : Tahbaz (2011).	65
2.4	: Échelle limites de l'indice WBGT. Source : Tahbaz (2011).	66
2.5	: Échelle de valeur de l'indice IZA. Source : Ruiz et Correa (2015a).	67
3.1	: Interprétation du coefficient de Kappa. (Source : Landis et Koch, 1977 ; Chalifoux et al., 2006)	85
5.1	: Description des sites de mesure (photos et profil).	127
5.2	: Caractéristiques des capteurs du satellite Landsat-8 OLI-TIRS. Source : <a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a>	135
5.3	: Caractéristiques de l'image Landsat 8 OLI-TIRS	136
5.4	: Les constantes de conversion spécifique de la bande 10 K1 et K2.	139
5.5	: Caractéristiques du capteur Multispectral Instrument (MSI) embarqué sur les deux satellites Sentinel-2. Source : <a href="https://sentinel2.cnes.fr/fr/instruments-2">https://sentinel2.cnes.fr/fr/instruments-2</a>	143
5.6	: Caractéristiques de l'image Sentinel-2A Level-1C.	146
5.7	: Les classes utilisées dans la cartographie de l'occupation du sol.	148
6.1	: Valeurs de rayonnement solaire dans différents sites à 14 :30 h.	153
6.2	: Valeurs de l'indice THI de l'ensemble de sites.	167
7.1	: La matrice de confusion de la classification (tableau de contingence).	176
7.2	: Nomenclature et surface des classes.	176

7.3	: Statistiques des corrélations LST, NDVI, NDBI et SAVI (toute la zone d'étude).	184
7.4	: Statistiques des corrélations LST, NDVI, NDBI et SAVI (pour le centre-ville).	186
7.5	: Statistiques de LST, NDVI, NDBI et SAVI par classe (résolution 10m).	186

## LISTE DES ABREVIATIONS

APRU E	Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie
BEN	Bilan Énergétique Nationale
CCT	Centre canadien de télédétection
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLU	Couche Limite Urbaine
CLS	Couche Limite de Surface
CNAS	Caisse Nationale des Assurances Sociales
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
IFU	Îlot de Fraîcheur Urbain
IRT	Infrarouge Thermique
DI	Discomfort Index
DN	Digital Number
DOS	Dark Object Soustraction
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts pour l'Etude du Climat
LAI	Leaf Area Index
LULC	Land Use/Land Cover
LSE	Land Surface Emissivity
LST	Land Surface Temperature
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Operational Land Imager
OMM	Organisation Météorologique Mondiale

ONM	Office National de la Météorologie
PCI	Parc Cool Island
PNC	Plan National Climat
PT	Point (de mesure)
PIR	Proche Infrarouge
Pv	Proportion de végétation
ROI	Region Of Interest
SIG	Système d'Informations Géographiques
SUHI	Surface Urban Heat Island
SVF	Sky View Factor
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SCP	Semi Automatic Classification Plug-in
THI	Temperature-Humidity Index
TIRS	Thermal Infra-red Sensor
TOA	Top Of Atmosphere
TOC	Top of Canopy
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System

## RÉSUMÉ

Les villes contemporaines dans les climats chauds et arides sont soumises à de multiples extrêmes météorologiques tels que les épisodes caniculaires. La vulnérabilité des citoyens aux vagues de chaleur est exacerbée par le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU). La surchauffe urbaine provoque une dégradation de l'ambiance thermique dans la ville saharienne contemporaine. Les niveaux de confort thermique conditionnent largement la pratique et l'usage des espaces extérieurs urbains. La végétation urbaine joue un rôle capital dans le microclimat et contribue à l'amélioration du confort thermique, en particulier dans les milieux désertiques. Ce travail de recherche a pour objectif la caractérisation et la spatialisation de l'îlot de chaleur de l'air et de l'îlot de chaleur de surface dans la ville désertique de Ghardaïa, en période estivale. De plus, il vise la quantification de l'effet de rafraîchissement du végétal urbain et l'évaluation des niveaux de confort thermique dans les espaces extérieurs. Le travail d'investigation s'appuie sur une campagne de mesure *in-situ* des paramètres météorologiques, ainsi que l'utilisation d'images satellitaires. Le travail est axé sur l'analyse des données issues de la campagne de terrain et l'interprétation de la cartographie de l'occupation du sol et des températures de surface associées (LST). Les résultats ont permis de mettre en évidence les variations intra-urbaines de la température d'air et de surface dans la ville de Ghardaïa. Plusieurs facteurs déterminent les conditions thermiques des sites : le facteur de vue au ciel, la présence de la végétation, la chaleur anthropique produite par les climatiseurs et la circulation automobile, l'albédo, etc. Les résultats démontrent des comportements thermiques variés, tout d'abord l'existence d'un « archipel » de chaleur et non pas un îlot de chaleur unique, et un mélange d'îlots de chaleur et d'îlots de fraîcheur. Les résultats sur le confort thermique en ville ont révélé que le stress thermique à Ghardaïa est extrême. Les ambiances thermiques urbaines ne sont pas confortables même la nuit, avec des températures nocturnes supérieures à 30 °C. Le végétal apporte une légère amélioration du confort thermique de 5,25 % par rapport aux sites sans végétation. La télédétection spatiale, particulièrement dans l'infrarouge, s'est révélée être un outil incontournable dans l'étude de la surchauffe urbaine et de l'impact de la végétation sur le microclimat. La superposition de la carte d'occupation du sol avec l'image thermique a permis la spatialisation des îlots de chaleur urbains de surface à Ghardaïa. La ville manifeste un îlot de fraîcheur diurne d'une intensité maximale de 10 °C, tandis que l'effet de rafraîchissement de la végétation s'élève à 15 °C. L'ombre des bâtiments et de la végétation réduit énormément les températures de surface et entraîne la création d'îlots de fraîcheur urbains. L'étude a montré l'existence d'une corrélation négative entre la température de surface (LST) et la végétation et une corrélation positive entre la LST et le bâti et les sols nus. Les espaces verts quant à eux, apparaissent comme des poches de fraîcheur « cool-spot » notamment en journée. Les couverts végétaux de grande taille tels que la palmeraie de Ghardaïa et celle de Ben-Isguen sont de véritables « puits-à-chaleur ». Ils contribuent à l'amélioration de la qualité des ambiances thermiques urbaines au sein de l'agglomération. La carte thermique obtenue montre que le type du tissu urbain, l'albédo et la nature des matériaux de construction influencent directement la LST. L'étude de l'îlot de chaleur urbain de surface en journée via télédétection a complété l'étude de l'îlot de chaleur de l'air mesuré sur le terrain. De même, elle a permis de valider l'impact positif de la végétation.

**Mots-clés :** Îlot de chaleur urbain (ICU), climat chaud-aride, végétation, espace public, confort thermique, Température de surface, Télédétection, Ghardaïa

## ABSTRACT

Contemporary cities in hot arid climates are subject to multiple weather extremes such as heatwave episodes. The vulnerability of city dwellers to heat waves are exacerbated by the urban heat island (UHI) phenomenon. Urban overheating leads to a deterioration of the outdoor environment in contemporary Saharan cities. Thermal comfort levels largely determine the practice and use of urban outdoor spaces. Urban vegetation has a great impact on microclimate and contributes to improve the comfort and well-being of urban space users, particularly in desert environments.

The aim of this research is to characterize and spatialize the air and surface heat island in the desert city of Ghardaïa, in summer. Likewise, it attempts to quantify the cooling effect of urban vegetation and assess thermal comfort levels in urban public spaces. The investigative work is based on an in-situ measurement campaign of meteorological parameters, as well as the use of satellite images. The work focuses on analyzing data from the field campaign and interpreting the mapping of land use and associated surface temperatures (LST). The results highlighted intra-urban variations in air and surface temperature in the city of Ghardaïa. Several factors determine the thermal conditions of sites: the sky view factor, the presence of vegetation, anthropogenic heat produced by air conditioners and vehicle traffic, albedo, etc. The results show a variety of thermal behaviors, firstly the existence of a heat "archipelago" rather than a single urban heat island, and a mixture of heat islands and cool islands. The outdoor thermal comfort results revealed an extreme heat stress in Ghardaïa. Urban thermal conditions are not comfortable even at night, with nighttime temperatures not less than 30°C. Vegetation provides a slight improvement in thermal comfort of 5.25% compared with sites without vegetation. Spatial remote sensing, particularly in the infrared, has proved to be an essential tool in the study of urban overheating and the impact of vegetation on the microclimate. Overlaying the land-use/land-cover map with the thermal image allowed the study of urban surface heat island distribution in Ghardaïa. The city exhibits diurnal urban cool islands with a maximum intensity of 10°C, while the cooling effect of vegetation cover rises to 15°C. Shade from buildings and vegetation greatly reduces surface temperatures, creating urban cool islands. The study showed a negative correlation between LST and vegetation and a positive correlation between LST and buildings/bare soils. Green spaces appear as cool-spots during the day. Large green areas such as the Ghardaïa and Ben-Isguen palm groves are real "heat sinks". They contribute to improving urban thermal environments within the city of Ghardaïa. The thermal map showed that the type of urban fabric, the albedo and the nature of the construction materials have a direct influence on the LST. The study of the urban surface heat island during the day via remote sensing complemented the study of the air heat island measured in the field. It also validated the positive impact of vegetation.

### **Keywords:**

urban heat island (UHI), hot-arid climate, vegetation, outdoor space, thermal comfort, surface temperature, remote sensing, Ghardaïa

## ملخص

المدن المعاصرة في المناطق الحارة والجافة عرضة للعديد من المخاطر المناخية القاسية كموجات الحر الشديدة. إن ظاهرة الجزيرة الحضرية الحرارية (UHI) تقاوم ضعف وهشاشة سكان المدن في مواجهة القيط في فصل الصيف. إن الاحتباس الحراري الحضري يؤثر سلبا على الراحة الحرارية في البيئة الحضرية الخارجية. مستويات الراحة الحرارية في الفضاءات الخارجية تحدد بشكل كبير درجة وكثافة ونوعية ممارسة نشاطات السكان في هذه الفضاءات. يعتبر العنصر النباتي عاملا ملطفا للمناخ المحلي الحضري، مما يساعد على خلق بيئة مريحة للسكان خلال قضاء أوقاتهم في الفضاءات الخارجية خصوصا في المدن الحارة والجافة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة توصيفية للجزيرة الحرارية الحضرية للهواء والأسطح في مدينة غرداية الصحراوية في فصل الصيف. كما يهدف أيضا إلى قياس مدى تلطيف الغطاء النباتي لدرجات الحرارة الحضرية وكذا تقييم مستويات الراحة الحرارية في الفضاءات الخارجية. تركز منهجية البحث على حملة قياسات ميدانية للمتغيرات المناخية بالإضافة إلى استغلال صور الأقمار الصناعية. تقوم الدراسة على تحليل القياسات والبيانات واستقراء خرائط شغل الأراضي وتفسير التوزيع المكاني لدرجة حرارة سطح الأرض (LST).

سمحت النتائج بإبراز التغيرات الحضرية في درجة حرارة الهواء والأسطح في مدينة غرداية. تحدد عدة عوامل الظروف الحرارية للفضاءات الحضرية الخارجية من بينها: عامل درجة الانفتاح على السماء، وجود الأشجار، شدة انبعاث الحرارة من النشاط البشري الحضري كمكيفات الهواء والمركبات، درجة انعكاسية الأسطح، إلخ. السلوك الحراري لمختلف الفضاءات الحضرية يتراوح بين جزيرة حارة وجزيرة باردة. تظهر المدينة «أرخبيلًا حراريًا» بدلا من جزيرة حرارية وحيدة. كما كشفت نتائج مستويات الراحة الحرارية أن مدينة غرداية تعاني من إجهاد حراري شديد. فالفضاءات الخارجية ليست مريحة حتى في الليل، حيث أن درجات الحرارة ليلا لا تقل عن 30 °م. توفر المساحات الخضراء تلطيفا طفيفا للجو بنسبة 5.25%. أثبت الاستشعار عن بعد بالأشعة تحت الحمراء أنه أداة قيمة في دراسة جزيرة الحرارة الحضرية وتأثير الغطاء النباتي على المناخ المحلي. وأظهرت مطابقة خريطة شغل الأراضي مع الخريطة الحرارية للمدينة وما حولها وجود جزر حضرية حرارية بدرجة قصوى تبلغ 10 °م، بينما أظهرت الفضاءات الخضراء تلطيفا و تبريدا للأسطح بدرجة قصوى تبلغ 15 °م. الظل الناتج عن المباني والأشجار يحفظ المساحات والأسطح في مستويات حرارة منخفضة وبالتالي يخلق جزرا حضرية باردة. أظهرت الدراسة أيضا وجود ارتباط عكسي بين درجة حرارة الأسطح (LST) ومؤشر الغطاء النباتي وكذا ارتباط إيجابي بين درجة حرارة الأسطح (LST) ومؤشر المساحات المبنية أو التربة العارية. تشكل المساحات الخضراء الحضرية «بقعا باردة» خلال النهار. ويمثل الغطاء النباتي الكبير و الكثيف كواحتي نخيل غرداية و بن يزقن مصرفا حراريا (أشبه ببالوعة حرارية) ، و بالتالي تساهم تلك المساحات بشكل فعال في تخفيف وطأة الاحتباس الحراري الحضري في مدينة غرداية و تحسين الظروف الحرارية في فضاءاتها الخارجية. لقد أظهرت الخريطة الحرارية أن درجة تراص أو انفتاح النسيج العمراني و درجة انعكاسية الأسطح، و كذا الخصائص الحرارية لمواد البناء، هي عوامل تحدد درجة حرارة الأسطح (LST) في مختلف قطاعات المدينة. لقد كانت دراسة الجزيرة الحرارية للأسطح الحضرية مكتملة لدراسة الجزيرة الحرارية للهواء الحضري. كما أكدت التأثير الإيجابي للغطاء النباتي.

## الكلمات المفتاحية:

الجزيرة الحضرية الحرارية، المناخ الحار والجاف، الغطاء النباتي، الفضاء الحضري الخارجي، الراحة الحرارية، درجة حرارة الأسطح، الاستشعار عن بعد، غرداية.

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Introduction : mise en contexte

Le climat est un paramètre important dans le choix des sites pour l'implantation des villes à travers l'histoire (Givoni,1978). La climatologie urbaine comme discipline, a connu une grande évolution à partir des années 1950. Les avancées technologiques en matière de moyens d'observation météorologique ou d'outils numériques et de simulation ont accéléré la recherche en climatologie urbaine depuis le début des années 1980 (Vysoudi, 2015 ; Colombert et al., 2012). La climatologie urbaine est une science pluridisciplinaire en raison de l'interaction entre les différents paramètres météorologiques et les éléments hétérogènes du milieu urbain (Colombert et al., 2012). En effet, le climat urbain est différent de celui du milieu rural environnant. Il est caractérisé par une élévation des températures de l'air, un changement des niveaux d'humidité, une diminution de la vitesse du vent et une augmentation des émissions de chaleur et des polluants atmosphériques. Le phénomène de l'amplification de la température de l'air est connu par « l'îlot de chaleur urbain » (ICU). Il est responsable de la détérioration de la qualité des ambiances thermiques extérieures en ville, notamment en période estivale (Zhao et al., 2018). L'ICU résulte du processus d'urbanisation qui entraîne des modifications des conditions atmosphériques et des paramètres climatiques (Oke et al., 2017 ; Najjar et al., 2010). L'urbanisation croissante est due à l'augmentation de la population urbaine -à l'échelle mondiale- qui devrait passer de 56 % en 2021 à 68 % en 2050 (UN-Habitat, 2022). L'ampleur de cette croissance provoque une expansion des zones urbaines au détriment des couvertures végétales telles que les zones naturelles ou agricoles, les forêts ou les oasis. Cela se traduit par une aggravation du climat urbain et des conditions de vie dans les villes notamment dans les zones chaudes et arides. Plusieurs facteurs participent à la formation de l'ICU : le climat et la géographie des sites ; l'ampleur du phénomène d'urbanisation ; la morphologie urbaine ; les matériaux utilisés et l'état des surfaces ; la réduction de l'évapotranspiration par l'imperméabilisation et la diminution du végétal ; la pollution et les émissions liées aux activités anthropiques (Stewart et Mills, 2021). Le changement climatique global accentue les effets néfastes de la croissance urbaine. Il est à l'origine de multiples événements climatiques extrêmes (sécheresses, vagues de chaleur, etc.). Le réchauffement planétaire est aggravé en milieux urbains par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). A titre indicatif, le Canada a enregistré un record historique de température de 49,6 °C en 2021 (Prepared BC, 2021). Selon le rapport du groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) de 2022, le réchauffement

global contribue à amplifier les vagues de chaleur et les canicules notamment dans les climats chauds et arides (GIEC, 2022 ; Renard et al., 2015). Les taux de morbidité et de mortalité liés aux températures élevées augmentent significativement aux moments des chaleurs estivales extrêmes (Harlan et al., 2006). Le stress thermique impacte directement les ambiances thermiques urbaines dans les régions chaudes et arides. Les personnes les plus exposées aux risques de chaleur sont les personnes malades ou fragiles (Cadot et Spira, 2006). Les quatre cinquièmes du territoire de l'Algérie sont caractérisés par un climat aride et semi-aride. Les projections météorologiques montrent que l'Algérie est exposée à une forte hausse des températures de l'air dans le futur (Wahl et al., 2018 ; Mostefa-Kara, 2008 ; Tabet-Aoul, 2008). L'urbanisation croissante risque fortement d'amplifier le stress thermique dans les villes. Celles-ci doivent faire face à la recrudescence des canicules en été. Les concepteurs urbains expriment, de plus en plus, un besoin de connaissances et de recommandations pratiques afin d'intégrer la dimension climatique dans les opérations d'aménagement urbain. Les villes du Sahara, en particulier, sont très vulnérables à cause de leur écosystème fragile. Elles souffrent d'une urbanisation accélérée entraînant la disparition des palmeraies (Côte, 2005 ; Côte, 2002). En outre, l'urbanisme contemporain provoque une surconsommation d'énergie pour la climatisation en été (BEN, 2019). Le contexte des villes chaudes et arides requiert donc une attention toute particulière face au risque des canicules estivales.

Il existe toute une palette de mesures pour faire face aux îlots de chaleur urbains. Parmi les moyens de lutte, la végétalisation est considérée comme un élément déterminant (Battista et al., 2020). Elle représente une stratégie « sans regret » pour faire face à la surchauffe urbaine.

Le végétal urbain a de nombreux rôles et bienfaits microclimatiques. La végétation régule le microclimat à travers plusieurs mécanismes : l'ombrage, l'évapotranspiration et la modification des écoulements aérauliques (Qin et Li, 2019). La création des espaces verts en milieu urbain contribue à atténuer les effets néfastes de la chaleur urbaine (Drapeau et al., 2022 ; Bowler et al., 2010). Le couvert végétal pour les villes chaudes et arides est un élément vital à plusieurs égards. La chaleur urbaine impacte directement la qualité des ambiances urbaines (Dasari et al., 2021). Dans le milieu désertique inhospitalier, l'écosystème oasien joue un rôle déterminant dans l'amélioration des ambiances thermiques extérieures. Ainsi, le confort thermique dans les espaces extérieurs (non privatifs) est très important pour la santé et le bien-être des citoyens. Il influe sur le type et la qualité des activités qui s'y déroulent. En effet, ces espaces publics constituent des

espaces à vivre la ville. Et la pratique des espaces urbains par les usagers dépend, entre autres, de la qualité de l'ambiance thermique extérieure. Cependant, le niveau du confort thermique extérieur est difficilement caractérisable en raison de l'hétérogénéité du milieu urbain (Grosdemouge, 2020). Ce confort est souvent associé à la présence de végétation ou d'eau de surface. La végétation urbaine participe à l'atténuation de l'ICU et à l'amélioration du confort thermique. En effet, ces deux éléments (végétation et eau) participent à l'atténuation de l'ICU et à l'amélioration du confort thermique. Les études montrent que les espaces verts urbains constituent des « puits-à-chaleur » pour la température de l'air (Kraemer et Kabisch, 2022 ; Marando et al., 2022 ; Knight et al., 2021 ; Rahman et al., 2020). Ce faisant, les couverts végétaux créent des îlots de fraîcheur remarquables dans les mesures de température de surface (Land Surface Temperature, LST). Ces dernières sont issues d'images de télédétection en infrarouge thermique ; elles sont devenues un outil incontournable dans l'étude de la surchauffe urbaine (Westendorff, 2020).

De tout ce qui précède, il apparaît que le contexte du réchauffement climatique, exacerbe le phénomène d'ICU et affecte directement la qualité des espaces publics. De nos jours, il y a un intérêt grandissant pour veiller à la qualité des espaces urbains dans les villes sahariennes contemporaines, dont les ambiances extérieures connaissent une dégradation importante. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail de recherche.

## **La problématique**

L'îlot de chaleur urbain et le réchauffement global dans les zones chaudes et arides ont des effets très néfastes sur la santé des individus, sur l'environnement et sur la consommation d'énergie, notamment en saison estivale. Suite au déclin de l'urbanisme bioclimatique vernaculaire, la ville saharienne est aujourd'hui très vulnérable à ces modifications. Face à ces enjeux, la caractérisation microclimatique des ambiances urbaines devient une nécessité et la compréhension du fonctionnement du climat urbain vise à renforcer la résilience des villes sahariennes et à faire face aux contrecoups du changement climatique (Cote, 2005). Les espaces urbains publics (rues, places, jardins) sont dès lors aussi importants que les espaces intérieurs et privés.

L'étude des caractéristiques microclimatiques des espaces extérieurs vise à améliorer les ambiances thermiques urbaines pour les usagers des espaces publics (Al-Bouwarthan et al., 2019). La recrudescence des vagues de chaleur extrêmes impose l'étude du phénomène d'îlot de chaleur urbain et l'évaluation des niveaux de confort thermique

dans les régions sahariennes. L'enjeu consiste à intégrer la préoccupation climatique dans la planification urbaine et la prise en compte des chaleurs extrêmes dans les projets d'aménagement urbain en zone désertique.

La ville de Ghardaïa est prise comme cas d'étude. L'urbanisation accélérée et la croissance démographique à Ghardaïa ont conduit à la diminution de la superficie de ses oasis et à une concentration de bâtiments et d'activités (Cote, 2005). Les habitants de la ville de Ghardaïa souffrent d'une chaleur accablante en été. La morphologie du bâti et la présence de végétal urbain ont une influence directe sur la répartition de l'îlot de chaleur urbain.

Dans ce contexte, certaines questions s'imposent :

- Quelle est l'intensité et la nature des îlots de chaleur urbain -atmosphérique et de surface - en été à Ghardaïa et quelle est l'intensité de la variation microclimatique générée ? et Quel est le niveau de confort des ambiances thermiques extérieures d'été à Ghardaïa ?
- Comment la végétation influe-t-elle sur l'îlot de chaleur urbain et quelle est l'intensité de l'effet de rafraîchissement du végétal ?
- Comment la télédétection dans l'infrarouge thermique peut aider à quantifier l'impact effectif du couvert végétal sur la température de surface LST ?

## **Les hypothèses**

Les hypothèses de la recherche sont issues à la fois des constats enregistrés lors des aboutissements (résultats du travail de terrain et futures pistes de recherche) du travail de recherche du magister (Amieur, 2010) et de la recherche bibliographique. Elles sont exposées comme suit :

- La ville chaude et aride de Ghardaïa manifesterait un îlot de fraîcheur urbain diurne. La végétation, la palmeraie en particulier, peut être considérée comme un « puits-à-chaleur ».
- Le confort des ambiances thermiques extérieures dépendrait considérablement de la présence du végétal urbain et à l'ombre des bâtiments.

- Les zones bâties et les espaces verts présenteraient des températures de surface LST plus faibles que celles du désert environnant.

## Objectifs de la recherche

Dans cette optique, et afin de répondre aux questionnements de la recherche, les objectifs de l'étude sont fixés comme suit :

- Caractériser l'îlot de chaleur urbain atmosphérique dans la ville de Ghardaïa, calculer son intensité et étudier la variation microclimatique intra-urbaine.
- Évaluer le confort hygrothermique des espaces extérieurs dans la ville de Ghardaïa.
- Étudier l'effet rafraîchissant de la végétation urbaine à Ghardaïa et quantifier l'impact de la végétation sur l'îlot de chaleur urbain.
- Étudier la répartition de la température de surface à Ghardaïa en analysant la spatialisation de l'ICU et la mise en relation avec le couvert végétal par les indices de végétation.

## La méthodologie de travail

La démarche méthodologique adoptée est composée de deux volets : une partie porte sur le support théorique de la recherche et une partie sur un travail d'investigation et d'analyse.

La première partie dépeint le contexte et le cadre théorique de l'étude à travers une revue de la littérature sur les différents concepts énoncés. La seconde est consacrée à l'investigation proprement dite et l'analyse des résultats. L'investigation a été effectuée durant la saison estivale. Dans cette recherche, l'ICU de l'air (atmosphérique) et l'ICU de surface seront étudiés.

L'îlot de chaleur de l'air est étudié à travers une campagne de mesure *in-situ* le long d'un parcours urbain. Des mesures itinérantes sur 22 sites ont ainsi été relevées à 1.5 m du sol trois fois par jour à l'aide d'instruments de mesure portatifs. Les paramètres microclimatiques mesurés sont : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. L'intensité de chaque îlot de chaleur urbain ou de l'îlot de fraîcheur (ainsi que l'effet rafraîchissant de la végétation) a été calculée à partir

des écarts de température de l'air entre les sites de mesures. L'évaluation des ambiances thermiques extérieures s'appuie essentiellement sur la détermination du confort thermique, cependant la perception de l'ambiance thermique n'a pas pu être étudiée. La distribution des questionnaires lors de la campagne *in-situ* n'a pas été effectuée faute d'une autorisation administrative car la zone d'étude connaissait des problèmes de sécurité (événements de Ghardaïa 2014/2015). L'évaluation du confort thermique extérieur a donc été faite via le calcul d'un indice de confort, le « Temperature-Humidity Index » (THI). Selon cet indice, le niveau de stress thermique est évalué sur une échelle de confort allant de « Hyperglacial » à « Torride ». Le THI est une version améliorée de Discomfort Index (DI) (Thom, 1959). Ce modèle empirique est bien adapté aux climats chauds et arides. Les données de mesure de terrain ont été employées pour qualifier l'environnement thermique urbain sur les 22 sites, en particulier les sites végétalisés.

Les données de télédétection spatiale permettent, de nos jours, d'étudier l'îlot de chaleur urbain de surface pour de vastes territoires englobant la ville et son milieu rural. La télédétection a aussi un apport considérable dans l'étude du rôle du végétal sur le microclimat urbain. L'outil géomatique facilite l'étude de la répartition de la température de surface et du mode d'occupation du sol. La télédétection spatiale vient compléter l'étude de l'îlot de chaleur de l'air sur le terrain. L'ICU de surface est ici étudié via un processus de traitement d'images satellitaires issues du capteur Landsat-8. La cartographie de l'occupation du sol est extraite des images fournies par le capteur Sentinel-A2. Les données sont traitées dans un système d'informations géographiques SIG.

## Structure de la thèse

Après une introduction générale présentant la problématique de la recherche, les objectifs et la méthodologie adoptée, la thèse se compose de deux parties, avec une introduction générale au début et une conclusion générale en fin du manuscrit. Chacune des deux parties est organisée en plusieurs chapitres comme suit :

**-La première partie** synthétise les connaissances tirées de la revue de la littérature pour les concepts et thèmes développés. Elle est composée des chapitres suivants :

Le premier chapitre expose les concepts du changement climatique global et ses effets néfastes dans le monde et en Algérie, notamment les vagues de chaleur. Il traite aussi la notion du climat urbain et des différentes échelles climatiques ainsi que des caractéristiques du climat chaud et aride.

Le deuxième chapitre développe le thème de l'îlot de chaleur urbain et celui du confort thermique extérieur. Les caractéristiques de l'ICU, ses facteurs de formation et ses différents impacts sont abordés. Sont évoquées aussi, les mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains telle que la végétalisation. Ce chapitre traite aussi la notion du confort thermique extérieur comme élément essentiel de l'ambiance urbaine. Les paramètres du confort thermique sont présentés, ainsi que les indices d'évaluation du confort thermique en espace extérieur tel que le Temperature-Humidity Index (THI).

Le troisième chapitre traite de différentes méthodes de mesure des îlots de chaleur urbains (atmosphérique et de surface). La télédétection spatiale est un moyen d'actualité pour l'observation de l'îlot de chaleur de surface et la cartographie de l'occupation du sol. Ce chapitre expose cet important moyen de mesure de l'ICU de surface. Il présente les bases physiques de la télédétection ainsi que les principes de traitement numérique des images.

Le quatrième chapitre présente les effets microclimatiques de la végétation urbaine, ses fonctions éco-systémiques, notamment ses principaux mécanismes de régulation du microclimat : l'ombrage et l'évapotranspiration.

*-La deuxième partie* traite des méthodes de mesure et d'acquisition des données, du processus de traitement, de calcul et d'extraction des valeurs ainsi que de l'analyse et la discussion des résultats. Elle s'articule en trois chapitres :

Le cinquième chapitre est consacré à une description générale de la zone d'étude : son climat, sa géographie, ses caractéristiques morphologiques, la géométrie du bâti, la végétation, etc. Il développe la méthodologie employée, les outils et instruments utilisés pour chaque type de mesure et la technique d'extraction des données. Les processus d'acquisition et de traitement numérique des images satellitaires y sont détaillés.

Le sixième chapitre est consacré à l'étude de la variation et de l'intensité de l'îlot de chaleur de l'air (atmosphérique) et à l'évaluation du niveau du confort thermique extérieur. L'impact de la végétation est déterminé par le calcul de l'effet de rafraîchissement « Parc Cool Island » (PCI). L'étude de la variation microclimatique intra-urbaine est effectuée via l'interprétation de la variation des paramètres météorologiques mesurés sur terrain. L'interprétation des résultats du confort thermique s'appuie sur les catégories établies dans l'échelle de valeurs de THI.

Enfin, l'étude de caractérisation de l'îlot de chaleur de surface ainsi que l'effet des espaces verts urbains sur la température de surface est abordée dans le septième et dernier chapitre. Elle est réalisée à travers la superposition de la carte de l'occupation du sol à

Ghardaïa (la répartition des espaces verts en particulier) avec la carte thermique (la répartition des températures de surface LST).

Dans la conclusion générale qui achève la thèse, les principaux résultats de la recherche sont synthétisés. Certaines recommandations sont énoncées dans le but d'améliorer le microclimat urbain et atténuer les îlots de chaleur à Ghardaïa, ainsi que des perspectives pour des recherches futures.

## **PARTIE 1 : CONCEPTS ET CADRE THÉORIQUE**

## **Introduction de la partie 1**

L'étude du climat urbain est l'objet de la discipline de la climatologie urbaine. Cette dernière connaît un développement continu. L'Algérie comme tous les pays du monde subit les effets du réchauffement planétaire, en particulier l'impact des vagues de chaleur extrême. Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain affecte l'homme et son environnement, en particulier dans les climats chauds et arides. Le confort thermique des individus en espace extérieur est étroitement lié à l'ICU. La notion du confort thermique extérieur comme un élément essentiel de l'ambiance urbaine. Le confort thermique extérieur est un élément essentiel pour le bien-être et la santé des individus. L'îlot de chaleur urbain est de deux types : atmosphérique et de surface. L'étude de l'îlot de chaleur urbain de l'air et celle de l'îlot de chaleur de surface sont nécessaires pour bien appréhender la problématique de la surchauffe urbaine en période estivale. La mesure de l'îlot de chaleur de surface est réalisée en général à travers des images infrarouges obtenues via des caméras thermiques. La télédétection spatiale est un outil d'actualité dans l'étude des îlots de chaleur de surface. La végétation est un des moyens de lutte contre l'ICU. La végétation urbaine présente plusieurs fonctions éco-systémiques. Ses effets microclimatiques, notamment l'ombrage et l'évapotranspiration sont les principaux mécanismes de régulation du microclimat.

# **CHAPITRE I**

## **CLIMAT URBAIN, CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SURCHAUFFE URBAINE**

# 1. CLIMAT URBAIN, CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SURCHAUFFE URBAINE

## 1.1. Introduction

La discipline de la climatologie urbaine a connu un grand développement ces dernières décennies. Dans ce premier chapitre, seront traitées les notions du climat urbain et de climatologie urbaine. Un bref historique est présenté. Les différentes échelles climatiques sont abordées avec les principales couches atmosphériques étudiées. De même, les effets du réchauffement global seront exposés, en particulier l'impact des vagues de chaleur dans le monde et en Algérie.

## 1.2. La climatologie urbaine

### 1.2.1. Evolution de la climatologie urbaine

L'histoire des civilisations nous apprend que le climat est un facteur primordial dans le choix du lieu d'installation des cités (Givoni ,1978). Les conditions climatiques dans les villes étaient une préoccupation dans le tout début de la civilisation (Yoshino, 1990/91). Les écrits de l'architecte et ingénieur romain Vitruve (75-26 avant JC) décrivent les relations entre l'aménagement des villes et le climat local. Il donne certaines règles de conception urbanistique en matière de hauteur des édifices ou d'orientation des rues afin de favoriser la ventilation en ville et lutter contre les maladies (Gelder, 2018). D'autres ont écrit aussi sur le climat urbain et les conditions de salubrité comme Horace (65-68 avant JC) à Rome ou encore l'indien Manasara Silpasatra (avant JC), qui a parlé sur les conditions de luminosité et de ventilation pour améliorer la conception et l'aménagement des villes (Colombert et al., 2012).

À partir de la fin du XVIIIème siècle, on assiste vraiment à la naissance de la climatologie urbaine grâce à la mise en place des mesures instrumentales. L'étude systématique du climat urbain a été initiée par Cotte (1774) à Paris, puis Howard (1818, 1833) à Londres (Colombert et al., 2012).

Luke Howard a publié en 1818 « Le climat de Londres », son ouvrage sur le climat particulier de Londres. Il a réalisé une série de relevés météorologiques (la température, les précipitations et le brouillard, etc.) recueillis sur plusieurs années à l'intérieur et en dehors de la capitale Londres. Il a mis en évidence l'existence d'un écart de température de l'ordre de 3,70 °C entre le centre de Londres et sa campagne. Il a attribué l'élévation de température en ville à sa structure dense, sa consommation d'énergie d'origine fossile et sa

surpopulation (Mills, 2008). Howard a mis en avant à travers ses travaux l'influence de la ville sur le climat local ce que l'on nomme plus tard « îlot de chaleur urbain » (ICU). La révolution industrielle a beaucoup impacté le climat des villes notamment par l'importante émission de chaleur et de polluants.

En 1927, Schmidt et Pepler ont effectué le premier « parcours urbain » en voiture pour relever des données météorologiques. Le véhicule était équipé d'instruments de mesure mobiles (Colombert et al., 2012). Après la Seconde Guerre Mondiale, et à partir des années 1950, on assiste de nouveau à un regain d'intérêt pour la climatologie urbaine par les scientifiques et les acteurs d'aménagement urbain, parallèlement aux opérations de reconstruction de l'après-guerre (Escourrou, 1991). Avec les avancées technologiques et la multiplication des réseaux d'observation météorologique, la recherche en climatologie urbaine s'est accélérée et une autre vague d'intérêt apparaît au début des années 1980 (Colombert et al., 2012), et ne cesse de se développer jusqu'à nos jours grâce aux outils numériques et à la simulation (Vysoudi, 2015). Arnfield (2003) mentionne dans son étude que la climatologie urbaine a beaucoup évolué depuis les années 1980. Il expose les importantes avancées réalisées en matière de compréhension du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Cependant, il a précisé, à l'époque, que l'intensité de l'ICU demeure difficile à estimer et nécessite beaucoup de recherche, car elle varie d'un quartier à un autre au sein de la même ville. Autrement dit, il existe des variations intra-urbaines dans l'intensité de l'ICU.

### **1.2.2. La discipline de la climatologie urbaine**

Le climat urbain est la conséquence de la combinaison de nombreux facteurs. Son étude nécessite le recours à des disciplines multiples : climatologie, urbanisme, architecture, géographie, sociologie, ingénierie, etc. Vu la complexité du milieu urbain (bâti, végétation, etc.) et son interaction avec les multiples paramètres microclimatiques, les préoccupations de lutte contre l'élévation de la température urbaine et la pollution atmosphérique impose la collaboration et la coordination de différents spécialistes dans une approche pluridisciplinaire (Colombert et al., 2012).

La pratique de l'aménagement urbain bénéficie largement des connaissances issues de la climatologie urbaine. Cette dernière se base, entre autres, sur la prise de mesure in situ, sur la participation d'individus à travers des questionnaires sur leur ressenti, sur des simulations et modélisations numériques ou encore sur des simulations en soufflerie pour les effets aérodynamiques en milieu urbain (Vigneau, 2005).

Les urbanistes et les architectes ont de plus en plus d'ouvrages et d'outils numériques aidant à la prise en compte du climat urbain dans l'élaboration des plans des villes et la conception des édifices. La question du confort thermique et de la qualité de l'air en ville est actuellement au cœur du sujet pour tous les acteurs de la ville.

Après cet exposé historique sur la naissance et l'évolution de la climatologie urbaine, on peut définir la climatologie urbaine comme « *l'étude scientifique du climat urbain* » (Perreault 2014). La climatologie urbaine est une sous discipline de la climatologie (Hufty, 2001). Elle s'intéresse au climat et au microclimat des agglomérations urbaines et traite plus particulièrement du phénomène d'ICU, de la pollution et de la qualité de l'air, etc. Elle a comme objectif la compréhension des effets de l'urbanisation sur le climat local ; ce qui fait d'elle un domaine de recherche investi par différentes spécialités (climatologues, urbanistes, architectes, etc.) (Bigot et al., 2017). Selon l'OMM (2018), la climatologie est « *l'étude du climat, du mode de fonctionnement du système climatique, de ses variations et de ses extrêmes, ainsi que de ses incidences sur diverses activités comprenant, sans s'y limiter, celles qui se rapportent aux ressources en eau, à la santé, à la sécurité et au bien-être.* » (OMM, 2018).

Aujourd'hui, l'étude du climat urbain s'appuie sur l'analyse de la variation des températures de l'air (urbaine et rurale) et des températures de surface, ainsi que la relation entre les deux. Le développement des outils de télédétection spatiale et l'accessibilité accrue aux satellites a permis d'étudier la répartition de la température de surface ce qui améliore notre connaissance sur les mécanismes du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

### **1.2.3. Le climat urbain**

Le climat urbain résulte du processus d'urbanisation qui entraîne des modifications des conditions atmosphériques et des paramètres climatiques (Oke et al., 2017 ; Najjar et al., 2010). Il est souvent différent de celui de la campagne avoisinante. Les caractéristiques de la ville (morphologie, émissions de chaleur et de polluants, densité de population, nature des matériaux et revêtements, modification de l'évapotranspiration, etc.) altèrent les conditions atmosphériques et climatiques au niveau local (Stewart et Mills, 2021 ; Vysoudi, 2015 ; Santamouris, 2013 ; Gartland, 2008). Le climat urbain dépend à la fois du climat global, des caractéristiques de la ville (localisation, taille, morphologie, activités etc.). Il est caractérisé par une élévation de la température de l'air, une modification des valeurs d'humidité de l'air, une diminution de la vitesse du vent, une augmentation des émissions de chaleur anthropique et une accumulation des polluants atmosphériques.

L'amplification de la température de l'air appelée « îlot de chaleur urbain », est susceptible de créer des conditions accablantes pour la santé publique, en affectant le confort des habitants notamment en période de canicule (Zhao et al., 2018). L'ICU est reconnu comme étant le phénomène le plus marquant du climat urbain et sa caractéristique principale (Rizwan et al., 2008 ; Souch et Grimmond, 2006 ; Arnfield, 2003).

### **1.3. Les échelles climatiques**

#### **1.3.1. Les échelles climatiques horizontales**

Les échelles horizontales (spatiales) du climat sont au nombre de quatre : l'échelle globale (macro ou planétaire), la méso-échelle, l'échelle locale et l'échelle microclimatique. Les trois dernières sont communément utilisées en climatologie urbaine (figure 1.1). Ces échelles sont imbriquées et emboîtées les unes dans les autres, les plus petites sont liées directement aux plus grandes (Chémery, 2006 ; Oke, 1987) :

##### **1.3.1.1. L'échelle globale**

L'échelle globale ou échelle "macro" ou échelle planétaire correspond aux caractéristiques des variations climatiques principales et saisonnières dues aux facteurs astronomiques de la Terre et géographiques (répartition des océans, des terres fermes, etc.).

##### **1.3.1.2. L'échelle méso**

L'échelle "méso" ou l'échelle régionale est influencée par les conditions géographiques et synoptiques à l'échelle du territoire ; telles que la présence d'étendue désertique, forestière ou d'eau (mer, lac, etc.), la présence de zones urbanisées, ou encore la topographie. Dans l'étude du climat urbain, elle permet l'analyse de l'ensemble d'une agglomération et sa périphérie.

##### **1.3.1.3. L'échelle locale**

L'échelle "locale" correspond aux modifications du climat régional dues aux effets des caractéristiques du paysage et du relief (présence de vallées, de collines, nature du sol, ou la proximité immédiate de la mer, etc.). Elle fait référence à des secteurs ou quartiers de la ville.

##### **1.3.1.4. L'échelle microclimatique**

C'est l'échelle où les éléments du milieu urbain modifient directement l'atmosphère urbaine et les paramètres climatiques. Cette échelle, plus fine, concerne les espaces de

dimensions réduites comme une rue, une place, un jardin, etc. Elle s'étend sur quelques centaines de mètres.

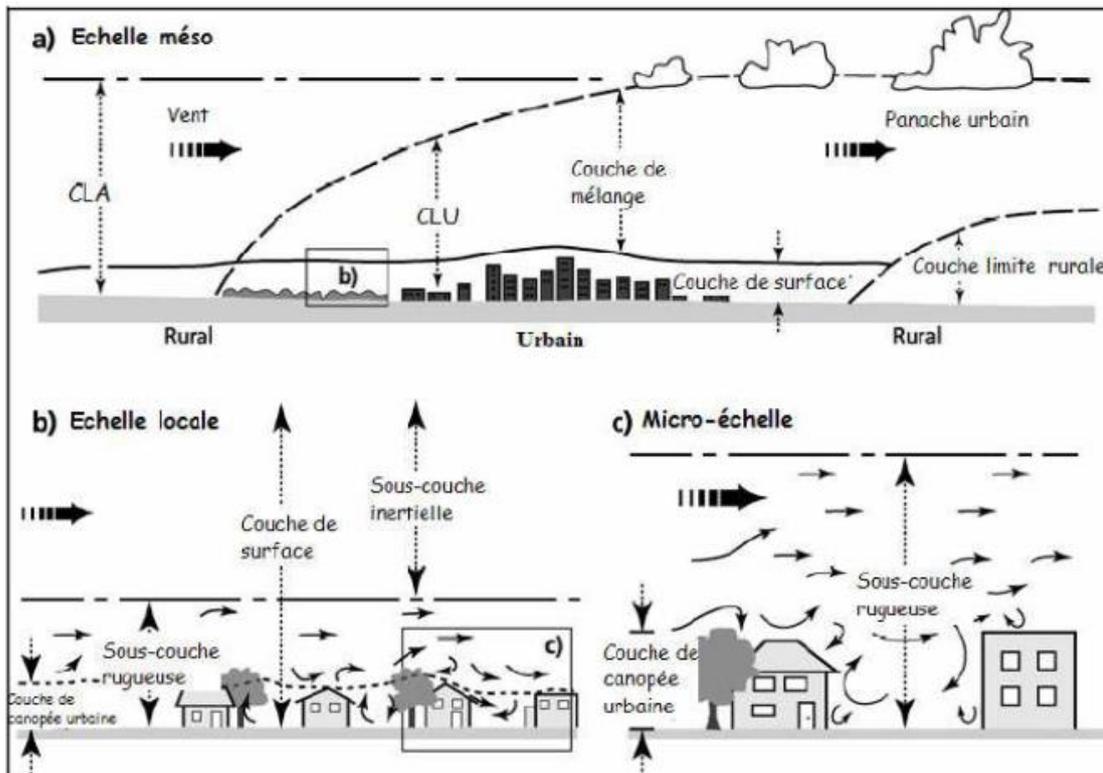


Figure 1.1 : Représentation schématique des différentes couches. (source : Leroyer (2006), dans Piringer et al. 2002).

### 1.3.2. Les échelles climatiques verticales

#### 1.3.2.1. La couche limite atmosphérique

La couche inférieure de l'atmosphère est influencée directement par la surface de la terre qui est en contact avec elle (Goret, 2019). Les propriétés physiques de la surface terrestre modifient les propriétés de l'atmosphère. Cette couche s'appelle "Couche Limite Atmosphérique" (CLA) (Atmospheric Boundary Layer ABL). Elle peut avoir une altitude de 100 à 3000 mètres (Leconte, 2014) (figure 1.2).

#### 1.3.2.2. La couche limite urbaine

La couche limite urbaine CLU (UBL – Urban Boundary Layer) est une forme particulière de la couche limite atmosphérique (Goret, 2019). Elle se développe au-dessus de la ville (au-dessus des toits). C'est le produit de l'interaction entre la zone urbaine et le climat et par conséquent, ses caractéristiques climatiques sont affectées par la présence de la ville (du fait de la géométrie urbaine, de la rugosité aérodynamique, des activités anthropiques, etc.) (Oke et al., 2017). Cette couche présente une structure complexe à

cause de l'hétérogénéité de la rugosité des quartiers de la ville (figure 1.2). L'unité d'étude adaptée à cette couche est le "quartier" considéré comme une juxtaposition de canyons (Najjar et al., 2010). Les modifications les plus notables sont l'élévation des températures d'air et la concentration des polluants atmosphériques en comparaison avec les zones rurales. La CLU prend la forme d'un "dôme" par temps calme et d'une couche limite ou "plume urbaine" ou "Panache urbain" par temps venteux (Ringebach, 2004).

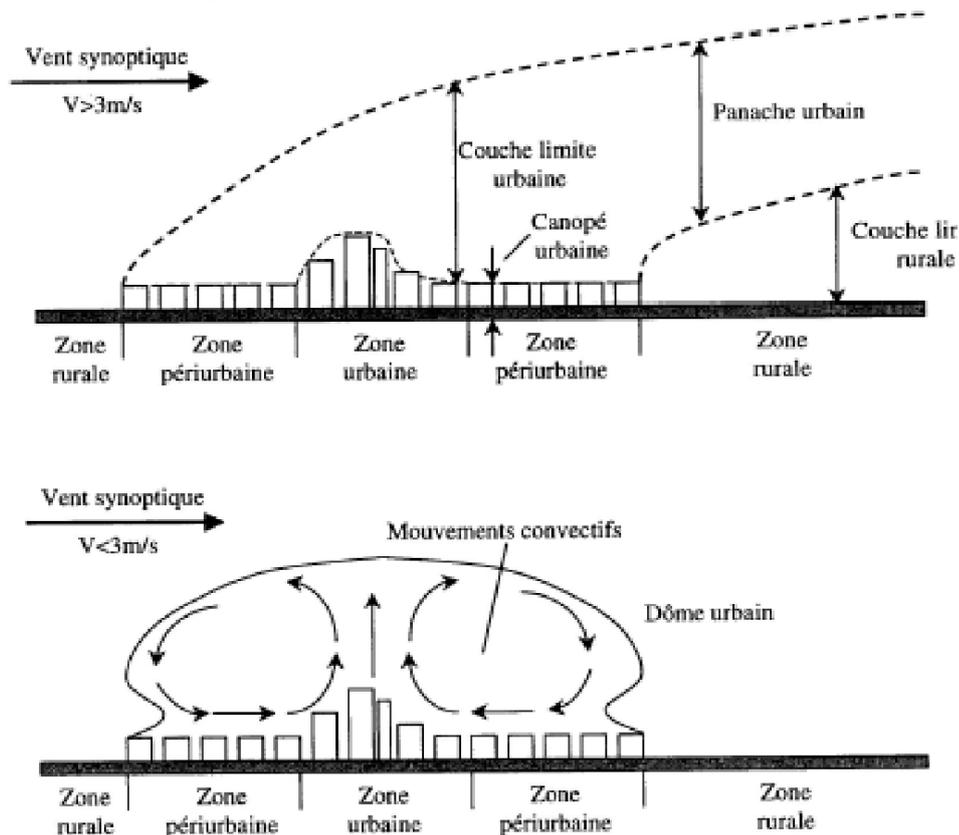


Figure 1.2 : Structure verticale de la couche limite urbaine pour des vitesses de vent inférieures et supérieures à 3 m/s (tiré de Ringebach (2004), d'après Mestayer et Anquetin, (1995)).

La couche limite urbaine est composée de deux couches (figure 1.1) :

- La couche de mélange, sa partie plus haute, et
- La couche limite de surface qui nous intéresse plus en climatologie urbaine (Ringebach, 2004).

### **1.3.2.3. La couche limite de surface**

La couche limite de surface (CLS) est la zone tout près de la surface (Goret, 2019). Elle s'étend sur plusieurs dizaines de mètres à partir d'une surface imaginaire au-dessus des toits des bâtiments. Elle est elle-même subdivisée en deux sous-couches (figure 1.2) :

- La sous-couche inertielle,
- La sous-couche de rugosité,

### **1.3.2.4. La sous-couche inertielle**

Elle se situe au-dessus de la sous-couche de rugosité et s'étend jusqu'à la fin de la couche limite de surface (CLS) (figure 1.1b). Elle n'est influencée que partiellement par les éléments de rugosité, soit par le frottement de la hauteur des bâtiments. Elle se caractérise donc par l'homogénéité des flux turbulents verticaux générés par la rugosité moyenne de la ville (Erell et al. 2011 ; Piringer et Joffre, 2005).

### **1.3.2.5. La sous-couche de rugosité**

La sous-couche de rugosité (RS – Roughness Sub-layer) se situe en dessous de la sous-couche inertielle et à proximité immédiate de la surface (Barlow, 2014). Cette couche est influencée directement par la rugosité urbaine (bâti, végétation, etc.). Elle occupe les premières dizaines ou centaines de mètres au-dessus de la surface (figure 1.1b) et son épaisseur peut aller jusqu'à 3,5 fois la hauteur moyenne des bâtiments (Roth, 2000).

### **1.3.2.6. La couche de canopée urbaine**

La couche de la canopée urbaine (CCU) (UCL – Urban Canopy Layer) se développe depuis le niveau du sol jusqu'à la hauteur moyenne des toits (Oke, 2006). Cette couche est la plus importante car c'est dans laquelle nous vivons et où se produit la majorité des échanges d'énergie (figure 1.1c). L'îlot de chaleur est le plus étudié dans cette couche. Du fait des multiples obstacles (bâtiments, arbres, etc.), la rugosité est un paramètre déterminant de la couche de la canopée urbaine. L'échelle considérée ici est l'échelle microclimatique. Elle fait référence au volume d'air compris entre les bâtiments, les rues, les jardins, les places publiques, etc. L'unité urbaine de référence pour cette couche est la "rue canyon" qui est caractérisée par des paramètres géométriques tels que le prospect ( $L/H$ ) et le facteur de visibilité du ciel (Sky View Factor SVF) (figure 2.2) (Najjar et al., 2010).

### 1.3.2.7. La couche de surface

La plus basse couche est celle située au niveau de la surface urbaine. Voogt et Oke (2003) proposent dans leur classification une nouvelle couche appelée "couche de surface" (CS) (Surface Layer SL) (figure 1.3). « Elle comprend toutes les surfaces horizontales de la ville et la fine couche d'air (quelques cm) située au-dessus des surfaces. » (Boukhbla, 2015). Cette couche fait référence aux variations de températures de surface et son influence sur le climat urbain. Grâce au développement de la télédétection, cette couche présente un grand intérêt dans l'étude des phénomènes climatiques dans la ville et sa campagne voisine. La température de l'air dans la canopée urbaine CU est influencée par les flux de chaleur dégagés des surfaces urbaines.

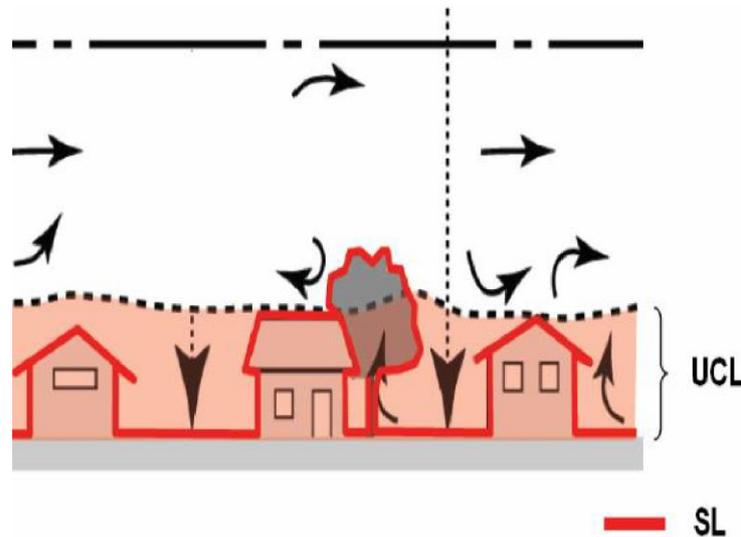


Figure 1.3 : La couche de canopée urbaine (Urban Canopy Layer - UCL) et la couche de surface (Surface Layer SL) (Source : Boukhbla, 2015)

La canopée urbaine et la couche de surface correspondent aux échelles d'étude considérées dans notre travail.

## 1.4. Les caractéristiques du climat chaud et aride

Selon Köppen-Geiger les climats du monde se divisent en plusieurs classes et sous-classes. Nombreux sont les indices et les facteurs qui participent à cette classification (type de végétation, précipitations, température de l'air, etc.). La figure 1.4 montre la répartition des zones chaudes et arides dans le monde, présentées en rouge. Le code 'BWh' désigne un climat désertique chaud et aride (Hot Arid Desert) selon la classification de Köppen-Geiger. Ce type de climat est connu par des étés chauds et secs, des hivers doux, des vents

chauds et secs « sirocco » (et parfois poussiéreux), des précipitations faibles et un rayonnement solaire intense (Chen et Chen, 2013 ; Peel et al., 2007 ; Kottek et al., 2006). La classification de Thornthwaite prend en considération plus particulièrement la végétation, l'indice d'aridité et l'évapotranspiration (Feddema, 2005).

La ville de Ghardaïa se situe dans le nord du désert algérien qui fait partie du Sahara. Selon la classification des climats du monde de Köppen-Geiger, son climat est du type 'BWh' (désertique chaud et aride).

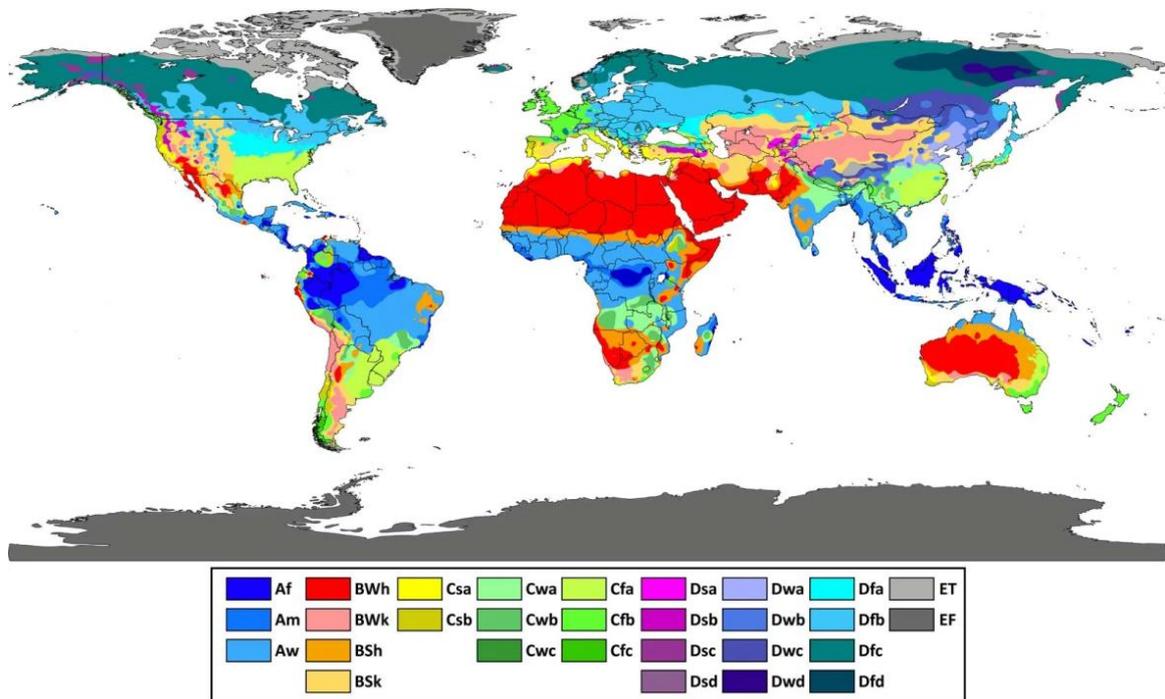


Figure 1.4 : Classification des climats du monde selon Köppen-Geiger (source : Peel et al., 2007). Les zones chaudes et arides sont en rouge (BWh).

## 1.5. Réchauffement global et vagues de chaleur

Le changement climatique global constitue la question environnementale majeure depuis plusieurs décennies. Il est caractérisé entre autres par une élévation de la température moyenne de l'air à l'échelle planétaire. Il présente aussi une grande variabilité du climat et des événements climatiques extrêmes (sécheresses, vagues de chaleur, etc.). Ces changements sont causés par des facteurs naturels et anthropiques (GIEC, 2022).

Parmi les facteurs humains, on peut noter l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. L'effet de serre est amplifié par l'industrialisation intense, l'étalement urbain, et les fortes émissions de chaleur et polluants qui en résultent. L'effet du réchauffement climatique est aggravé en milieux urbains par le phénomène

d'îlot de chaleur urbain (ICU), qui se caractérise par une élévation des températures en ville par rapport aux zones rurales environnantes.

Les projections climatiques du groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) prévoient une intensification du réchauffement climatique (GIEC, 2022). Dans les climats chauds et arides, ce réchauffement contribue à amplifier les vagues de chaleur et les canicules. Depuis maintenant plus de trente années, ce groupe d'experts (GIEC) publie des rapports sur les effets des activités anthropiques sur le climat mondial, et en particulier sur les agglomérations urbaines. Dans son dernier rapport de 2022, le GIEC annonce des prévisions climatiques très pessimistes et accablantes. Il alerte sur le fait que les conséquences sur la planète « sont extrêmes et irréversibles ». En fait, l'impact sur la vie des humains en milieux urbains est déjà ressenti. Les villes sont des aires d'urbanisation et d'industrialisation, elles consomment une grande part de l'énergie produite et sont responsables d'une grande partie de la pollution et des émissions mondiales de GES (Satterthwaite, 2009 ; Pigeon, 2007). Dans le volet de l'impact sur la santé, le rapport de GIEC prévoit une plus grande mortalité, une émergence de nouvelles maladies, une augmentation du stress thermique, et une dégradation de la qualité de l'air (GIEC, 2022).

### **1.5.1. Vulnérabilité des zones chaudes et arides aux vagues de chaleurs et canicules**

Dans le contexte du changement climatique, la relation climat-santé a pris, de nos jours, un grand intérêt (Renard et al., 2015 ; CRSTRA, 2008). Au réchauffement climatique est associé un accroissement des intensités et des occurrences des vagues de chaleur en milieu urbain (Meehl et Tebaldi 2004 ; Beniston et al., 2007). En effet, à travers le monde, les études montrent qu'aux périodes de fortes canicules le taux de morbidité et de mortalité lié à la température s'élève significativement (Harlan et al., 2006 ; Baker et al., 2002). Dans les zones tempérées et humides le nombre de vagues de chaleur a pratiquement doublé entre 1979 et 2017 (Raymond et al., 2020). À titre d'exemple, la grande vague de chaleur de Chicago dans l'été 1995 est l'une des plus dangereuses de l'histoire des États-Unis. La température a atteint 41 °C et a duré cinq jours. Plus de 700 individus ont péri (Klinenberg, 2022). Dans le sud des États-Unis, les vagues de chaleur font des victimes tous les ans (Chow et al., 2012). En Arizona, plus de 250 décès à cause des vagues de chaleur ont été enregistrés durant la période 1993-2002, ce chiffre est le plus élevé de tous les États-Unis (CDC, 2005).

La vague de chaleur d'Août 2003 qui a touché l'Europe de l'Ouest était la plus intense de son histoire. Elle a causé le décès de 70 000 personnes, dont 15 000 uniquement en France (Cadot et Spira, 2006 ; INSERM, 2004 ; Hémon et al., 2003). La vague de chaleur de 2003 a touché aussi d'autres pays à travers le monde tel que l'Inde (avec 1900 morts) ou le Bangladesh (40 morts). La température a atteint 48 °C, soit 9 à 10 degrés de plus que la normale (IFRC, 2003). Durant l'été 2021, le Canada a enregistré un record historique de température de 49,6 °C (Prepared BC, 2021). « *Canicule historique au Canada : le village aux 49,6 °C détruit par le feu : Lytton avait atteint ce record mardi 29 juin. Vingt-quatre heures plus tard, la localité a été dévastée par l'un des très nombreux incendies qui se sont déclarés en raison de la vague de chaleur.* » (Lesnes, 2021).

La canicule est reconnue comme un grand risque pour l'être humain à travers le monde (Wehner et al., 2016). Les vagues de chaleur augmentent aussi en nombre et en intensité dans les régions chaudes et arides, ce qui accroît le risque de coups de chaleur potentiellement mortels. Le stress thermique y est un problème chronique, et il y est plus aigu que dans les climats froids ou tempérés (Harlan et al., 2006). Si tout le monde peut souffrir des vagues de chaleur, certaines personnes sont plus à risques. Il s'agit des personnes âgées, des nourrissons, des travailleurs exposés à la chaleur, à l'extérieur, des personnes malades ou fragiles, etc. (Cadot et Spira, 2006 ; INSERM, 2004). L'adaptation aux changements climatiques vise à réduire la vulnérabilité des villes aux événements extrêmes tels que les vagues de chaleur. Les sociétés doivent donc composer avec ces aléas climatiques et agir efficacement afin de lutter contre la surchauffe urbaine et améliorer le confort thermique en milieu urbain. La prise de conscience de ces risques doit être présente chez les décideurs et chez les citoyens.

Comprendre le fonctionnement du climat urbain et caractériser la chaleur urbaine s'avèrent être une nécessité pour élever la résilience de nos villes au changement climatique et augmenter leur performance thermique. Le travail effectué dans le cadre de la présente thèse s'inscrit dans cette perspective.

### **1.5.2. Changement climatique en Algérie**

Les études menées par l'ONM (Office National de la Météorologie) démontrent que l'Algérie, comme bien des pays en développement, n'est pas épargnée des effets néfastes du changement climatique (Mostefa-Kara, 2008 ; Tabet-Aoul, 2008 ; Boucherf, 2004). Connue pour son climat aride et semi-aride, l'Algérie, dans son ensemble, y

compris la région désertique, est sujette à une hausse de la température moyenne annuelle, et une baisse des précipitations.

Le rapport de synthèse réalisé par le ministère algérien de l'environnement et des énergies renouvelables (MEER) en 2018, a dressé un constat alarmant sur le risque et la vulnérabilité au changement climatique en Algérie (Wahl et al., 2018). Il résume les effets du changement climatique en Algérie : « *Si nous devons donc résumer les effets attendus du changement climatique dans la région, ils incluront les facteurs climatiques suivants :*

- *Une hausse des températures,*
- *Une diminution des précipitations totales,*
- *Une plus grande instabilité de la répartition des précipitations au cours de l'année,*
- *Une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes. (Pluie diluvienne, sécheresse, ...)* ». (Wahl et al., 2018).

### **1.5.3. Les conséquences du réchauffement sur les zones chaudes et arides en Algérie**

Les régions sahariennes sont les plus exposées aux risques de surélévations des températures notamment en été où les conditions sont déjà extrêmement difficiles. En fait, le désert occupe les 4/5 de de la superficie de l'Algérie. Le milieu désertique se caractérise par un écosystème très fragile et vulnérable. Il est marqué par des températures extrêmes et des précipitations faibles et irrégulières, ce qui conduit à la rareté des ressources naturelles, en particulier l'eau et la végétation. L'urbanisation au désert a été beaucoup plus rapide ces dernières décennies (Côte, 2005 ; Côte, 2002). La croissance démographique entraîne une surconsommation d'eau, une source rare au désert, alors que les précipitations se font de plus en plus rares. La croissance de la population entraîne aussi une forte consommation de l'énergie, en particulier dans le secteur du transport et de la climatisation (BEN, 2019 ; Radhi et Sharples, 2013).

Au niveau des palmeraies, le manque de précipitations se répercute sur les crues des oueds qui sont vitales pour les écosystèmes des oasis : en effet le fonctionnement écosystémique d'un oued se résume ainsi, la crue de l'oued inonde la palmeraie d'une eau chargée de limon fertilisant. Les barrages et les digues en amont de la palmeraie se transforment en un lac qui peut garder de l'eau en surface pendant plusieurs mois. L'infiltration naturelle alimente et recharge la nappe phréatique dans des cavités, formant

une sorte de réservoirs ou petits barrages souterrains. En plus de l'infiltration naturelle par les barrages, les crues de l'oued rechargent aussi la nappe phréatique directement par les puits capteurs (qui sont différents des puits ordinaires de puisage) (Remini, 2018). La sécheresse due au réchauffement climatique menace l'équilibre de cet écosystème oasien. La vie des populations dans ces régions désertiques est en péril du fait de la diminution des palmeraies et des atteintes à son bon fonctionnement ; or il s'agit bien d'un moyen de subsistance pour les populations autochtones.

#### **1.5.4. Consommations énergétiques dans le secteur de climatisation en Algérie**

Les aménagements urbains contemporains ne sont pas adaptés aux conditions climatiques extrêmes comme c'était le cas des ksour traditionnels. Les nouvelles cités et les nouveaux quartiers sont bâtis en général selon des « modèles standards », dont la performance thermique est très faible. En effet, les configurations urbaines et le mode constructif entraînent une grande consommation d'énergie pour la climatisation en été. La climatisation à son tour dégage beaucoup de chaleur et participe à aggraver les canicules (de Munck et al. 2013). Le secteur de la climatisation dans le sud de l'Algérie est très énergivore. Akbari et al. (2001) ont montré que la consommation d'électricité augmente de 2 à 4% pour une augmentation de la température de l'ordre de 1 °C. La répartition de la consommation globale d'énergie en Algérie est dominée par la partie des 'Ménages et Autres' (47%) (figure 1.5, BEN, 2023).

Le Ministère de l'énergie a enregistré une « *Hausse de la demande du secteur des «Ménages et autres» (7,6%) passant de 23,4 M Tep en 2021 à 25,2 M Tep en 2022, tirée principalement par le sous-secteur résidentiel (6,5%)* » (BEN, 2023). Etant donné que le chauffage est basé principalement sur le gaz naturel, c'est la climatisation qui représente une part très importante de la consommation de l'électricité. Selon le bilan de 2022, il a été constaté une croissance de la consommation d'électricité suite à la hausse de la demande des clients de Sonelgaz, notamment les ménages (BEN, 2023). D'après l'Agence Nationale APRUE (2019, chiffres de 2017), la consommation de l'électricité dans le secteur tertiaire est prédominante. Ce rapport l'explique par « *l'introduction massive des équipements de chauffage et de climatisation et la généralisation de l'utilisation des matériels bureautiques et informatiques* » (APRUE, 2019). « En ce qui concerne la consommation d'électricité par usages, l'éclairage et le froid totalisent 90% » (APRUE, 2019).

Des stratégies de réduction de la consommation d'électricité, en particulier dans le volet de la climatisation, s'avèrent plus que nécessaires dans un cadre global de lutte contre la chaleur urbaine.

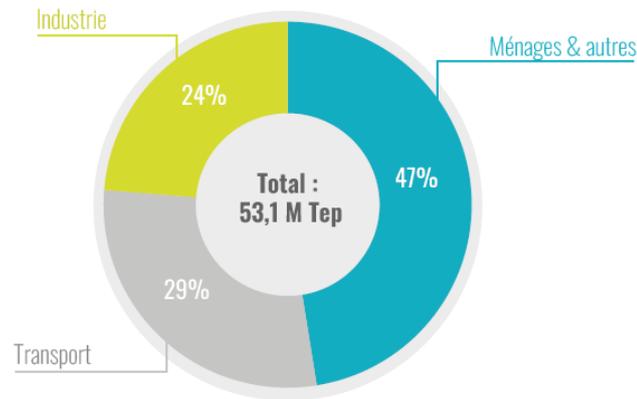


Figure 1.5 : Consommation d'énergie en Algérie par secteur (BEN, 2023).

### 1.5.5. Les engagements de l'Algérie dans la lutte contre les changements climatiques

L'Algérie a pris certaines mesures de lutte contre le changement climatique. En 2020, le gouvernement a adopté un « Plan d'Action » (06 février 2020) visant la préservation de l'environnement et la mise à profit des énergies renouvelables (PAG, 2020). Le gouvernement algérien s'engage, entre autres à :

- Protéger l'environnement et lutter contre les formes de pollutions ;
- Promouvoir les technologies de production d'énergie propres ;
- Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques ;
- Protéger l'environnement saharien et les écosystèmes désertiques, et la gestion intégrée des zones désertiques ;
- Développer les énergies renouvelables.

Le Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables a élaboré le Plan National Climat (PNC) (PNC, 2019) qui porte sur les actions à entreprendre pour respecter les engagements de l'Algérie en matière de lutte contre les changements climatiques (Ghezloun, 2021). Le PNC a comme objectifs :

- L'élaboration d'un plan d'adaptation pour faire face aux effets du réchauffement climatique et à la baisse des précipitations.

- L'élaboration d'un plan d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre respectant les engagements internationaux.

## 1.6. Le bilan énergétique d'une zone urbaine

Différents échanges d'énergies et de masse ont lieu au sein de l'atmosphère. Ces nombreux transferts sont à la base des mécanismes du système climatique (Beltrando, 2011 ; Hufty, 2001). La Terre reçoit l'énergie principalement du soleil. Le rayonnement électromagnétique véhicule l'énergie et la chaleur tout le long des couches de l'atmosphère et jusqu'à la surface terrestre (Poitou, 2013). Le rayonnement solaire en direction de la Terre subit des interactions avec les différentes couches de l'atmosphère. Une partie va être réfléchi par les gaz constituant l'atmosphère, une autre sera absorbée ou diffusée par cette atmosphère. Le reste du rayonnement arrive à la surface de la Terre (domaine du visible, figure 3.4) qui sera aussi en partie absorbé ou réfléchi. L'énergie absorbée par la Terre va en augmenter la température de surface. La Terre se comporte ainsi comme un radiateur et rayonne vers l'espace et réémet sa chaleur sous forme de rayonnement thermique (domaine de l'infrarouge, figure 3.4). La répartition des énergies échangées est étudiée par un bilan radiatif et énergétique.

Le comportement de la surface terrestre décrit ci-dessus, est modifié par la présence d'une ville. L'urbanisation remplace les surfaces naturelles par des surfaces artificielles. L'existence d'un climat urbain provoque des perturbations de ces mécanismes. La comparaison des bilans énergétique et radiatif des surfaces naturelles et urbanisées permet de caractériser le climat urbain qui se manifeste sous le phénomène de l'ICU. En fait, « *Les îlots de chaleur sont la manifestation du déséquilibre entre deux bilans, le bilan radiatif (faisant intervenir les différents rayonnements solaire et atmosphérique) et le bilan d'énergie (prenant en compte les différents flux de chaleur).* » (Parmentier, 2010).

### 1.6.1. Bilan radiatif au-dessus d'une ville

Le bilan radiatif d'un milieu est la somme des rayonnements incidents absorbés par la surface terrestre et des rayonnements émis vers l'atmosphère. Les rayonnements de grandes longueurs d'onde représentent les échanges de chaleur entre la surface du globe et la voûte céleste. Seul le rayonnement solaire (courtes longueurs d'onde) et le rayonnement infrarouge thermique (grandes longueurs d'onde) émis par la surface entrent dans l'expression du bilan radiatif (Parmentier, 2010). La ville influence le bilan radiatif naturel par la géométrie du bâti, les matériaux et revêtements, ou encore par les émissions de

chaleur et polluants (figure 1.6). Ainsi, le rayonnement net est exprimé par l'équation suivante (Ringebach, 2009 ; Foissard, 2015) :

$$Q^* = K_{\downarrow} - K_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (1.1)$$

Où :

$Q^*$  : le rayonnement net.

$K_{\downarrow}$  : le rayonnement global descendant à courte longueur d'onde,

$K_{\uparrow}$  : le rayonnement ascendant à courte longueur d'onde,

$L_{\downarrow}$  : le rayonnement descendant à grande longueur d'onde,

$L_{\uparrow}$  : le rayonnement ascendant à grande longueur d'onde.

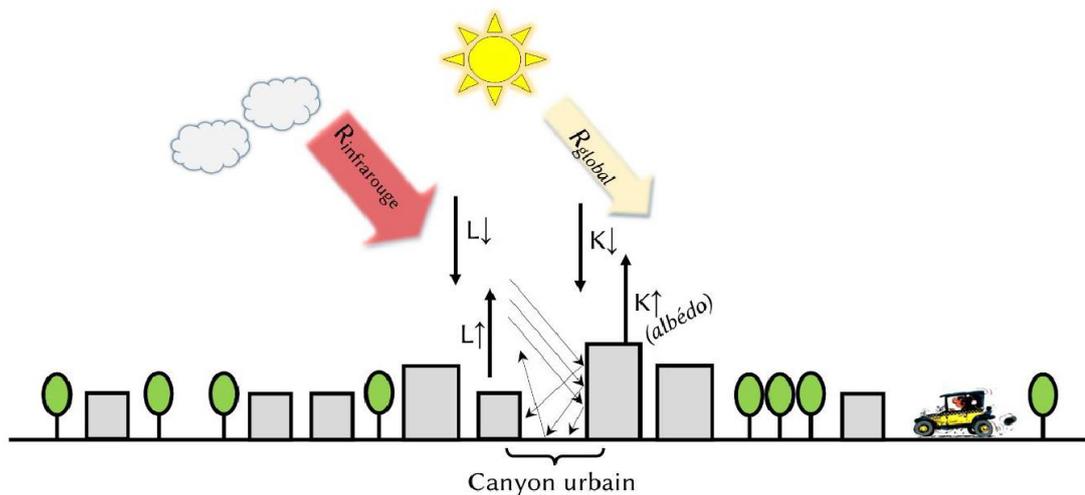


Figure 1.6 : Bilan radiatif au-dessus d'une ville. D'après Oke (1987) (Tiré de Foissard, 2015).

### 1.6.1.1. Le rayonnement net ( $Q^*$ )

C'est le rayonnement net reçu par la surface, toutes longueurs d'onde confondues. Il est le résultat du bilan radiatif (figure 1.6). C'est un terme positif le jour, lorsque la surface gagne de l'énergie et négatif la nuit, lorsqu'elle en perd (Pigeon et al., 2008). Le milieu urbain affecte les termes de ce bilan par la géométrie, les matériaux et revêtements et la pollution atmosphérique (Colombert, 2008).

### **1.6.1.2. Le rayonnement global descendant à courte longueur d'onde (K ↓)**

C'est le rayonnement solaire incident à courte longueur d'onde absorbé par la surface. Il correspond au rayonnement solaire direct et diffus (par l'atmosphère).

### **1.6.1.3. Le rayonnement ascendant à courte longueur d'onde (K ↑)**

Ce rayonnement correspond au rayonnement de courte longueur d'onde réfléchi par la surface terrestre. Il dépend directement de la réflectivité des matériaux de surface qui correspond au rapport entre la quantité de rayonnement réfléchi et la quantité de rayonnement reçue.

### **1.6.1.4. Le rayonnement descendant à grande longueur d'onde (L ↓)**

C'est le rayonnement descendant à grande longueur d'onde. Il correspond au rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère. Les différentes particules telles que les gouttelettes d'eau et les aérosols en suspension dans l'air, etc. sont à l'origine de cette émission car elles renvoient le rayonnement vers la Terre (Colombert, 2008).

### **1.6.1.5. Le rayonnement ascendant à grande longueur d'onde (L ↑)**

Ce rayonnement correspond au rayonnement de grande longueur d'onde émis par la surface terrestre en direction de l'atmosphère. C'est un rayonnement ascendant infrarouge thermique qui dépend de la température et de l'émissivité de la surface. La Terre perd son énergie et rayonne vers l'atmosphère, en particulier la nuit. Plus la surface est chaude, plus le rayonnement sera grand (Pigeon et al., 2008).

## **1.6.2. Bilan d'énergie au-dessus d'une ville**

Le bilan d'énergie décrit les transferts énergétiques et leur répartition au sein d'un milieu. Il regroupe les différents flux de chaleur, c'est-à-dire les apports et les pertes d'énergie. Ainsi, « *l'équation de bilan d'énergie d'une surface traduit l'équilibre entre les sources et les puits d'énergie* » (Pigeon et al., 2008). Le bilan énergétique d'une surface urbaine est le résultat de tous les flux énergétiques échangés avec son environnement. Le flux énergétique représente une quantité d'énergie radiative échangée par unité de surface et de temps (figure 1.7). Il s'exprime en densité de flux de chaleur en  $W.m^{-2}$  (Kitous, 2012 ; Colombert, 2008). Le bilan énergétique d'une surface urbaine est similaire à celui d'une surface naturelle avec comme flux supplémentaire la chaleur produite des activités

anthropiques. Il peut s'écrire par l'équation suivante (Ringebach, 2009 ; Foissard, 2015 ; Leconte, 2014) :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S (+ \Delta Q_A) \quad (1.2)$$

Où :

$Q^*$  : le flux du rayonnement net,

$Q_F$  : le flux de chaleur anthropique,

$Q_H$  : le flux de chaleur sensible,

$Q_E$  : le flux de chaleur latente,

$\Delta Q_S$  : le flux de chaleur stockée,

$\Delta Q_A$  : le flux de chaleur advectif.

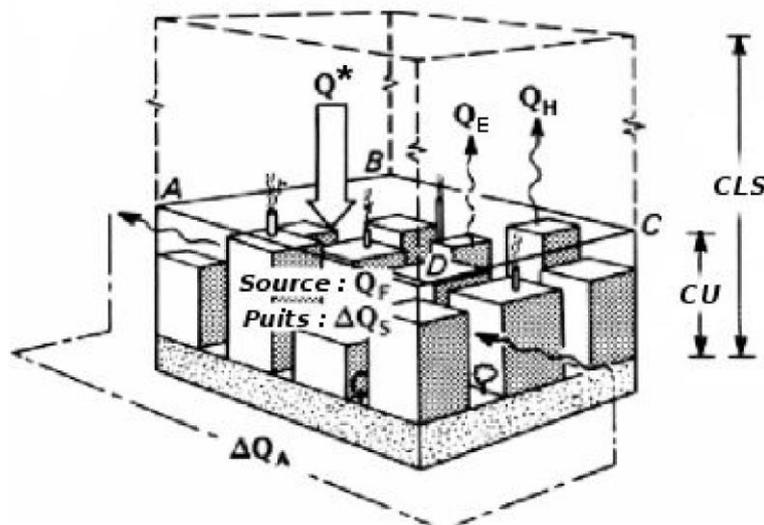


Figure 1.7 : Termes de l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de Oke, 1987). (Tiré de Leconte, 2014).

### 1.6.2.1. Le flux du rayonnement net ( $Q^*$ )

Il représente le gain d'énergie en rayonnement net ( $Q^*$ ) qui provient initialement du soleil selon le processus radiatif.

### 1.6.2.2. Le flux de chaleur anthropique ( $Q_F$ )

C'est un flux de chaleur propre à la ville. Il représente la chaleur générée par l'ensemble des activités humaines (trafic routier, chauffage/climatisation, activités

industrielles). Il dépend de la saison, de la densité du bâti et de la population de la ville, du niveau d'industrialisation de la ville, de l'énergie utilisée, de la topographie environnante, ainsi que du métabolisme humain et animal. Oke (1987) indique que dans les villes développées de l'hémisphère Nord (villes américaines et d'Europe du Nord), l'énergie anthropique peut même dépasser le rayonnement net en hiver. Le flux de chaleur anthropique est l'une des causes du climat urbain. La chaleur anthropique peut être bénéfique en hiver puisqu'elle participe à diminuer la consommation d'énergie de chauffage. En revanche, en été, elle aggrave l'effet de l'ICU et des vagues de chaleur.

### **1.6.2.3. Le flux de chaleur sensible ( $Q_H$ )**

Le flux de chaleur sensible modifie la température de l'air par convection, ce flux est mesuré par les stations météorologiques (Foissard, 2015). La convection est un phénomène qui résulte des transferts de chaleur entre la surface et la masse d'air, à cause du gradient thermique qui existe entre les deux. La convection peut être naturelle ou forcée. En milieu urbain, le brassage turbulent de l'air provoqué par la différence entre la température des surfaces urbaines et la température de l'air fournit une grande quantité de chaleur sensible (Leconte, 2014).

### **1.6.2.4. Le flux de chaleur latente ( $Q_E$ )**

Le flux de chaleur latente provient de l'énergie dépensée pour l'évaporation de l'eau. Les études d'ICU montrent que l'évapotranspiration dans les villes est généralement plus faible que dans leurs environnements ruraux (Parlow 2011 ; Ringenbach, 2004 ; Escourrou, 1991). L'environnement rural dans ces études est un milieu où la surface est couverte de végétation et d'eau. Le flux de chaleur latente y est nettement supérieur à celui en ville du fait de l'imperméabilisation des surfaces urbaines. Dans les zones chaudes et arides, l'environnement désertique aux alentours des villes est dépourvu de végétation et d'eau. Les villes contemporaines au désert sont des villes-oasis où la végétation est présente sous plusieurs formes : arbres d'alignement, jardins publics, végétalisation des domaines extérieurs (publics et privés), plantations et potagers privés, etc. Le flux de chaleur latente au sein de ces villes serait donc plus important que dans leurs alentours désertiques (Riou, 1990).

### **1.6.2.5. Le flux de chaleur stockée ( $\Delta Q_s$ )**

Le flux de chaleur stockée correspond à la chaleur stockée dans le sol et les matériaux urbains. Il dépend de leur inertie thermique, de leur capacité à emmagasiner et

transmettre de l'énergie. Le sol urbain et les bâtiments captent la chaleur pendant la journée ; cette énergie est réémise à l'air ambiant durant la nuit. C'est la source d'énergie la plus importante durant la nuit (Parlow 2011 ; Ringenbach, 2004). La campagne, en revanche, se refroidit beaucoup plus rapidement de par sa faible inertie thermique. En d'autres termes, le flux de chaleur stockée constitue, en journée, un puits à chaleur (accumulation d'énergie par conduction) alors que la nuit il représente une source de chaleur (relâchement d'énergie) (Pigeon et al., 2008).

#### **1.6.2.6. Le flux de chaleur advectif ( $\Delta Q_A$ )**

Le flux advectif est la chaleur échangée avec la masse d'air circulant par advection horizontale à travers l'ensemble des parois d'une zone urbaine. Il est dû aux écarts de température et d'humidité entre les zones (Rizwan et al., 2008).

### **1.7. Conclusion**

Il apparaît d'après ce qui a été exposé que les zones chaudes et arides sont vulnérables aux vagues de chaleur. Le flux de chaleur stocké et le flux de chaleur anthropique sont très importants dans le bilan énergétique d'une zone urbaine chaude. Les études climatiques en Algérie montrent que les températures de l'air sont en hausse et la consommation de l'énergie de climatisation continue d'augmenter. Dans le chapitre suivant, nous aborderons le phénomène de l'îlot de chaleur urbain, son mécanisme de formation et ses différents effets.

## **CHAPITRE II**

# **L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET LE CONFORT THERMIQUE EN ESPACE EXTÉRIEUR**

## **2. L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN ET LE CONFORT THERMIQUE EN ESPACE EXTÉRIEUR**

### **2.1. Introduction**

Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain représente l'effet climatique majeur de la ville. La chaleur urbaine affecte l'homme et son environnement. Dans ce deuxième chapitre, les concepts liés à l'ICU seront développés (caractéristiques, les facteurs de formation, etc.). L'étude du confort thermique en espace extérieur est étroitement liée à l'ICU. Certains indices d'évaluation du confort thermique en espace extérieur seront énoncés, en particulier ceux destinés aux climats chauds et arides.

### **2.2. Définition de l'îlot de chaleur urbain et historique du phénomène**

Les modifications d'occupation du sol d'une zone terrestre provoquent un changement dans son bilan radiatif et par conséquent, sur le climat local. L'urbanisation d'une région entraîne une transformation des propriétés radiatives, hygrothermiques et aérodynamiques du milieu (Ringebach, 2004). Les paramètres climatiques comme l'écoulement du vent, le rayonnement solaire et l'humidité interagissent avec les éléments du milieu urbain tels que le bâti, le végétal, les espaces extérieurs et les activités qui s'y déroulent. La ville engendre ainsi son propre climat, marqué généralement par des hausses de température par rapport au milieu rural environnant. Le phénomène produit est nommé « îlot de chaleur urbain » (ICU).

Il a été mis en lumière pour la première fois à Londres en 1830 (Howard, 1833). L'ICU est l'expression physique la plus évidente de la ville sur son climat. Il est largement étudié en climatologie urbaine. Il désigne des élévations localisées de températures mesurées en ville par rapport aux zones rurales environnantes (Stewart et Mills, 2021). Les températures augmentent progressivement de la périphérie jusqu'au centre de la ville créant un effet de « dôme thermique » (figure 2.1).

L'expression « îlot de chaleur urbain » peut aussi être employée pour désigner une zone intra-urbaine qui manifeste une température (de l'air ou de surface) plus élevée que dans les autres zones de la même ville (variations intra-urbaines de température) (LaDochy et al., 2021 ; Stewart et Mills, 2021 ; Taha, 2017 ; Shepherd et al., 2013 ; Kuttler, 2012 ; Buyantuyev et Wu, 2010). Un temps calme et un ciel sans nuages constituent les conditions propices à la formation d'un ICU. C'est un phénomène essentiellement nocturne

(Alcoforado et Matzarakis, 2010), son intensité connaît des variations journalières et saisonnières.

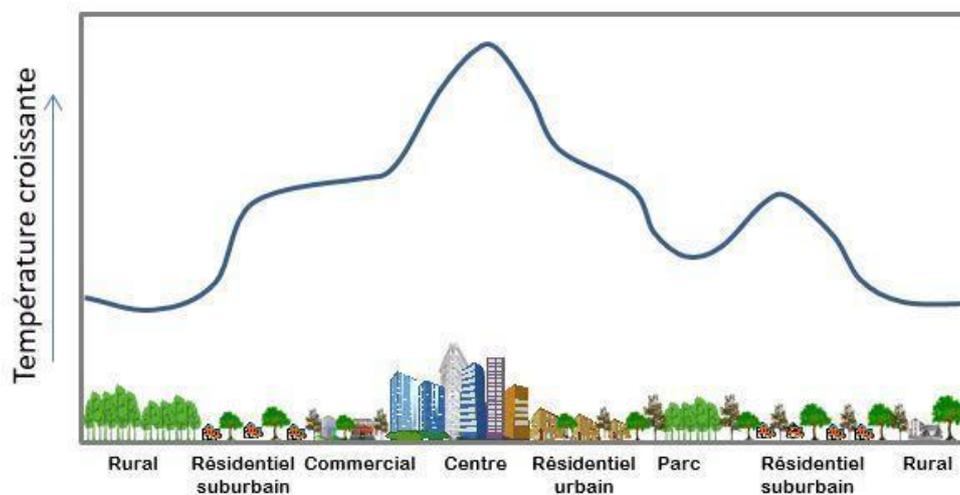


Figure 2.1: Illustration du profil thermique caractéristique d'un îlot de chaleur urbain.  
D'après Akbari et al. (1992).

## 2.3. Les facteurs de formation de l'îlot de chaleur urbain

L'ICU est le résultat d'une série de facteurs naturels et humains. Ces facteurs se combinent pour concourir à la définition de la forme et l'intensité des ICU. Les facteurs naturels sont les caractéristiques géographiques de la ville et les paramètres météorologiques. Les facteurs humains sont le résultat de l'urbanisation et des émissions anthropiques (Stewart et Mills, 2021 ; Dubois, 2014 ; Rizwan et al., 2008).

### 2.3.1. Climat et géographie

La terre accumule la chaleur apportée par le soleil au printemps et en été. De par son inertie, la terre restitue cette chaleur en automne et en hiver. La situation géographique de la ville détermine le type du climat (tropical, continental, tempéré, océanique, désertique, etc.). La classification de Koppen est très utile pour déterminer le climat d'une ville (Chen et Chen, 2013 ; Peel et al., 2007 ; Kottek et al., 2006). L'ICU est influencé par la variation des saisons ainsi que par l'altitude et la topographie de la ville.

Les conditions météorologiques ont un effet direct sur l'ICU. La couverture nuageuse réduit le rayonnement solaire ce qui diminue l'intensité de l'ICU en conséquence. Les vents forts tendent à homogénéiser les températures à cause de l'augmentation des transferts thermiques par convection. De plus, les précipitations

conditionnent largement le taux d'humidité de l'air et du sol. Le rafraîchissement par évaporation ou évapotranspiration est en lien direct avec le régime des pluies (Oke et al., 2017).

### **2.3.2. Urbanisation**

L'urbanisation modifie les propriétés thermiques d'une zone du fait de la substitution des surfaces naturelles (couvert végétal, marécages, désert, etc.) par des surfaces différentes (bitume, pierre, béton, plantation, etc.). L'intensité de l'ICU est par conséquent liée à la taille de la ville (Arnfield, 2003) et à la concentration de la population et des activités. Plus la cité est dense et compacte, plus la modification du microclimat est importante provoquant ainsi des variations de la température de l'air et de la température de surface. Cette intensité dépend, entre autres, de la population bien entendu mais aussi de la morphologie des villes (Najjar et al., 2010 ; Fan et Sailor, 2005). Ceci a été démontré par Oke en 1973. Il a mis en évidence une relation (empirique) entre la taille de la ville et l'intensité de l'ICU. Quand la taille de la ville augmente (superficie et population), l'intensité de l'ICU augmente selon une croissance logarithmique. Les valeurs varient entre 2 °C pour une cité de 1000 individus et 12 °C pour une métropole de plusieurs millions d'habitants (Oke, 1973).

### **2.3.3. Morphologie urbaine**

La morphologie urbaine se réfère à l'organisation des masses bâties et la hauteur des bâtiments. Elle est définie comme la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments (volumétrie) ainsi que des espaces extérieurs qu'ils créent (Nikolopoulou, 2004). La morphologie urbaine est souvent confondue avec « la géométrie urbaine » ou « la forme urbaine ». Par les différentes expositions des surfaces au soleil, et l'altération de la vitesse et l'écoulement d'air dans le milieu urbain, la morphologie modifie les paramètres microclimatiques et agit sur l'ICU. Plusieurs indicateurs sont utilisés pour caractériser la morphologie urbaine (Venhari et al., 2019 ; Erell et al., 2011) ; les plus courants sont le rapport d'aspect (Aspect Ratio (AR) en anglais) et le facteur de vue du ciel (Sky View Factor (SVF) en anglais). Le terme « canyon Urbain » est souvent utilisé pour caractériser des rues bordées de bâtiments dont la largeur est inférieure à la hauteur de ces derniers.

Le rapport d'aspect ou profil de la rue (ou encore le prospect de la rue ;  $H/L$ ) informe sur la section du canyon urbain. C'est la proportion entre la hauteur de la construction ( $H$ ) et la largeur de la rue ( $L$  ou  $W$ ) (figure 2.2).

Le facteur de vue du ciel (SVF) se rapporte au degré d'ouverture du ciel. En d'autres termes, c'est la fraction du ciel visible à partir d'un point particulier du canyon urbain. Le facteur de vue du ciel égale à 1 pour un ciel totalement visible et 0 lorsqu'il est complètement obstrué (Hodul et al., 2016 ; Brown et Grimmond, 2001 ; Oke 1987). Le SVF est calculé par l'équation (2.1) (Parmentier, 2010) (figure 2.2) :

$$SVF = \cos \beta \quad (2.1)$$

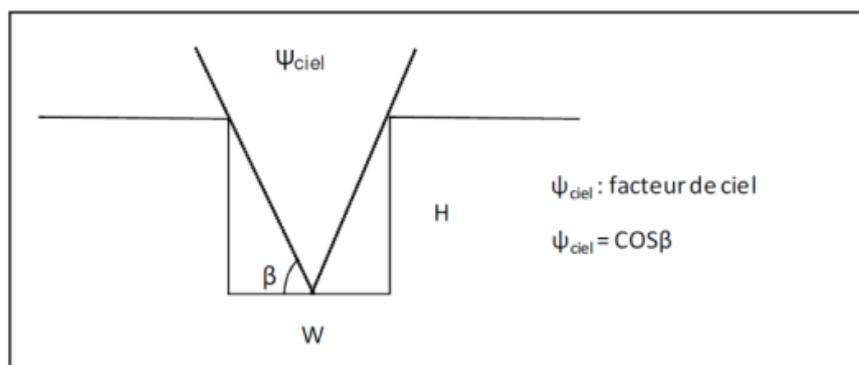


Figure 2.2 : Facteur de Vue du Ciel dans un canyon urbain et rapport d'aspect. H représente la hauteur du bâti et W la largeur de la rue. Adaptée de Oke (1981) (Tirée de Parmentier, 2010)

L'orientation des parois par rapport au soleil est aussi un facteur déterminant dans la géométrie urbaine. Elle définit la quantité d'énergie solaire incidente sur la surface et l'exposition aux vents dominants (Oke et al., 2017 ; Oke, 1987). De plus, la géométrie du bâtiment lui-même affecte les conditions d'échanges thermiques entre l'enveloppe du bâtiment et l'espace extérieur (Najjar et al., 2010).

### **2.3.3.1. Les effets aérodynamiques**

Dans le milieu urbain, la direction et la vitesse du vent sont fortement perturbées par la configuration du bâti. Les bâtiments, les arbres et autres éléments de rugosité constituent des obstacles au passage de l'air et modifient le profil vertical de vent (figure 2.3). Plus précisément, les grandes constructions et les rues étroites entravent la ventilation de la ville. L'orientation des rues, la hauteur et la taille des constructions engendrent des turbulences aérodynamiques particulières du cadre bâti (effet de barre, effet de sillage, de coin, effet de maille, effet de canalisation, de Venturi, etc.) (Gandemer et Guyot 1976). La vitesse moyenne du vent en milieu urbain est plus faible (de 50%) par rapport aux zones dégagées (Bouyer, 2009 ; Gartland, 2008 ; Brophy et al., 2000). Cette situation exacerbe et aggrave l'ICU.

En effet, un vent nul ou faible entraînera une stagnation des masses d'air chaud. En revanche, un vent fort favorise la circulation de l'air et donc l'évacuation de la chaleur accumulée vers l'extérieur de la ville. Par conséquent, il uniformise les températures de surface et de l'air. Plus le temps est calme et sans nuages, plus l'ICU est intense. Ghribi et Dahech (2020) démontrent que les écarts de température entre la ville et sa campagne deviennent très faibles quand la vitesse du vent dépasse les 4 m/s. Ils peuvent totalement disparaître en cas de vent fort (> 8 m/s). Ainsi, l'intensité de l'ICU diminue avec la vitesse du vent.

La modification de l'écoulement de l'air en ville a donc comme effet principal la diminution des échanges des flux de chaleur par convection entre l'air et les surfaces (Oke et al., 2017 ; Oke, 1987). Cette limitation se traduit par le stockage de la chaleur dans les matériaux urbains.

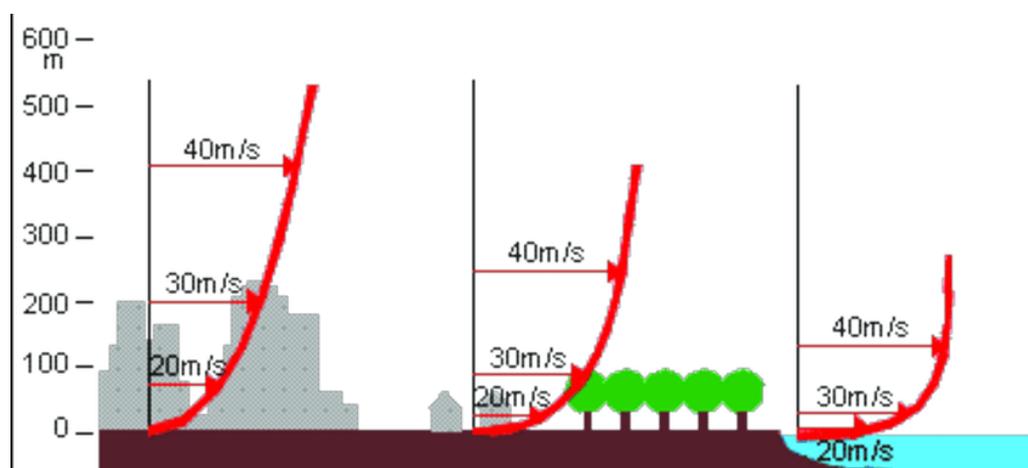


Figure 2.3 : Variations des profils de la vitesse du vent pour différentes surfaces. Source : Gratia et UCL, 2000.

### 2.3.3.2. Exposition solaire et piégeage radiatif

Le milieu bâti comporte plus de surfaces (murs, toits et chaussées) en comparaison au terrain plat ou homogène. La géométrie urbaine présente donc un degré d'exposition plus important au rayonnement solaire car elle offre une plus grande aire d'échange de chaleur. L'exposition des parois au rayonnement solaire direct intervient directement sur le niveau d'intensité de l'ICU. Du fait de la complexité du cadre bâti et de l'ombrage mutuel des bâtiments, les surfaces sont exposées à la fois au rayonnement direct et à des multi-réflexions qui se produisent entre les parois des bâtiments et sur le sol. Il se produit ainsi un « piégeage radiatif » (Bouyer, 2009). « Cette situation provoque des perturbations radiatives conséquentes : les villes réfléchissent moins, absorbent plus et dissipent moins

*rapidement l'énergie solaire que les milieux naturels.* » (Dubois, 2014). Plus les parois sont exposées, plus l'énergie stockée ou piégée est importante (figure 2.4).

Un canyon urbain de faible SVF augmente le stockage et la rétention de la chaleur dans les parois et les revêtements pendant la journée, mais pendant la nuit, la faible ouverture vers le ciel entraîne un ralentissement du refroidissement radiatif la nuit et une mauvaise ventilation urbaine (Oke et al., 2017 ; Najjar et al., 2010 ; Nakamura et Oke, 1988).

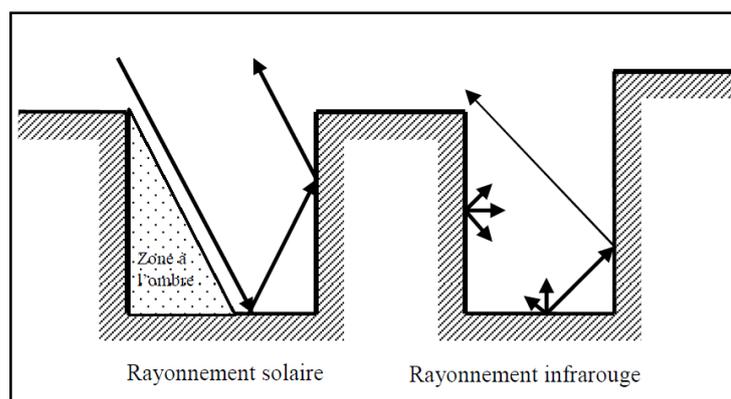


Figure 2.4 : Exposition solaire et piégeage radiatif en milieu urbain (Colombert, 2008).

### **2.3.4. Matériaux et surfaces**

Les matériaux de construction et de revêtement constituent un autre facteur de l'ICU. Ils contribuent à la formation de l'ICU par la modification de leur température de surface qui elle-même influence la température de l'air ambiant (Stewart et Mills, 2021). Les propriétés radiatives et thermiques des matériaux et des surfaces du milieu urbain jouent sur les conditions de confort thermique des espaces extérieurs adjacents. « *Les propriétés radiatives traduisent la capacité des surfaces à réfléchir et à réémettre l'énergie solaire. Les propriétés thermiques reflètent quant à elles leur habileté à stocker cette énergie* » (Dubois, 2014). En effet, les matériaux (tels que l'asphalte ou le béton) stockent la chaleur durant le jour et la rediffusent vers l'atmosphère pendant la nuit sous forme de rayonnement infrarouge. Chaque matériau est caractérisé par un certain nombre de propriétés thermiques. L'émissivité, la conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ), la diffusivité thermique ( $m^2/s$ ) et l'inertie définissent principalement le bilan thermique des parois (Bouyer, 2009). Les chercheurs s'appuient beaucoup sur une grandeur associée à la réflectivité solaire appelée « l'albédo ».

L'albédo est un paramètre essentiel dans l'étude de l'îlot de chaleur urbain. Il représente l'aptitude de réflexion d'une surface exposée à la lumière (Taha, 1997). C'est le rapport entre la lumière réfléchiée et la lumière reçue d'une surface (Energie réfléchiée / Energie reçue) (Parmentier, 2010). Cette grandeur varie entre 0 et 1. La valeur 0 équivaut à un corps noir qui va absorber entièrement la lumière reçue sans aucune réflexion. La valeur 1 représente un corps blanc ou un miroir parfait qui réfléchit toute l'énergie reçue.

ILLUSTRATION DES TAUX D'ALBÉDO EN MILIEU URBAIN

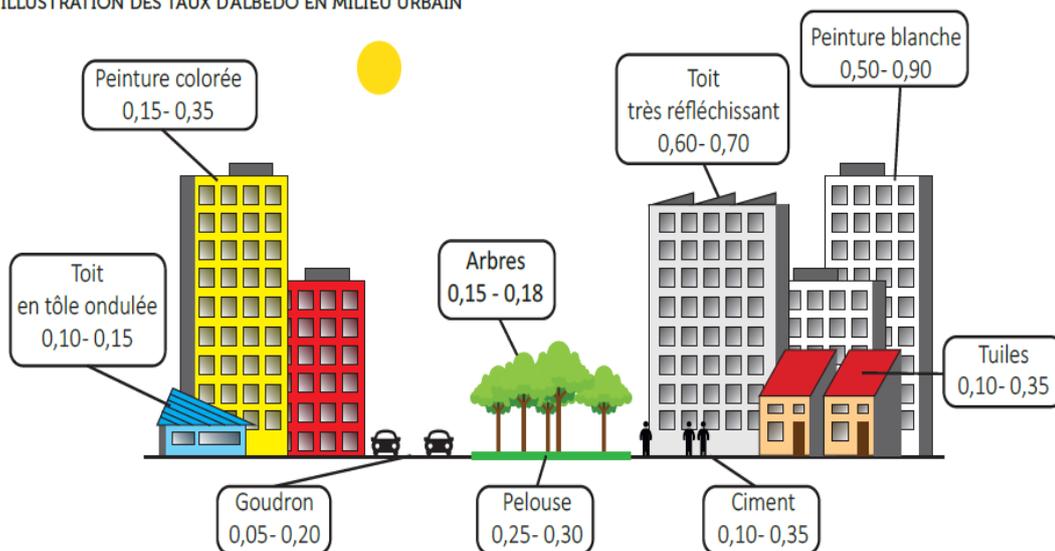


Figure 2.5 : Exemple d'albédos par type de matériaux et surfaces dans l'espace urbain. (Tirée de : ICU, 2017)

L'albédo diffère d'un matériau à l'autre. À l'échelle de la ville l'albédo « moyen » dépend de la forme urbaine et du type des matériaux de revêtements utilisés (figure 2.5). L'albédo moyen des villes européennes et américaines se situe entre 0,15 et 0,20. Pour les villes nord africaines l'albédo varie de 0,30 à 0,45 (Taha, 1997). Dans les villes chaudes arides ou dans les villes du bassin méditerranéen, l'insolation est très intense. Pour lutter contre la chaleur urbaine, les habitants des maisons traditionnelles pratiquent depuis des siècles le badigeonnage à la chaux des toits plats (Bensayah et al., 2019). Dans une étude sur l'effet de la couleur sur la température des toits de bâtiments dans le désert d'Arizona (Etats unis), Simpson et McPherson, (1997) ont trouvé que les toits de couleur blanche (albédo = 0,75) étaient 30°C plus froids que les toits de couleur sombre (albédo de 0,10). Le fort albédo des surfaces blanchies reflète le rayonnement solaire et absorbe donc moins la chaleur.

L'albédo est aussi lié à la couleur de la paroi, au type et la nature du matériau (Oke et al., 2017 ; Akbari et al., 2008 ; Synnefa et al., 2007 ; Akbari et al., 2003). Plus la surface est claire, plus son albédo est grand. La température d'une surface diminue avec l'augmentation de son albédo (Santamouris et al., 2012 ; Taha et Bornstein, 1999).

« *Les surfaces rugueuses et sombres absorbent plus de rayonnement que les surfaces lisses, planes et claires et atteignent une température plus élevée, restituant alors cette chaleur à l'air ambiant* » (Bozonnet et al., 2006). La multiplication des surfaces urbaines à faible albédo (pavements en pierre, routes goudronnées, aires de stationnement, parois sombres, etc.) est l'un des plus importants facteurs de formation des îlots de chaleur urbains. Rosenfeld et al. (1995) ont démontré qu'on peut réduire l'impact de l'ICU par l'augmentation de l'albédo moyen et la plantation des arbres en ville. L'utilisation de matériaux réfléchissants et de faible capacité thermique réduit aussi la consommation d'énergie pour le conditionnement d'air dans les bâtiments et participe ainsi à lutter contre l'ICU. Akbari et al., (1997) rapportent des gains considérables en énergie de climatisation pour des revêtements à haut albédo à Sacramento, en Californie. L'effet bénéfique d'un albédo élevé a ainsi été démontré par plusieurs chercheurs (Oke et al., 2017 ; Bozonnet et al., 2011 ; Uemoto et al., 2010 ; Taha et al., 1988).

Taha et al. (1992) rapportent que les rues et les toits absorbent énormément d'énergie solaire ce qui peut élever la température de ces surfaces de 10 à 21 °C au-dessus de celle de l'air ambiant. Taha a montré aussi que l'augmentation de l'albédo de 0,25 à 0,40 peut faire baisser la température de l'air de plus de 4°C (Taha, 1994). Enfin, Santamouris (2005) affirme qu'il est possible de baisser la température d'air de 2°C à 4°C en augmentant l'albédo de 0,13.

L'inertie thermique est une autre propriété des matériaux. Elle est très importante tout comme l'albédo. C'est la capacité d'un matériau d'absorber et stocker de la chaleur, puis la restituer avec un décalage de plusieurs heures (Liebard et De Herde, 2006). Or l'inertie des matériaux urbains est en général élevée.

Dans la ville aride d'Abu-Dhabi, Lazzarini et al. (2013) montrent que durant la nuit les alentours de la ville deviennent plus froids que le centre-ville. Ils rapportent qu'en ville la surface des sites végétalisés est 3 °C plus fraîche que les sites bâtis. Coutts et Harris (2013) affirment que l'augmentation du couvert végétal est très efficace en matière de diminution des températures de surface pendant les vagues de chaleur. Ils ont trouvé qu'une augmentation de 10 % de surface végétale mène à une réduction de 1 °C dans la

température de surface en journée à Melbourne. Doulos et al. (2004) ont effectué une étude sur 93 matériaux couramment utilisés comme revêtements (sol et façade). Ils concluent que les surfaces lisses, planes et claires sont les plus fraîches.

Chudnovsky et al. (2004) rapportent une différence de 10°C de température environ entre divers revêtements de sol l'après-midi et de 4 à 5 °C avant le lever du soleil. L'asphalte est plus chaud que le béton durant le jour mais plus froid de 2 à 3 °C la nuit. Les revêtements de couleurs sombres atteignent 44 °C à midi. Akagawa et al. (2014) rapportent dans leur recherche à Osaka (Japon) que les températures diurnes de surface de la végétation, du revêtement en béton, et le parking bitumé étaient 30 °C, 45 °C et 55 °C respectivement. La différence de température relevée entre la végétation et les autres revêtements de sol varie entre 15 et 25 °C. La végétation était plus froide que l'air de 3.4 °C. Adderley et al. (2015) ont mené une étude sur des maisons individuelles groupées. Les toits affichent les températures les plus élevées durant le jour d'une moyenne de 47,65 °C à 13 :30 h. Par contre durant la nuit les toits sont plus froids que les murs ou le sol atteignant une température moyenne minimale de 6,85 °C à 06 :30 h. Les toits ainsi, présentent la plus grande amplitude thermique journalière de 40 °C. Dans la ville chaude et aride de Phoenix, Di Sabatino et al. (2009) ont étudié les températures de façades de plusieurs canyons urbains dans le centre-ville. Les résultats montrent que les températures des façades ont une forte variation entre le sol (fortes températures) et le haut des tours où elles diminuent linéairement avec l'altitude. L'étude a révélé aussi que le béton présente la plus grande contribution à la chaleur urbaine.

L'application des albédos élevés sur l'enveloppe des bâtiments est donc très utile. Ceci permet d'une part, d'abaisser la température de l'air à l'intérieur du bâtiment et d'autre part de réduire la température d'air à l'extérieur en diminuant l'échange thermique par convection avec les surfaces de l'enveloppe (Santamouris et al., 2012).

### **2.3.5. Réduction de l'évapotranspiration par imperméabilisation et diminution du végétal**

Une autre cause de l'ICU est l'imperméabilisation des surfaces et la réduction de l'évapotranspiration par diminution de la végétation (qui signifie évaporation de l'eau et transpiration de la végétation) (Stewart et Mills, 2021). En milieu naturel, l'eau des précipitations s'infiltré dans le sol, elle est absorbée par la végétation ou elle s'évapore en humidifiant l'air (figure 2.6). Le processus d'évaporation consomme de l'énergie et réduit ainsi la température de l'air et du sol. Ce phénomène d'évapotranspiration est très réduit en

ville ; ce qui entraîne une diminution de la consommation de chaleur par évaporation (Ackerman, 2007). Ce processus diminue les températures de surface. La végétation, en interceptant le rayonnement solaire, absorbe une part de l'énergie reçue et apporte un ombrage au sol (Ackerman, 2007). Elle puise l'eau du sol pour la restituer ensuite sous forme de vapeur d'eau à l'air ambiant (transpiration). Par conséquent, la transpiration foliaire refroidit -via évaporation de l'eau- les surfaces des feuilles et l'air qui s'y trouve en contact. À titre d'exemple, un arbre, en transpirant 450 litres d'eau a un potentiel de refroidissement équivalent à celui de 05 climatiseurs qui fonctionnent 20 heures par jour (Johnston et Newton, 2004).

En milieu urbain, les surfaces végétales et les plans d'eau sont remplacés par des surfaces étanches (bitume, pavage, céramique, métal, etc.) (Noui et al., 2023). Cette artificialisation des surfaces mène au ruissellement de l'eau et au séchage rapide du sol et des toits (Oke et al., 2017 ; Taha, 1997). Ces surfaces provoquent l'évacuation rapide des eaux de pluies vers les systèmes de drainage et d'égouts ce qui modifie les cycles hydriques en milieu urbain. Conséquemment, l'étanchéité des surfaces urbaines accentue aussi les risques d'inondations.

Ainsi les espaces verts et les plans d'eau participent à la lutte contre la chaleur urbaine (Erell et al., 2011). Le phénomène d'évaporation à partir du sol contribue au rafraîchissement de l'air ambiant car l'eau de pluie contenue dans le sol est lentement relarguée à l'atmosphère élevant le taux d'humidité (Figure 2.6).

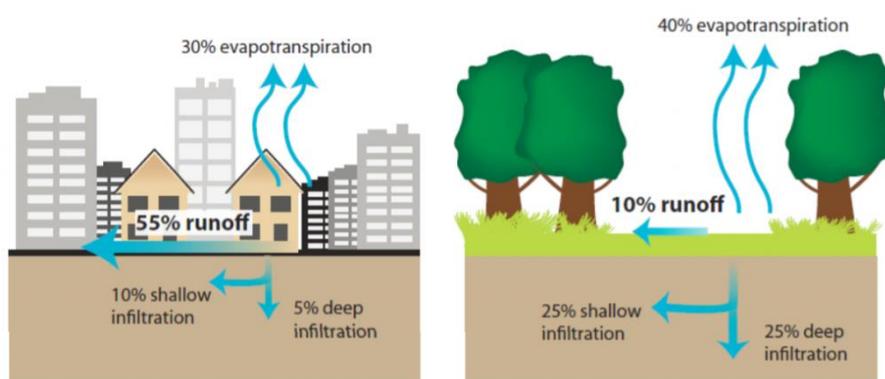


Figure 2.6 : Modification de l'évapotranspiration en milieu urbain (USEPA, 2008).

En somme, la perte progressive des surfaces naturelles dans la ville due à l'imperméabilisation des surfaces urbaines et à la réduction d'espaces verts accentue les facteurs aggravants de l'ICU.

### **2.3.6. Pollution et émission de chaleur par les activités anthropiques**

La chaleur anthropique et la pollution atmosphérique constituent un facteur humain important dans la formation de l'ICU. Ces émissions de chaleur et de polluants sont dues aux activités humaines et regroupent plusieurs secteurs :

- Le chauffage et la climatisation,
- L'éclairage public et esthétique,
- Les transports et la circulation urbaine automobile,
- Les industries,

Ces émissions sont des sources de gaz à effet de serre (GES). Elles contribuent non seulement à la formation de l'îlot de chaleur urbain mais aussi au réchauffement planétaire global. La production de chaleur induite par les activités humaines constitue donc un apport d'énergie supplémentaire qui réchauffe davantage l'air ambiant par l'accroissement de la chaleur sensible. Les villes produisent des concentrations de polluants atmosphériques très élevées par rapport au milieu rural (Ulpiani, 2021 ; Oke et al., 2017 ; Oke, 1987). La pollution urbaine modifie la composition verticale de l'atmosphère. Les couches d'air chargées de particules et d'aérosols conduisent à la formation d'un effet de serre local. Cette pollution interagit avec le rayonnement solaire en absorbant plus de chaleur et en diminuant le refroidissement de la ville par rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Les rayonnements sont donc emprisonnés dans « un dôme de chaleur » au-dessus de la ville puis renvoyés vers la surface, ce qui intensifie l'ICU.

Cette situation aggrave encore l'effet du « piégeage radiatif » dû à la morphologie urbaine. La rugosité aérodynamique entrave la bonne ventilation de la ville ce qui affaiblit l'évacuation des polluants et de chaleur (Ulpiani, 2021 ; Hankey et Marshall, 2017 ; Bouyer, 2009). Taha (1997) rapporte que la chaleur anthropique peut augmenter l'intensité de l'îlot de chaleur de 2 °C à 3 °C.

Le flux de chaleur anthropique dépend entre autres du climat de la ville, de sa taille, de sa population mais aussi du niveau de l'activité industrielle (Ringebach, 2004). Il est plus élevé en hiver, en particulier dans les villes à climat froid du fait du besoin élevé en chauffage (Erell et al., 2011). Néanmoins, l'énergie anthropique est aussi élevée en période estivale dans les zones chaudes et arides du fait de la climatisation (Murtagh et al., 2022 ; Ghribi et al., 2019 ; Indraganti et Boussaa, 2017 ; Dahech, 2012), ceci tend aussi à

augmenter dans les villes froides ou tempérées (deMunck et al., 2013 ; Tremeac et al., 2012).

## **2.4. L'intensité du phénomène d'ICU**

L'intensité d'un ICU est définie par la différence de température de l'air entre la ville (le milieu urbain) et l'environnement rural de la même ville (le milieu rural). Par convention, elle est calculée par la formule suivante :

$$\Delta T_{u-r} = T_u - T_r \quad (2.2)$$

Où :

$T_u$  : c'est température de l'air dans le point de référence en zone urbaine.

$T_r$  : c'est température de l'air dans le point de référence en zone rurale.

Il est à noter que pour une agglomération étendue il peut y avoir des variations intra-urbaines de température. L'ICU aura donc des intensités différentes ce qui mène à parler plutôt « d'archipel de chaleur » ou « Urban Heat Archipelago » (LaDochy et al., 2021 ; Taha, 2017 ; Shepherd et al., 2013 ; Kuttler, 2012 ; Buyantuyev et Wu, 2010). L'intensité des ICUs dépend du climat de la ville, de sa taille (superficie et population), de la topographie du site, de la nature des activités humaines, de la morphologie, etc.

## **2.5. Caractéristiques temporelles et spatiales de l'îlot de chaleur urbain**

L'îlot de chaleur urbain subit une fluctuation journalière et saisonnière. De même, l'intensité de l'ICU connaît des variations à l'intérieur de la zone urbaine du fait des hétérogénéités entre les différents secteurs de la ville : différences morphologiques, présence ou pas d'eau et de végétation, disparités dans l'activité anthropique, etc. Les différences d'intensité peuvent aller jusqu'à la formation « d'îlots de fraîcheur » dans la ville. Ainsi, l'ICU est caractérisé par une variabilité spatiale et temporelle.

### **2.5.1. Variabilité temporelle**

Plusieurs études affirment que le phénomène d'îlot de chaleur urbain est principalement nocturne. L'écart de température de l'air entre la ville et son environnement rural est plus grand la nuit que le jour (Alcoforado et Matzarakis, 2010 ; Arnfield, 2003 ; Runnalls et Oke, 2000). Cependant, la plupart de ces études sont réalisées sur des villes à

climat froid et tempéré. Certaines recherches effectuées dans les villes à climat chaud et aride démontrent que l'îlot de chaleur urbain est un phénomène diurne. De jour, ces villes présentent plutôt un îlot de fraîcheur urbain IFU (Roth, 2007 ; Saaroni et al., 2004).

Dans les villes froides et tempérées, les études démontrent que l'intensité de l'ICU atteint sa valeur maximale quelques heures après le coucher du soleil (Pigeon, 2007).

Les gradients diurnes varient selon les saisons, l'ICU est plus intense en hiver qu'en été (Runnalls et Oke, 2000 ; Oke, 1987). Cantat (2004) indique que l'intensité de l'ICU est plus prononcée en été qu'en hiver. Elle varie selon les saisons et la variation des conditions météorologiques. Philipps et al. (2020) affirment que la variabilité temporelle de l'ICU connaît sa forme la plus intense lors des nuits calmes sans nuages. Madelin et Dupuis (2020) rapportent que l'îlot de chaleur urbain est essentiellement nocturne et il est intense pendant les nuits calmes avec ciel clair.

En somme, la variabilité temporelle de l'ICU est liée au cycle journalier et aux types de temps. Le vent, les précipitations et la nébulosité sont donc les facteurs principaux (Cantat, 2004 ; Eliasson and Svensson 2003) :

- Les nuages réduisent le rayonnement net, ce qui diminue la chaleur stockée en ville durant la journée. De nuit, ils augmentent le rayonnement infrarouge atmosphérique. Donc, l'intensité de l'ICU diminue quand le ciel est nuageux (Ghribi et Dahech, 2020 ; Eliasson et Svensson, 2003 ; Runnalls et Oke, 2000).
- Le vent fort accélère et force la ventilation dans la ville. Il favorise le mixage et le brassage des couches d'air. Les écarts de température entre la ville et la campagne tendent à disparaître (Eliasson et Svensson, 2003). Cantat (2004) considère qu'il n'y a pas d'îlot de chaleur au-delà de 7m/s pour la vitesse d'air.
- Enfin, les précipitations augmentent le flux de chaleur latente dans la ville et la campagne et réduisent en conséquence les gradients thermiques entre elles.

### **2.5.2. Variabilité spatiale**

La variabilité spatiale de l'ICU est influencée par plusieurs facteurs à des échelles variées. À micro-échelle et à l'échelle locale le mode d'occupation des sols est un facteur déterminant (Eliasson et Svensson, 2003) : le taux de végétalisation, la complexité de la

morphologie urbaine, la présence de plans d'eau, le niveau d'émission de chaleur anthropique, etc. (figure 2.7). Un quartier aéré, très végétalisé et doté de jets d'eau manifesterait un îlot de chaleur bien plus faible qu'un quartier densément bâti, sans végétation ni eau. À une échelle plus grande, l'intensité de l'ICU peut être influencée par le relief ou la proximité de la mer par exemple. Les secteurs de la ville qui sont près de la côte manifestent des températures plus basses que les zones urbaines situées bien loin de la mer (Pigeon, 2007). Les différences d'altitudes entre les secteurs d'une même ville se répercutent aussi directement sur les différences de températures d'air (Eliasson et Svensson, 2003). Dans la ville de Sfax (Tunisie), Ghribi et Dahech (2020) montrent que les brises marines, le type des surfaces urbaines et certaines activités humaines influent sur la variation spatiotemporelle de l'ICU en été. Ils rapportent une intensité maximale de l'ICU d'environ 7°C durant la nuit, et une baisse des températures au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre et de la mer. Dahech (2012) affirme aussi que « *l'arrière-pays demeure plus chaud que la bande côtière* » car la pénétration de la brise de mer rafraîchit les quartiers de la côte (Dahech et Charfi, 2017 ; Dahech, 2014). Il apparaît donc que l'environnement régional impacte la variation de l'intensité de l'ICU.

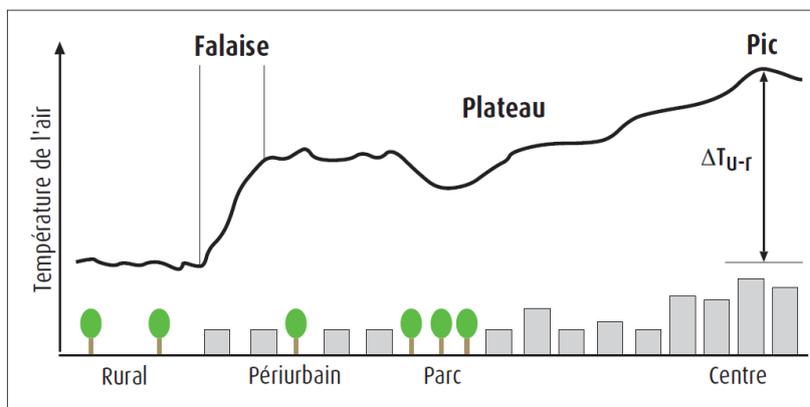


Figure 2.7 : Profil schématique de la variation de la température de l'air en zone urbaine. (Tiré de Pigeon, et al., 2008, adapté de Oke, 1987)

## 2.6. L'îlot de chaleur urbain et le bilan énergétique

L'évolution de l'ICU peut être décrite sur un cycle journalier à travers l'analyse de l'évolution du bilan énergétique de la ville et de sa campagne. La répartition de l'énergie entre le jour et la nuit permet d'expliquer les différences climatiques entre les deux milieux (Colombert, 2008).

### **2.6.1. Le jour**

Dans la journée, le flux du rayonnement net ( $Q^*$ ) est identique pour la ville et sa campagne, mais sa répartition est différente. La chaleur anthropique ( $Q_F$ ) représente une source de chaleur supplémentaire en ville. L'évapotranspiration élevée dans la campagne convertit une bonne partie de l'énergie en chaleur latente ( $Q_E$ ) (Pigeon et al., 2008). Par contre, les surfaces naturelles à la campagne ne stockent que peu d'énergie ( $\Delta Q_s$ ). Les surfaces imperméables dans la ville conduisent à une faible part de flux de chaleur latente ( $Q_E$ ) ce qui laisse une grande partie de l'énergie se convertir en chaleur sensible ( $Q_H$ ). Dans les climats chauds et arides, l'évapotranspiration est très faible ; l'énergie est convertie en chaleur sensible ou stockée dans le sol. Les matériaux urbains accumulent énormément de chaleur ( $\Delta Q_s$ ) par l'effet du piégeage du rayonnement net  $Q^*$  et infrarouge et la forte inertie thermique. L'albédo des surfaces en ville accentue aussi le stockage de l'énergie (figure 2.8). Dans les régions désertiques, la présence de la végétation et de l'eau en ville et l'ombrage partiel des bâtiments et des rues favorisent la formation d'un îlot de fraîcheur urbain le jour.

### **2.6.2. La nuit**

Pendant la nuit, le flux de chaleur stockée ( $\Delta Q_s$ ) est plus élevé en ville. Les matériaux urbains restituent l'énergie accumulée à l'air ambiant ce qui augmente la chaleur sensible ( $Q_H$ ). Cet effet est aggravé par l'encaissement des espaces urbains (faible facteur de vue du ciel SVF) qui réduit le refroidissement par rayonnement infrarouge vers le ciel ( $L \uparrow$ ). A la campagne, le refroidissement nocturne est beaucoup plus rapide du fait de la faible capacité thermique des surfaces naturelles (figure 2.8). L'ICU résulte de l'écart de température entre la ville et sa campagne environnante (Foissard, 2015).

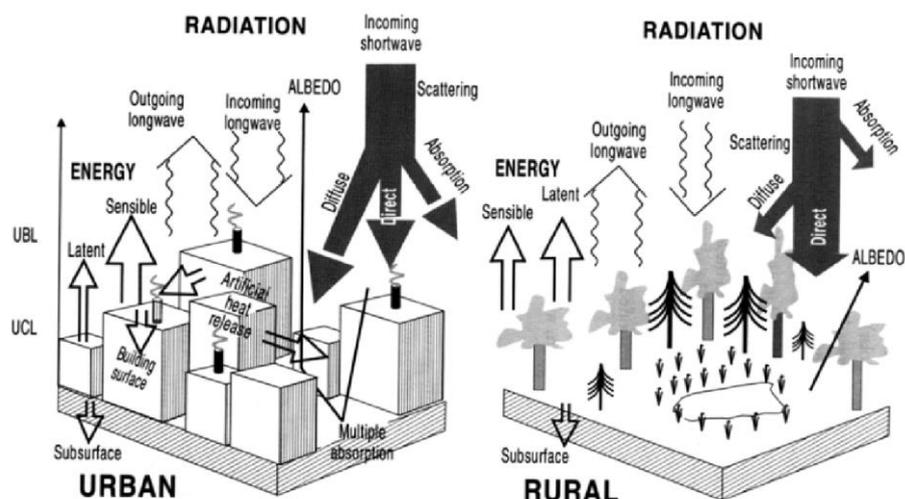


Figure 2.8 : Schéma des flux d'énergie et de rayonnement au-dessus d'une zone urbaine (à gauche) et rurale (à droite) pour une journée avec un ciel clair (Gill, 2004, d'après Bridgman et al., 1995).

## 2.7. Impacts des îlots de chaleur urbains

L'îlot de chaleur urbain a des impacts néfastes sur la santé humaine, sur l'environnement et sur la consommation d'énergie, notamment en été.

### 2.7.1. Impact sur la santé humaine

La chaleur estivale accablante accentuée par l'îlot de chaleur urbain a le potentiel d'agir directement sur la santé et le bien-être des individus. L'ICU peut augmenter l'ampleur, la durée et la fréquence des vagues de chaleur (Drapeau et al., 2022 ; Heaviside et al., 2017 ; Anquez et Herlem, 2011). Divers travaux ont montré que le taux de morbidité et de mortalité pendant une vague de chaleur augmente significativement avec la température. Les personnes les plus vulnérables aux ICU socialement et physiquement, sont les plus exposées à ces risques (Giguère, 2009). Le stress thermique causé par l'ICU peut provoquer des troubles de santé telles que : inconfort, malaise, faiblesses, troubles de la conscience, coup de chaleur, déshydratation, hyperthermie, etc. (Drapeau et al., 2022).

Comme il a été cité plus haut, le nombre de décès attribuables aux vagues de chaleur est très important dans les centres urbains (Klinenberg, 2022 ; Chow et al., 2012 ; Hémon et al., 2003). La mauvaise adaptation des villes chaudes et arides rend leurs populations plus exposées aux risques des chaleurs urbaines, en particulier les personnes malades ou fragiles. Quant aux travailleurs à l'extérieur dans ces régions, ils souffrent d'un inconfort thermique extrême. La forte température extérieure a un effet direct sur les conditions de confort thermique à l'intérieur des bâtiments aussi.

L'ICU affecte aussi la qualité de l'air dans la ville. Les températures élevées aggravent les effets de la pollution atmosphérique. L'accumulation de polluants dans l'air provoque des problèmes respiratoires aigus et des affections telles que l'asthme (Drapeau et al., 2022 ; Anquez et Herlem, 2011).

### **2.7.2. Impact sur l'environnement**

L'ICU aggravent les effets néfastes de la pollution atmosphérique issue des véhicules motorisés et des usines comme l'ozone et le smog. Ce dernier est « *un mélange composé de particules fines et d'ozone troposphérique, lequel est formé par la réaction des polluants (oxydes d'azote) et des composés organiques volatils en présence de rayons du soleil et de chaleur* » (Drapeau et al., 2022). Cette pollution affecte les humains, les végétaux et les animaux (changements des conditions climatiques, pluies acides, etc.).

Les conséquences de l'ICU sur la flore et la faune se conjuguent avec les effets du changement climatique. Il a été constaté une avancée des dates de floraison et des dates de vendanges, une perturbation de la reproduction des espèces et de pollinisation, etc. Tous ces impacts affectent les écosystèmes locaux et l'agriculture urbaines (Beltrando et Briche, 2010 ; Seguin, 2010).

Les fortes chaleurs accentuent la prolifération des bactéries, des moisissures et des acariens à l'intérieur des bâtiments, ce qui altère la salubrité des immeubles et des maisons (Poulin et al., 2016).

Enfin, l'ICU augmente la demande en eau potable. L'eau est utilisée pour se rafraîchir et pour irriguer la végétation dans ses formes diverses (végétation d'agrément, jardins publics, arbres d'alignement, agriculture et potager urbains, etc.). Dans les villes chaudes et arides, l'eau est une ressource rare. Les oueds (cours d'eau secs) ne permettent pas d'assurer un approvisionnement continu d'eau faute de pluie. Middel et al. (2012) et Guhathakurta et Gober (2007) démontrent que la consommation d'eau pour le rafraîchissement augmente considérablement en été dans la ville chaude et aride de Phoenix dans le sud des États-Unis. A cause du manque d'eau dans le désert, la consommation accrue de l'eau accentuée par l'ICU aggrave le problème de la pénurie d'eau.

### **2.7.3. Impact sur la consommation d'énergie**

L'îlot de chaleur urbain peut être bénéfique en hiver car il réduit la facture du chauffage. Par contre, en été, l'élévation des températures accroît les besoins de

réfrigération et de rafraîchissement de l'air intérieur. D'après Anquez et Herlem (2011), une augmentation de l'intensité de l'ICU de 2 °C peut élever de 5 % la consommation d'énergie de climatisation. Le recours à la climatisation des bâtiments occasionne donc une augmentation de la consommation d'énergie et en conséquence, une hausse des émissions de gaz à effet de serre et de chaleur anthropique. Cette situation a pour effet d'amplifier l'ICU ce qui crée ainsi un cercle vicieux (Radhi et Sharples, 2013 ; Giguère, 2009).

## **2.8. Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains**

Plusieurs solutions existent pour contrer l'effet d'îlot de chaleur urbain et l'élévation des températures dans les villes (Lai et al., 2019 ; Kleerekoper et al., 2012). Les municipalités peuvent prendre une série de mesures et leviers d'adaptation pour réduire la chaleur urbaine. Les mesures de lutte concernent divers domaines : l'urbanisme, l'architecture, le transport, etc. A travers la combinaison de mesures diverses il est possible de mettre en place une stratégie globale de rafraîchissement des milieux urbains. Ces mesures s'appuient sur le principe de réduction de la production de chaleur, la réduction de l'absorption de la chaleur et la création des sources de fraîcheur (Battista et al., 2020 ; Farhadi et al., 2019 ; Akbari et al., 2016 ; O'Malley et al., 2015 ; Yamamoto, 2006).

### **2.8.1. Végétalisation**

La végétalisation est probablement le moyen de lutte le plus évident contre l'îlot de chaleur urbain (Farhadi et al., 2019 ; Imran et al., 2019). Elle permet de lutter contre la chaleur urbaine par l'effet d'ombrage et d'évapotranspiration à travers la protection contre le rayonnement solaire direct et l'humidification de l'air (Battista et al., 2020 ; Bowler et al., 2010). La végétalisation (le fait d'augmenter la surface de végétation) peut être appliquée de différentes manières (Drapeau et al., 2022 ; Giguère, 2009) :

- plantations ponctuelles d'arbres et d'arbustes (Tan et al., 2016).
- verdissement des stationnements;
- verdissement des pourtours des bâtiments (gazon, prairies fleuries, etc.);
- création de murs végétaux (plantes grimpantes, etc.);
- installation de toits verts (Jim, 2015).

La multiplication des espaces verts et leur répartition dans la ville participe dès lors à la régulation thermique de l'espace urbain. Le végétal urbain contribue aussi à l'amélioration de la qualité de l'air et de la santé publique par captation des particules de

polluants par le feuillage. La végétation permet aussi la réduction de l'énergie utilisée pour la climatisation dans les bâtiments par l'ombrage porté sur les bâtiments (plantations ponctuelles d'arbres et d'arbustes (Nuruzzaman, 2015 ; Anquez et Herlem, 2011)). Cependant, l'irrigation de la végétation sous les climats chauds et arides est un paramètre important pour le choix des espèces à planter et l'objectif visé car pour bénéficier pleinement du phénomène d'évapotranspiration, il faut étudier le potentiel d'irrigation et l'adaptabilité des espèces végétales (Chow et Brazel, 2012).

### **2.8.2. Bâtiments et infrastructures urbaines**

D'autres mesures de lutte contre les îlots de chaleur ciblent les infrastructures urbaines (routes, trottoirs, stationnements, etc.) et les constructions. Elles portent sur le choix de matériaux réfléchissants (fort albédo) et peu absorbants (faible inertie thermique).

A l'échelle du bâtiment, par exemple, il est judicieux d'appliquer les principes de l'architecture bioclimatique. Ainsi il faudrait procéder à une bonne orientation des bâtiments, à l'isolation des façades et toitures, à une bonne ventilation, à l'utilisation de vitrages performants, à l'ajout de protections solaires, etc. (Drapeau et al., 2022 ; Taslim et al., 2015). Le badigeonnage des toits au lait de chaux qui est pratiquée dans les habitations traditionnelles des ksour est à généraliser pour toutes les constructions. Les moyens passifs de rafraîchissement peuvent aussi être utilisés tels que le puits provençal ou "puits canadien" (Mebarki et al., 2012) et la tour à vent ou "capteur de vent" (Torkia, 2021 ; Tolba, 2014). A l'échelle du quartier, il faut réfléchir à la morphologie urbaine et repenser la forme et l'agencement des bâtiments afin de favoriser la ventilation du quartier et l'auto-ombrage des édifices (Taleb et Abu-Hijleh, 2013).

En ce qui concerne les infrastructures comme les voies de circulation et les stationnements, il est recommandé de choisir des surfaces réfléchissantes (Vujovic et al., 2021) et peu absorbantes (éviter l'asphalte noir), de créer des stationnements souterrains ou étagés, de prévoir des passages couverts et des allées piétonnes ombragées, etc. (Yamamoto, 2006). D'une manière globale, il est recommandé de réduire les surfaces minéralisées et d'augmenter leur albédo. Les matériaux pour le pavage et les revêtements du sol doivent être de couleur claire et de faible capacité thermique (Qin, 2015 ; Santamouris, 2014).

### **2.8.3. Gestion des eaux pluviales**

La gestion des eaux pluviales est un levier important dans la lutte contre l'ICU. Elle peut être effectuée par la perméabilisation des surfaces et l'augmentation des capacités de rétention d'eau. La forte perméabilité du sol favorise l'infiltration des eaux de pluie, l'évaporation et l'évapotranspiration. Ceci favorise l'humidification du sol et assure la disponibilité de l'eau pour les végétaux dans la ville à travers l'infiltration lente de l'eau (Giguère, 2009).

Il existe de nombreuses pratiques de gestion durable des eaux pluviales (Drapeau et al., 2022), on peut citer :

- L'aménagement de jardins pluviaux et l'installation de toits verts qui peuvent capter une grande quantité des eaux pluviales, réduire le ruissellement et augmenter l'humidification des sols. Les jardins des résidences privées ou des bâtiments publics peuvent être utilisés comme jardins pluviaux.
- L'utilisation de revêtements perméables permet à l'eau de pluie de s'infiltrer dans le sol. Le pavé perméable capte le ruissellement de surface et permet la percolation de l'eau à travers les vides (Vujovic et al., 2021). Il existe plusieurs types de revêtements perméables tels que les structures alvéolées dans les stationnements des véhicules qui permettent l'engazonnement et l'infiltration de l'eau dans le sol, ou le dallage en pavés séparés qui permettent à l'eau de pluie de s'infiltrer dans les joints perméables.
- Le bassin de rétention est un aménagement d'une dépression qui recueille l'eau de pluie qui y ruisselle et la laisse s'infiltrer dans le sol. Ils permettent l'infiltration lente de l'eau pour la recharge de la nappe phréatique. Quant aux tranchées de rétention, elles sont de forme linéaire, peu profondes mais elles ont la même fonction que les bassins de rétention. Il est aussi recommandé de multiplier les puits d'infiltration ou « puits de captage » afin d'exploiter au maximum les crues de l'oued.

Il est également possible de créer des fontaines et des jeux d'eau afin de rafraîchir certains espaces urbains ; mais ces dispositifs consomment beaucoup d'eau notamment en été car l'évaporation est très intense (Shashua-Bar et al., 2009).

### **2.8.4. Réductions de la chaleur anthropique**

Réduire l'émission de chaleur anthropique est une autre mesure de lutte contre l'ICU. On peut agir au niveau de la planification urbaine en repensant la mobilité dans les trajets interurbains. Il est indispensable de réduire le recours aux transports motorisés et favoriser la mobilité « verte ou douce » en limitant la circulation des voitures et privilégiant les transports en commun ou la bicyclette par exemple. Cet objectif peut être atteint par la création de quartiers denses favorisant une mixité d'activités et de services (Drapeau et al., 2022). Au niveau du bâtiment, il faut augmenter l'efficacité énergétique et réduire la consommation d'énergie de climatisation à travers une architecture bioclimatique et une bonne isolation thermique des bâtiments. Il est aussi conseillé d'opter pour des appareils électroménagers, de bureautique et des lampes économes en énergie. Privilégier les systèmes passifs de climatisation (tel que le puits provençal et la tour à vent) et les systèmes de rafraîchissement utilisant les énergies renouvelables est aussi une solution efficace dans la réduction des émissions de chaleur anthropique (Jassim et al., 2020 ; Djouima et al., 2018 ; Anquez et Herlem, 2011 ; Giguère, 2009).

### **2.8.5. Implication et sensibilisation des habitants**

L'implication des citoyens dans la lutte contre l'ICU est primordiale dans la stratégie globale de réduction des émissions et de mise en avant de solutions de rafraîchissement. Le changement de comportements individuels doit participer à l'atténuation de l'effet de l'ICU. Des pratiques simples (Drapeau et al., 2022) peuvent être mises en place :

- Diminuer l'activité durant les moments les plus chauds ;
- Utiliser les protections solaires, et limiter l'usage de climatisation ;
- Arrêter le moteur des véhicules quand ils sont à l'arrêt et choisir une voiture peu énergivore ou adhérer à un système de covoiturage ;
- Privilégier les commerces de proximité et limiter les déplacements en automobile ;
- Utiliser les transports en commun ou se déplacer en vélo.

## **2.9. Le confort thermique des espaces extérieurs**

Dans le contexte du réchauffement climatique et d'ICU les paramètres microclimatiques des espaces extérieurs sont d'une grande importance. Les effets néfastes

des îlots de chaleur impactent directement la qualité des ambiances extérieures (Dasari et al., 2021). Le confort thermique en milieu urbain est très important pour la santé et le bien-être des habitants. Le type et la qualité des activités sont influencés par le niveau de confort thermique des usagers de ces espaces urbains. Dans les villes à climat chaud et aride, l'étude des caractéristiques microclimatiques des espaces extérieurs est plus que nécessaire et vise à trouver des réponses et des solutions d'aménagement pour créer des ambiances thermiques extérieures confortables pour les piétons et les usagers des espaces urbains (Al-Bouwarthan et al., 2019). Si les conditions du confort thermique dans l'espace intérieur sont contrôlables ; elles sont plus difficiles à maîtriser en espace extérieur. Les paramètres de l'environnement urbain sont nombreux et changeants, ceci rend l'évaluation du confort thermique plus compliquée.

### **2.9.1. Ambiance et confort thermique**

L'ambiance thermique extérieure est liée aux caractéristiques du microclimat de l'espace urbain. Elle est affectée aussi par la perception et la sensation des individus, par leur tenue vestimentaire et l'activité physique qu'ils pratiquent. L'usage des espaces extérieurs est donc lié au ressenti des individus à l'environnement thermique.

Le confort thermique conditionne le comportement des usagers des espaces urbains en matière d'activité ou d'habillement (Nikolopoulou, 2004). Il se définit par rapport à des seuils de tolérance (échelle de température acceptable). Le bien-être des personnes et leur productivité sont liés essentiellement à l'ambiance thermique (conditions microclimatologiques et météorologiques), au confort ressenti et aux sensations associées (bien-être ou gêne).

### **2.9.2. Le confort thermique extérieur**

Fanger (1970) définit le confort thermique comme « *l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique* ». ASHRAE (2010) le définit aussi d'une façon similaire. Musy (2008) le définit : « *Une ambiance confortable est une ambiance pour laquelle l'organisme humain maintient sa température corporelle constante (homéothermie) sans mettre en jeu d'une manière perceptible ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le chaud et le froid. Cet état est appelé neutralité thermique.* ». L'utilisateur évalue une ambiance ni trop chaude ni trop froide (Attia et Hensen, 2014), ses mécanismes de thermorégulation sont à un niveau d'activité minimale (Givoni, 1978). Nikolopoulou (2004) définit le confort thermique comme « *la satisfaction psycho-*

*physiologique de l'être humain vis-à-vis de son environnement thermique* ». C'est une notion complexe car il dépend de plusieurs facteurs notamment les facteurs psychologiques qui le rendent une notion très personnalisée.

Il existe trois approches différentes du confort thermique : l'approche physique, l'approche thermo-physiologique et l'approche psycho-sociologique (Musy, 2008) :

- L'approche physique est basée sur l'étude du bilan thermique du corps humain et ses échanges de chaleur et de masse avec son environnement.
- L'approche physiologique se base sur les mécanismes d'autorégulation du corps humain vis-à-vis de son environnement thermique comme la transpiration et le frisson.
- L'approche psycho-sociologique aborde l'évaluation subjective de l'individu de son ambiance thermique.

La caractérisation et l'évaluation du confort thermique dans les milieux urbains est très nécessaire vu l'importance de la qualité des ambiances thermiques extérieures sur l'attractivité et l'habitabilité des villes (Coccolo et al., 2016 ; Givoni et al., 2003). Plusieurs activités récréationnelles et commerciales ont lieu dans les espaces extérieurs tels que les évènements culturels et touristiques (Spagnolo et de Dear, 2003). Givoni et al., (2003) affirment aussi que la qualité et l'intensité des activités sont influencées par le niveau de l'inconfort causé par les conditions climatiques. La recherche sur le confort thermique dans les zones chaudes et arides dans le monde reste encore limitée (Cohen et al., 2019).

Les espaces extérieurs sont sujets à des variations climatiques incontrôlables ce qui rend difficile la mesure et l'évaluation de ses grandeurs. Les espaces intérieurs en revanche présentent des conditions climatiques plus faciles à contrôler et mesurer, ce qui explique que les études de confort thermique à l'intérieur des bâtiments soient plus nombreuses comparées à celles ayant pour objet l'espace extérieur.

En milieu urbain la « plage de confort des espaces extérieurs » est plus large que celle de l'intérieur des bâtiments ; elle va de l'état de confort à l'état de l'inconfort extrême (Spagnolo et de Dear, 2003). Les espaces publics extérieurs présentent ainsi des conditions de grande variabilité temporelle et spatiale.

Une revue détaillée de la littérature du confort thermique est présentée dans (Grosdemouge, 2020 ; Lai et al., 2020 ; Yasmeeen et Liu, 2019 ; Coccolo et al., 2016 ; Tahbaz, 2011 ; Auliciems et Szokolay, 2007 ; Epstein et Moran, 2006 ; Vinet, 2000).

### 2.9.3. La sensation thermique

La sensation thermique est une notion subjective et relève de l'aspect psychologique d'une ambiance thermique (Aljawabra et Nikolopoulou, 2010). Chaque individu a ses propres sensations vis-à-vis d'une ambiance thermique bien précise. Si les réponses physiologiques peuvent être quantifiées de manière objective, les facteurs subjectifs obéissent à des mécanismes sensoriels. Parmi les paramètres psychologiques on peut citer : l'adaptation et l'acclimatation, les préférences personnelles, l'acceptabilité, l'accoutumance, l'attente (expectation) (Tahbaz, 2011).

### 2.9.4. Les paramètres du confort thermique

Les facteurs du confort thermique sont généralement scindés en deux grandes catégories : les paramètres relatifs à l'environnement (d'ambiance) et les paramètres relatifs à l'individu (figure 2.09).

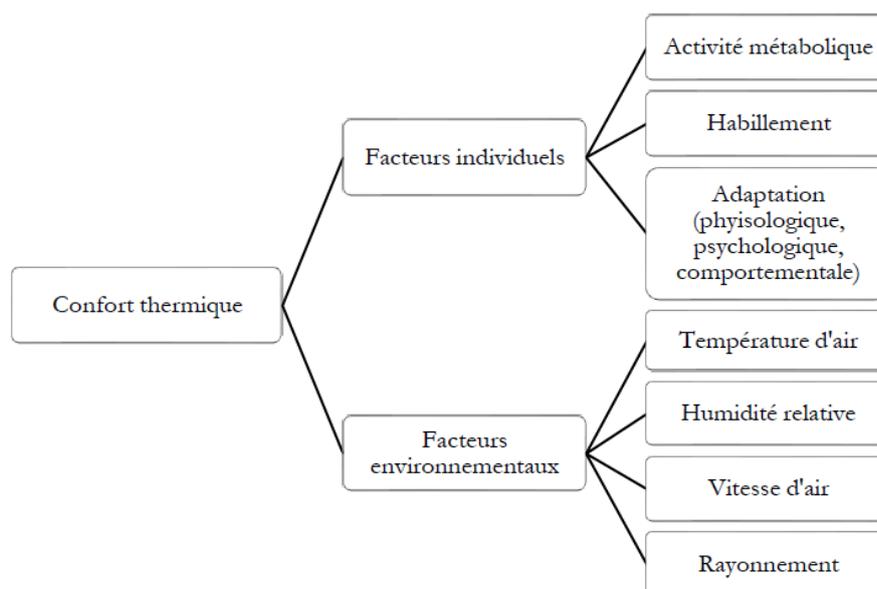


Figure 2.09 : Facteurs influençant le confort thermique des individus. (Source : Grosdemouge, 2020)

#### 2.9.4.1. Paramètres relatifs à l'environnement

Les principaux paramètres relatifs à l'environnement (figure 2.10) sont : la température de l'air, la température radiante moyenne (températures des parois : mur, sol, etc.), la vitesse de l'air, l'humidité relative et le rayonnement (courte et grande longueur d'onde ; direct, diffus ou réfléchi). Ces grandeurs microclimatiques sont relevées aussi dans la mesure de l'ICU (Lai et al., 2020).

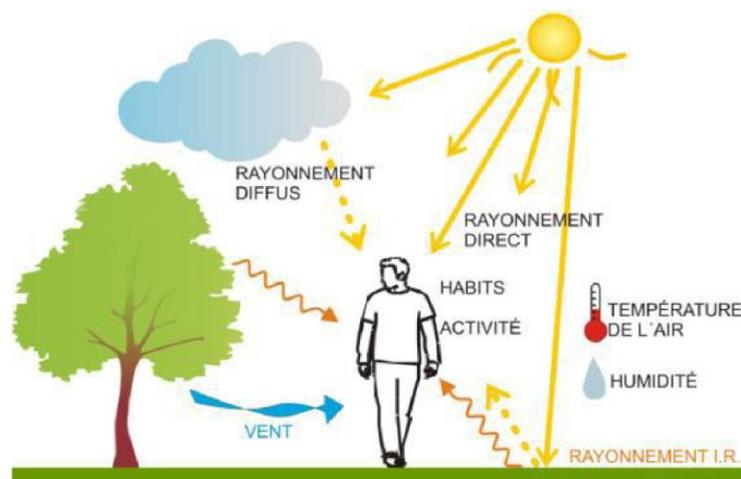


Figure 2.10 : Paramètres déterminant le confort thermique. (Source : Perrineau, 2013, cité dans Benamouma, 2018)

### **2.9.4.2. Paramètres relatifs à l'individu**

Les principaux paramètres relatifs à l'individu (figure 2.10) sont : le niveau d'activité métabolique, l'habillement (l'isolation thermique des vêtements) ainsi que les mécanismes de thermorégulation tels que la sudation et la respiration et l'adaptation comportementale (Grosdemouge, 2020 ; Lai et al., 2020 ; Vinet, 2000).

### **2.9.4.3. Les mécanismes de thermorégulation**

L'homme est homéotherme. La température interne du corps doit toujours approcher les 37 °C (Vinet, 2000 ; Candas, 1998). Les échanges du corps humain avec l'environnement thermique s'effectuent via la peau par thermorégulation, c'est-à-dire l'ensemble des mécanismes conscients (thermorégulation physiologique) et inconscients (thermorégulation comportementale) permettant de réguler la température du corps humain (Grosdemouge, 2020). La thermorégulation physiologique correspond aux effets physiques modifiant les échanges entre le corps humain et son environnement : frissons, transpiration ou vasodilatation.

### **2.9.4.4. Le métabolisme**

Le corps humain est considéré comme un système qui produit de la chaleur en fonction de son activité. Dans la littérature, il existe des tableaux qui fournissent les valeurs caractéristiques de l'activité métabolique des individus, mesurées par une unité appelée « met » (Moujalled, 2007 ; Vinet, 2000).

### 2.9.4.5. L'habillement

L'habillement joue un rôle important dans le confort thermique. C'est une sorte d'isolation qui limite les transferts de chaleur entre le corps et son environnement. Les vêtements constituent une deuxième barrière thermique après la peau. L'habillement est caractérisé par une valeur correspondant à la résistance thermique du vêtement. Il est exprimé par une unité appelée « Clo » dont :  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$  (Vinet, 2000 ; Depecker et al. 1989).

Il apparaît que les paramètres d'ambiance sont les variables sur lesquels peuvent agir les urbanistes et les architectes, car les paramètres relatifs à l'individu sont des variables personnelles et dépendent de l'utilisateur.

### 2.9.5. Les échanges thermiques

La chaleur produite dans le corps humain par métabolisme s'échange avec son ambiance à travers son enveloppe (la peau) par convection, conduction, évaporation ou rayonnement (figure 2.11) (Vinet, 2000). En fait, le transfert par respiration est une association d'échanges par convection et par évaporation (Grignon-Massé, 2010) ; mais le mécanisme de transfert par conduction est généralement faible car les surfaces d'échanges sont minimales (Musy, 2008).

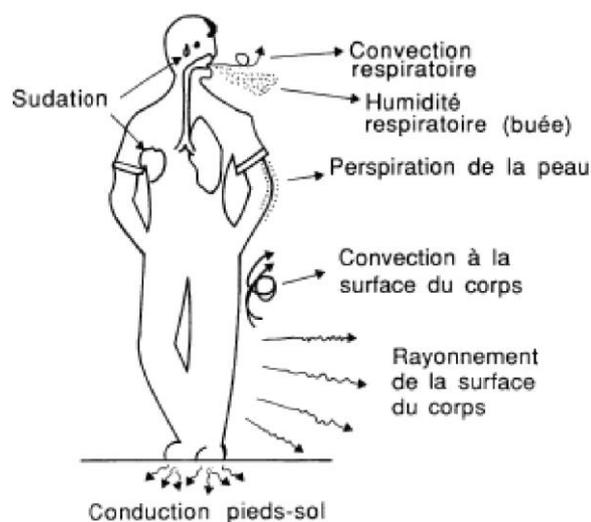


Figure 2.11 : Les différents types d'échanges thermiques entre le corps et son ambiance. (Source : Depecker et al., 1989).

#### 2.9.5.1. Les échanges radiatifs

On peut distinguer deux types de rayonnement entre le corps avec son environnement : le rayonnement de courte longueur d'onde (le rayonnement solaire) et le

rayonnement de grande longueur d'onde (le rayonnement infrarouge provenant des parois et des objets) (Vinet, 2000). La tenue vestimentaire influe sur l'effet du rayonnement sur le corps.

### **2.9.5.2. Les échanges convectifs**

Les échanges convectifs sont dus à la différence de température entre la surface de l'organisme (la peau ou les vêtements) et l'air ambiant. Ils dépendent de la vitesse de l'air et de la tenue vestimentaire. Quand la vitesse de l'air est très faible ou nulle la convection est dite naturelle ou libre et quand la vitesse de l'air augmente la convection est dite forcée (Gherraz, 2021). Plus la vitesse de l'air est importante, plus les échanges thermiques sont élevés.

### **2.9.5.3. Les échanges conductifs**

Les échanges conductifs se produisent quand l'individu se trouve en contact direct avec un solide (paroi verticale ou horizontale, le mobilier, etc.) (Grignon-Massé, 2010). En été, par exemple, la surface lisse du carrelage dans la maison apporte une sensation de fraîcheur pour un sujet allongé sur le sol ou marchant à pieds nus. Le même effet se produit sur le sable fin au désert, durant la nuit, puisque le sable perd rapidement sa chaleur contrairement à la roche.

### **2.9.5.4. Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau**

L'évaporation à partir de la peau puise de l'énergie dans le corps pour évaporer l'eau. Ce dernier est donc rafraîchi. C'est le mécanisme de régulation le plus efficace pour évacuer la chaleur et rafraîchir le corps humain.

Les pertes par diffusion sont un autre mécanisme de régulation qui se base sur l'évaporation de l'eau. Appelée aussi les pertes par perspiration, elles sont dues à la perte d'humidité du corps humain à travers la porosité de la peau. Elles constituent le meilleur indice physiologique de stress thermique (Vinet, 2000). Elles dépendent de la température de la peau et de l'humidité de l'air ambiant.

### **2.9.5.5. Pertes par respiration**

Le processus de la respiration entraîne une perte de chaleur sensible par convection et une perte de chaleur latente par évaporation. L'air expiré est saturé d'humidité en comparaison à l'air inhalé. Ces pertes sont dues donc aux écarts de température et d'humidité entre l'air soufflé et l'air ambiant (Gherraz, 2021 ; Moujalled, 2007).

### **2.9.5.6. Pertes thermiques par sudation**

La sudation est un mécanisme de refroidissement important pour le corps humain qui se base sur l'évaporation de l'eau à partir de la peau. Elle est liée au type d'activité physique de l'individu (niveau du métabolisme) et à la température de l'air ambiant (Gherraz, 2021). L'augmentation de la vitesse de l'air accélère l'évaporation à la surface de la peau. Cependant, la sudation n'est plus efficace si l'air ambiant est saturé en humidité. Au désert, la sudation est vitale pour le rafraîchissement du corps humain. Car les zones chaudes et arides se caractérisent par une humidité de l'air très faible contrairement aux zones équatoriales ou côtières par exemple.

### **2.9.6. Bilan thermique entre l'homme et son environnement**

L'être humain vit dans des ambiances climatiques variables ; pour qu'il puisse entretenir ses fonctions vitales, exercer ses activités, il consomme de l'énergie et produit de la chaleur qu'il doit évacuer. Les échanges thermiques que nous venons de citer ont pour but de maintenir l'équilibre thermique du corps humain avec son environnement pour assurer le bien-être et le confort (Moujalled, 2007). En d'autres termes, le corps doit conserver un équilibre entre les gains et les pertes de chaleur. Selon le principe de la conservation d'énergie, le bilan thermique (Emmanuel et al., 2016 ; Grosdemouge, 2020) s'écrit de la façon suivante :

$$Q_{net} = Q_M - W = Q_{sk} + Q_{res} + Q_{stock} = (C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + Q_{stock}^* \quad (2.3)$$

- Où :
- Q<sub>net</sub> : flux de chaleur nette du corps humain,
  - Q<sub>M</sub> : flux de chaleur métabolique,
  - W : travail utile,
  - Q<sub>sk</sub> : chaleur dégagée par la peau,
  - Q<sub>res</sub> : chaleur dégagée par respiration,
  - Q<sub>stock</sub> : chaleur stockée,
  - C<sub>sk</sub> : pertes (gains) thermiques de la peau par convection,
  - R<sub>sk</sub> : pertes (gains) thermiques de la peau par rayonnement,
  - E<sub>sk</sub> : pertes de chaleur par évaporation à partir de la peau,
  - C<sub>res</sub> : pertes de chaleur par convection par respiration,
  - E<sub>res</sub> : pertes de chaleur par évaporation par respiration,
  - Q<sub>stock</sub>\* : chaleur stockée dans la peau.

Le bilan doit être égal à zéro pour se trouver dans la zone de neutralité thermique.

### **2.9.7. Les indices d'évaluation du confort thermique en espace extérieur**

L'évaluation du confort ou du stress thermique est effectuée à l'aide d'indices calculés à partir des données recueillies dans les espaces urbains. Les facteurs qui définissent l'environnement thermique urbain sont plus complexes à prendre en compte dans les espaces intérieurs. Il existe plusieurs méthodes quantitatives pour évaluer le confort thermique extérieur (Reiter, 2007). Lai et al. (2020) ont établi une revue récente d'études sur le confort thermique dans les espaces extérieurs. Ils ont classé les indices en deux groupes de modèles : les modèles basés sur le mécanisme de thermorégulation (bilan énergétique du corps humain) et les modèles empiriques.

Coccolo et al., (2016) ont aussi proposé une revue exhaustive et un inventaire des indices de confort thermique employés en milieu urbain, et ils ont présenté les équations physiques pour chaque indice et classé ces indices en trois catégories :

- **Indices thermiques** : basées sur la résolution de l'équation du bilan thermique.

Tels que: Universal Effective Temperature (ETU), Predicted Mean Vote (PMV), Physiologically Equivalent Temperature (PET), COMFAModel, Outdoor Effective Temperature (OUT\_SET\*), Index of Thermal Stress (ITS), Perceived Temperature (PT), MENEX model, Universal Thermal Climate Index (UTCI), etc.

- **Indices empiriques** : basées sur des régressions linéaires avec des mesures *in-situ* et des questionnaires : Thermal Sensation Vote (TSV), Actual Sensation Vote (ASV), Thermal Sensation (TS), etc.

- **Indices basés sur des équations linéaires** : basées sur des relations entre les paramètres microclimatiques de l'environnement thermique tels que : Discomfort Index (DI), Apparent Temperature (AT), Relative strain index (RSI), Temperature-Humidity Index (THI), Wet Bulb Globe Temperature Index (WBGT), Heat Index (HI), Environmental Stress Index (ESI), Effective Temperature (ET), Physiological Strain Index (PSI), Humidex (H), Wind Chill Index (WCI), Cooling power index (PE), etc.

Les indices de la troisième catégorie (Indices basés sur des équations linéaires) ont la caractéristique d'être simples et permettent d'évaluer le confort thermique en utilisant des données aisément accessibles par les architectes et les urbanistes. Ils sont souvent appliqués dans les zones chaudes et arides. Ils correspondent en général à des combinaisons de variables climatiques mesurées sur site. Dans ce qui suit une présentation

de quelques-uns de ces indices parmi les plus utilisés (Spangler et al., 2022 ; Yasmeen et Liu, 2019) :

### **2.9.7.1. Effective Temperature (ET)**

C'est un indice qui a été développé par Houghton et Yaglou (1923). ET est une équation linéaire combinant la température d'air ( $T_a$ ), la vitesse d'air ( $V$ ) et l'humidité relative (HR). Cet indice est établi à partir d'abaques estimés expérimentalement et est basé sur des impressions thermiques instantanées. L'indice de ET est défini par la formule suivante (Auliciems et Szokolay, 2007) :

$$ET = DBT - 0.4 * (DBT - 10) * [1 - (RH/100)] \quad (2.4)$$

Avec :

DBT : la température de l'air (°C) (dry bulb temperature),

RH : l'humidité relative (%).

Une version améliorée de ET est le New effective temperature (ET\*), utilisée par ASHRAE (Yingbai et al., 2005).

### **2.9.7.2. Temperature-Humidity Index (THI)**

Le Temperature-Humidity Index (THI) ou l'indice thermohygométrique est une version améliorée de Discomfort Index (DI) ; un indice de confort thermique développé par (Thom, 1959). DI qui est une dérivée de l'indice de température effective (ET) (Yasmeen et Liu, 2019 ; Ruiz et Correa, 2015b ; Dalman et al., 2013). THI est largement utilisé pour évaluer le stress thermique dans les régions chaudes et arides (Dasari et al., 2021 ; Ghani et al., 2017 ; Ruiz et Correa, 2015b ; Heidari et al., 2014 ; Abdel-Ghany et al., 2013). THI est calculé par la formule suivante (Ghani et al., 2021) :

$$THI = T - (0,55 - 0,0055 HR) * (T - 14,5) \quad (2.5)$$

Avec :

T : la température d'air (°C),

HR : l'humidité relative de l'air (%).

L'échelle de confort de THI est donnée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Classes de l'indice thermohygométrique THI. Source : Ghani et al. (2017).

Classe de THI	Température (°C)
Hyperglacial	≤ -40
Glacial	- 39.9 à - 20
Extrêmement froid	- 19.9 à - 10
Très froid	- 9.9 à - 1.8
Froid	- 1.7 à +12.9
Frais	+13 à +14.9
Confortable	+15 à +19.9
Chaud	+20 à +26.4
Très chaud	+26.5 à +29.9
Torride	> +30

### 2.9.7.3. Heat Index (HI)

Heat Index (HI) est parmi les indices destinés aux climats chauds (Chea et al., 2021 ; Al-Bouwarthan et al., 2019 ; Taleghani et al., 2015). Il est utilisé par le National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) aux Etats-Unis. Le Heat Index (HI) nous renseigne sur l'inconfort dû à une température et à une humidité élevée (Petitti et al., 2016). Le Heat Index (HI) combine la température de l'air et l'humidité relative, et il est calculé par l'équation suivante (Grosdemouge, 2020) :

$$HI = -8,784695 + 1,61139411 \times Ta + 2,338549 \times HR - 0,14611605 \times Ta \times HR - 1,2308094 \times 10^{-2} \times Ta^2 - 1,6424828 \times 10^{-2} \times HR^2 + 2,211732 \times 10^{-3} \times Ta^2 \times HR + 7,2546 \times 10^{-4} \times Ta \times HR^2 - 3,582 \times 10^{-6} \times Ta^2 \times HR^2 \quad (2.6)$$

Où : Ta : la température de l'air (°C),  
HR : l'humidité relative (%).

L'échelle de valeurs de HI est donnée dans le tableau 2.2. HI n'est applicable que pour des températures supérieures à 20°. C'est le Wind Chill Index (WCI) qui est utilisé pour les situations de froid (Mohan et al., 2014).

Tableau 2.2 : Échelle de valeurs de l'indice HI. Source : Emmanuel et al., (2016) cité dans Grosdemouge (2020).

<b>Heat Index (°C)</b>	<b>Catégorie</b>
27 - 32	Inconfort
32 - 41	Extrême inconfort
41 - 54	Danger
≥ 54	Danger extrême

### 2.9.7.4. Humidex (H)

L'indice humidex (H) a été élaboré par des météorologues canadiens en 1965 (Ghani et al., 2017 ; Tahbaz, 2011). Contrairement à HI, l'humidex utilise la mesure de la pression de la vapeur d'eau (point de rosée) au lieu de l'humidité relative (Grosdemouge, 2020). L'indice Humidex est souvent employé pour évaluer le stress thermique que vivent les travailleurs à l'extérieur (Al-Bouwarthan et al., 2019). Humidex (H) est calculé par la formule suivante (Tahbaz, 2011):

$$H = Ta + (5 / 9) (pvs - 10) \quad (2.7)$$

$$pvs = 6,112 \times (7,5 Ta / 10^{237,7 + Ta}) \times HR / 100 \quad (2.8)$$

Avec :

Ta : la température de l'air (°C)

HR : l'humidité relative (%).

Pvs : la pression en vapeur d'eau saturante (hPa).

L'échelle de valeurs de l'indice Humidex est donnée dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Échelle de référence pour l'indice Humidex. Source : Grosdemouge (2020).

<b>Humidex</b>	<b>Niveau d'inconfort thermique</b>
20 - 29	Aucun inconfort
30 - 39	Un certain inconfort
40 - 45	Beaucoup d'inconfort
> 45	Danger
> 54	Coup de chaleur imminent

### 2.9.7.5. Wet Bulb Globe Temperature Index (WBGT)

WBGT est l'un des indices les plus utilisés notamment dans le domaine de la santé des travailleurs (Al-Bouwarthan et al., 2019). C'est un indice empirique de stress thermique combinant les mesures de la température de bulbe humide, la température de globe noir exposé au soleil, la température d'air et la température de l'air sous abri (Auliciems et Szokolay, 2007 ; Epstein et Moran, 2006). Il est utilisé en milieu intérieur

comme en extérieur (Ghani et al., 2017). Le globe noir permet indirectement de prendre en compte l'effet du rayonnement. En extérieur le WBGT est calculé par l'équation suivante (Ghani et al.,2017) :

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

À l'intérieur le WBGT est calculé par l'équation :

$$WBGT = 0.7T_w + 0.3T_g \quad (2.10)$$

Où :

$T_w$  : Température de bulbe humide (°C),

$T_g$  : Température de globe noir exposé au soleil (°C),

$T_a$  : Température de l'air sous abri (en °C).

L'échelle limites de l'indice WBGT est donnée au tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Echelle limites de l'indice WBGT. Source : Grosdemouge (2020).

Activité (métabolisme, M en W)	WBGT (en °C)	
	Acclimatation	Pas d'acclimatation
Repos, assis (M < 117)	33	32
Debout, marche lente (117 – 234)	30	29
Marche normale (234 – 360)	28	26
Marche rapide, travail peu intense (360 – 468)	26	23
Travail intense (M > 468)	25	20

### 2.9.7.6. Thermal comfort Index for cities of Arid Zones (IZA)

Ruiz et Correa (2015a) ont proposé un indice spécifique pour les zones arides IZA (pour son acronyme en espagnol) d'après une étude sur la ville de Mendoza en Argentine. Cet indice a été développé à partir de la combinaison de l'indice ASV (Actual Sensation Vote) et des données des paramètres microclimatiques communément utilisés (Température de l'air, humidité relative de l'air et vitesse de l'air).

$$IZA = - 0.9796 + 0.0621 * T_a - 0.3257 * V + 0.0079 * HR \quad (2.11)$$

Où:

$T_a$ : température de l'air (°C).

$V$ : vitesse de l'air (m/s).

$HR$ : humidité relative de l'air (%).

L'échelle de valeurs de l'indice IZA est donnée dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : échelle de valeur de l'indice IZA. Source : Ruiz et Correa (2015a).

Valeurs de IZA	Perception
>1.5	Très chaud
0.5 to 1.5	Chaud
de -0.5 à 0.5	Neutre
de -0.5 à -1.5	Frais
< -1.5	Froid

## 2.10. Conclusion

L'étude de l'îlot de chaleur urbain de l'air et celle de l'îlot de chaleur de surface sont nécessaires pour bien appréhender la problématique de la surchauffe urbaine en période estivale. L'étude de l'ambiance thermique va de pair avec l'étude l'ICU. Le confort thermique extérieur est un élément essentiel pour le bien-être et la santé des individus. Dans la présente recherche la perception de l'ambiance thermique n'a pas pu être étudiée. La distribution des questionnaires lors de la campagne *in-situ* n'a pas été effectuée faute d'une autorisation administrative car la zone d'étude connaissait des problèmes de sécurité (événements de Ghardaïa 2014/2015).

## **CHAPITRE III**

### **MESURE DES ILOTS DE CHALEUR**

## **3. MESURE DES ILOTS DE CHALEUR URBAINS**

### **3.1. Introduction**

Dans ce chapitre les différentes échelles d'ICU seront exposées. Chaque type d'ICU a sa propre méthode d'observation. La mesure de l'îlot de chaleur de surface est réalisée en général à travers des images infrarouges obtenues par une caméra thermique. La télédétection spatiale par satellite est la plus efficace et la plus répandue dans les études d'ICU de surface. Elle fera l'objet de la troisième section dans ce chapitre. Un rappel des bases physiques de la télédétection et le processus de traitement des images satellitaires sera présenté.

### **3.2. Les différentes échelles d'étude des îlots de chaleur urbains**

L'ICU peut être observé à différentes échelles. Plusieurs méthodes de mesure ont été mise en place pour étudier ce phénomène microclimatique depuis des décennies (Arnfield, 2003). Ces méthodes ont permis de distinguer principalement trois types d'îlots de chaleur urbains qui correspondent chacun à une échelle verticale particulière (Oke et al., 2017) (figure 2.8).

#### **3.2.1. L'îlot de chaleur urbain dans la canopée**

Le premier type est celui d'îlot de chaleur dans la canopée urbaine (figure 1.1 et 1.2). Il fait référence à la différence de température entre l'air ambiant situé dans cette couche et celui dans la campagne environnante. Pour les urbanistes et les architectes, cette couche est la plus intéressante, car c'est l'espace où se déroule l'essentiel de l'activité humaine en ville (Perreault, 2014). Il était le premier type d'ICU identifié historiquement, et c'est le type d'ICU le plus étudié par les climatologues avant le développement de la télédétection (Oke, 1988).

#### **3.2.2. L'îlot de chaleur dans la couche limite**

Le second type est celui d'îlot de chaleur dans la couche limite urbaine (figure 1.1 et 1.2). Cette deuxième couche se situe directement au-dessus de la couche de la canopée urbaine à la frontière atmosphérique de l'agglomération (Leconte, 2014). Ce type d'ICU fait référence à la température de la masse d'air présente au-dessus de la canopée urbaine. Par temps calme, l'ICU de CLU prend la forme d'un dôme d'air chaud coiffant la ville. En cas de vent fort, il prend la forme d'un panache urbain ou plume urbaine (figure 1.2).

#### **3.2.3. L'îlot de chaleur urbain de surface**

Le troisième type d'ICU est celui d'îlot de chaleur de surface dans la couche de surface (figure 3.1). Il fait référence à la différence de températures de surface entre la ville et ses alentours. Les surfaces peuvent être soit naturelles (végétation, eau, sol nu, etc.) ou artificielles (toits des bâtiments, revêtements de sol, pavage de pierre, routes goudronnées, parois métalliques, serres, etc.). Les différences entre les matériaux urbains et ruraux déterminent la variation et l'intensité de l'ICU de surface (Filiatreault, 2015).

De nos jours, la télédétection par satellite a facilité la caractérisation de l'ICU de surface sur de grands territoires englobant toute l'aire de la ville et sa campagne par l'étude de la température de surface de la terre (LST Land Surface Temperature).

Les deux premiers types d'ICU, celui de la canopée urbaine (CU) ou de la couche limite urbaine (CLU) sont donc des ICUs atmosphériques tandis que le troisième est un ICU surfacique. Dans le cadre de ce travail, deux types d'ICU seront considérés à savoir l'ICU de la canopée urbaine et l'ICU de surface.

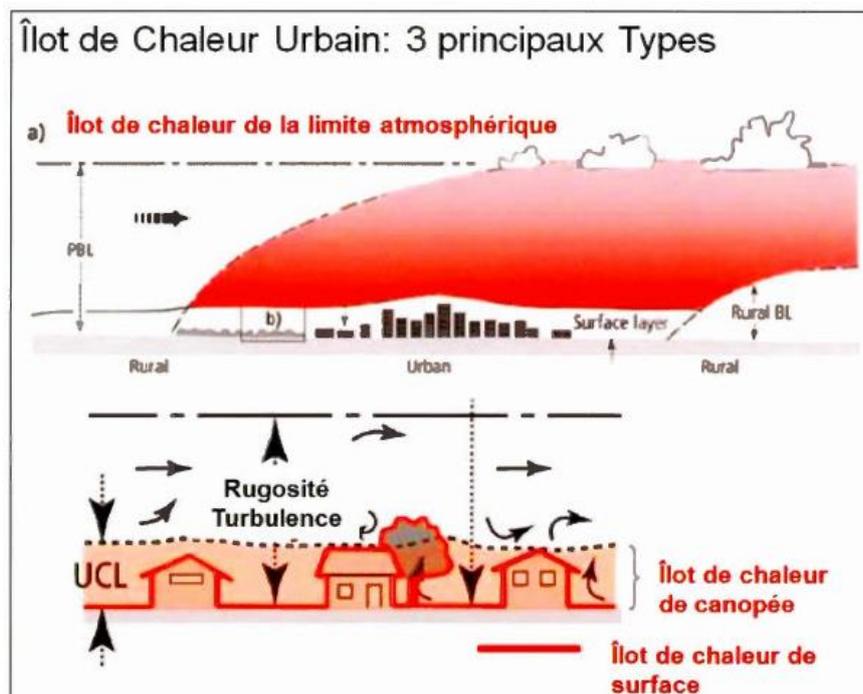


Figure 3.1 : Schématisation des trois types d'îlots de chaleur urbains. Tiré de Carpentier, 2012 (adapté de Oke, 1997).

### 3.3. Mesures de l'îlot de chaleur (Méthodes d'observation)

#### 3.3.1. Mesure du phénomène

Les méthodes de mesure de l'intensité et la répartition de l'ICU varient en fonction de l'échelle d'étude considérée (Gartland, 2008) (voir la section sur les types d'ICUs).

Il existe des mesures directes et des mesures indirectes. Dans la mesure directe les paramètres recherchés (tels que la température de la surface ou de l'air, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, etc.) sont relevés à l'aide de capteurs météorologiques (stations fixes ou instruments mobiles).

Dans la mesure indirecte le paramètre recherché (généralement la température de la surface) est obtenu par capteur à distance comme c'est le cas de la télédétection spatiale et aérienne ou par des caméras infrarouges portatives (Filiatreault, 2015).

### **3.3.2. Mesures de l'îlot de chaleur de la couche limite urbaine**

L'observation de l'ICU aussi s'effectue au niveau de la couche limite urbaine. La collecte des données climatiques à cette altitude sont faites via des stations météorologiques placées sur les toits des gratte-ciels ou par des ballons-sondes (Voogt, 2007). Cette couche présente moins de rugosité et d'hétérogénéité que la couche de canopée.

### **3.3.3. Mesures de l'îlot de chaleur dans la canopée**

La mesure de ce type d'ICU s'effectue au niveau de la canopée, entre la surface du sol et les toitures des bâtiments, ou la cime des arbres. La couche de la canopée se caractérise par une très grande hétérogénéité spatiale. Les mesures sont réalisées souvent à l'intérieur des canyons urbains, dans les jardins ou dans les places publiques. Les stations météorologiques sont en général placées à environ 1,5 m du sol (Amorim et Dubreuil, 2017 ; Hendel et al., 2016 ; Heisler et Brazel, 2010). Ce niveau correspond à la hauteur de respiration moyenne d'un humain. Les stations doivent être bien réparties dans la ville et sa périphérie afin d'établir la comparaison des paramètres microclimatiques (Voogt, 2007).

La caractérisation de l'ICU à l'échelle de la canopée est la plus appliquée car elle reflète directement les températures ambiantes ressenties par les citoyens. C'est la couche dans laquelle la majorité des activités humaines se déroulent.

Dans les opérations de prise de mesure *in-situ* on peut distinguer deux méthodes : les mesures fixes et les mesures mobiles ou itinérantes. Les mesures fixes ont recours à des stations météorologiques placées au sein de la ville et dans son environnement rural, dans des points fixes, accrochés sur le mur ou sur un mât (Bernard et al., 2017 ; Petralli et al., 2014). Les campagnes de mesures mobiles sont effectuées sur des parcours ou transects urbains faits à pied, en vélo ou en voiture (Neves Silva et al., 2021 ; Kousis et al., 2021 ; José da Silva et al., 2018 ; Leconte et al., 2015).

L'îlot de chaleur dans la canopée peut aussi être étudié par la mesure du bilan énergétique urbain. Les flux radiatifs et énergétiques peuvent être mesurés conjointement avec les grandeurs physiques classiques (la température d'air, l'humidité, les vitesses et direction de l'air) (Grimmond et al., 2010).

Dans le cadre de cette étude, la première partie du travail consiste en une campagne de mesure *in-situ* via une traversée automobile le long d'un trajet urbain.

### **3.3.4. Mesures de l'îlot de chaleur de surface**

On peut observer et mesurer, sans contact, la variation de la température de surface à l'aide d'instruments embarqués sur des satellites, des avions ou même au niveau du sol. La télédétection spatiale ou aéroportée permet la spatialisation des températures de surface et offre une meilleure analyse de l'îlot de chaleur de surface (Girard et Girard, 2010). Néanmoins, les parties « cachées », telles que les surfaces situées sous la canopée des arbres, ne sont pas représentées.

Les capteurs mesurent le rayonnement infrarouge émis et reflété par la surface urbaine (sol, toiture, mur, voirie, végétation, etc.). L'analyse des images thermiques permet l'identification des différences de température de surface entre la ville et sa campagne avoisinante et des variations entre les différents secteurs de la ville. Avec cette méthode d'observation, l'intensité de l'ICU de surface est plus importante en comparaison avec l'intensité de l'ICU atmosphérique. Puisque les variations des températures de surface sont supérieures à celles de l'air (Thenkabail, 2016).

Dans le cadre de cette recherche, l'étude de l'ICU de surface est réalisée par une image thermique satellitaire. La méthode d'observation par télédétection sera abordée plus en détail dans le chapitre 3.

### **3.3.5. Mesures du confort thermique extérieur (indice de confort et choix de l'indice)**

Les variables météorologiques mesurées dans l'étude de l'ICU de la canopée ou de surface (la température de la surface et de l'air, l'humidité de l'air, la vitesse et la direction du vent, etc.) permettent le calcul du niveau du confort thermique dans les espaces extérieurs. Plusieurs indices sont mis en place par les chercheurs pour estimer le confort ou le stress thermique ressenti par les habitants (Aghamolaei, 2022 ; Lai et al., 2020 ; Matzarakis et al., 2016). Le confort thermique extérieur a été abordé en détail dans le chapitre 2.

### 3.4. La télédétection comme moyen pour l'analyse des ICUs

La télédétection est devenue un moyen incontournable dans la mesure de l'ICU de surface. Le présent chapitre présente les bases physiques de la télédétection spatiale. L'analyse et la mesure du rayonnement électromagnétique par les capteurs permet la cartographie de l'occupation du sol et le calcul de la température de surface (Land Surface Temperature LST).

#### 3.4.1. Généralités sur la télédétection

##### 3.4.1.1. Bref historique sur la télédétection

L'histoire de la télédétection remonte à plus de 150 ans. Dans les années 1860s une simple caméra a été montée à bord d'un ballon. Durant la première et la deuxième guerre mondiale, la photographie aérienne a connu un grand développement dans le domaine de la cartographie et de la reconnaissance militaire au sol suite aux progrès de l'aviation et des caméras. Les années 1960s marquent le début de la télédétection actuelle avec l'exploration de l'espace par le lancement des premiers satellites. Landsat 1 fut le premier satellite de télédétection des ressources terrestres lancé en 1972.

Depuis, l'amélioration des capteurs et des méthodes de traitement des images n'a pas cessé jusqu'à nos jours. Les scientifiques disposent aujourd'hui d'un large éventail de sources de données. Citant entre autres : Landsat, Sentinel, SPOT, NOAA, RADARSAT, ASTER, IKONOS, et WorldView (Kergomard, 2016 ; Girard et Girard, 2010 ; Desjardins et al., 2000).

##### 3.4.1.2. Définition de la télédétection

De nos jours, la télédétection est omniprésente dans plusieurs domaines de recherche. Elle est très utilisée dans la météorologie et l'étude du climat, dans la géographie et l'urbanisme ou dans la géologie et l'hydrologie entre autres.

La télédétection (en anglais « remote sensing ») est définie comme étant « *la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.* » (Centre canadien de télédétection) (CCT, 2019). Bonn et Rochon (1992) la définissent comme étant : une « *Discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la*

*gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes ».*

Les applications dans le domaine scientifique sont légion (Girard et Girard, 2010). Ainsi, la télédétection se révèle être un outil précieux pour la cartographie de l'occupation du sol et l'étude de l'îlot de chaleur urbain. Les données de télédétection sont souvent introduites et exploitées dans les systèmes d'informations géographiques SIG. Ces données sont souvent sous forme d'images.

### 3.4.1.3. L'image satellitaire : source d'information sur la nature d'une surface et sa température

L'image satellite est une image matricielle prise par un capteur embarqué sur un satellite. Cette image représente une partie de la surface de la terre. Les capteurs actuels fournissent des images numériques qui présentent des valeurs de réflectance permettant la cartographie des surfaces ou la mesure de la température par exemple (Girard et Girard, 2010 ; Desjardins et al., 2000 ; Robin, 1995). Les images satellitaires sont ainsi composées de pixels (figure 3.2). La valeur du pixel varie entre 0 et 255. Chaque pixel représente la valeur de la réflectance mesurée par le capteur du satellite. La valeur du pixel indique la portion du rayonnement réfléchi par la surface observée. L'image satellitaire est caractérisée par sa taille, la taille du pixel (la résolution spatiale) sa sensibilité à l'intensité du rayonnement (la résolution radiométrique) et le nombre de bandes (la résolution spectrale).

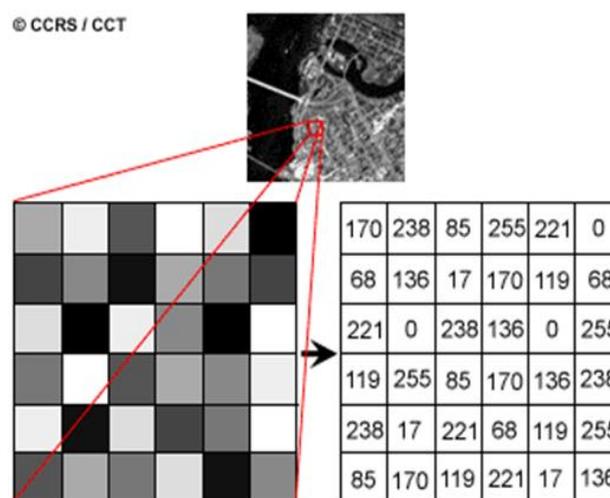


Figure 3.2 : l'image satellite. (Source : CCT, 2019)

### 3.4.2. Principe et processus de télédétection

La télédétection analyse les propriétés du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis d'une cible (ex : surface de la terre) pour en extraire des informations. Un système de télédétection est composé d'une source d'énergie, d'une cible, d'un capteur et d'un vecteur (Girard et Girard, 2010 ; Desjardins et al., 2000 ; Robin, 1995). La source d'énergie peut être soit le soleil, soit c'est le capteur qui émet ses propres rayonnements. La cible reçoit cette énergie. Une partie est absorbée par la cible ; une partie est transmise à travers la surface et une partie est réfléchi. Le capteur peut donc mesurer l'énergie réfléchi ou émise par la cible. Le capteur peut être soit passif soit actif. Il est passif quand il ne fait que de recevoir le rayonnement émis ou réfléchi par la surface (caméra, radiomètre, etc.). Il est considéré comme actif quand il génère sa propre énergie en direction de la cible puis enregistre le rayonnement réfléchi par celle-ci (radar, LiDAR, etc.). Le vecteur est une plate-forme qui porte le capteur. Les capteurs sont généralement embarqués sur vecteurs aéroportés (drone, avion) ou vecteurs spatiaux (satellites).

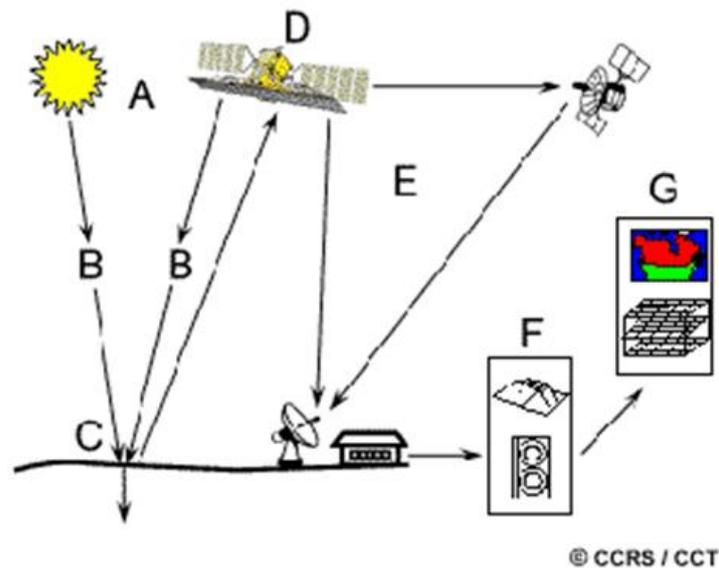


Figure 3.3 : Processus de télédétection. (Source : CCT, 2019).

Dans le processus de télédétection, le rayonnement électromagnétique est le porteur de l'information. On peut résumer ce processus dans les étapes suivantes (figure 3.3) :

- La source d'énergie (A) peut être soit le soleil, soit l'énergie émise par la surface terrestre soit l'énergie émise par le capteur. La source illumine la cible par un rayonnement électromagnétique.

- Le rayonnement traverse l'atmosphère (B) et subit une diffusion ou une absorption le long de son trajet de la source lumineuse vers la terre, puis de la surface terrestre vers le capteur.
- Quand le rayonnement arrive à la cible (C), il interagit avec la surface de terre. Il est soit absorbé, transmis, ou réfléchi.
- L'énergie reçue est enregistrée par le capteur (D).
- Le signal mesuré par le capteur est transmis (E) à un centre de réception où les mesures sont transformées en images.
- Une interprétation (F) visuelle et/ou numérique est effectuée sur l'image obtenue. Cette dernière est analysée pour extraire l'information recherchée.
- Enfin, (G) l'image traitée est exploitée afin de cartographier et caractériser la surface étudiée. (Soudani, 2005 ; CCT, 2019 ; Envcal, 2008).

### **3.4.3. Applications de la télédétection**

Les domaines d'application de la télédétection sont extrêmement variés (Girard et Girard, 2010 ; Desjardins et al., 2000 ; Robin, 1995) :

- Elle est utilisée dans le suivi de la végétation sur les continents,
- Dans le domaine de la prévision météorologique et de la climatologie,
- La gestion des terres agricoles,
- La surveillance des catastrophes naturelles et la gestion des risques majeurs.
- L'élaboration des cartes géographiques et des plans d'urbanisme,
- Le domaine de la géologie et de l'exploitation minière,
- Le domaine militaire et stratégique,
- Le domaine de l'archéologie, etc.

Les applications de la télédétection sont en croissance constante grâce au développement du traitement de l'imagerie satellitaire numérique et la baisse du coût des outils informatiques.

Dans le cadre de cette recherche, la télédétection offre un grand intérêt pour la cartographie de l'occupation du sol (en particulier la cartographie du réseau vert) et la cartographie de l'îlot de chaleur urbain.

### 3.4.4. Quelques bases physiques

#### 3.4.4.1. Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est une forme de transport de l'énergie sans support matériel. L'onde électromagnétique est constituée d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Les deux champs sont perpendiculaires entre eux et ont la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se déplacent à la vitesse de la lumière (figure 3.4).

L'onde électromagnétique a deux propriétés principales : sa longueur ( $\lambda$ ) et sa fréquence ( $\nu$ ) (Girard et Girard, 2010 ; Desjardins et al., 2000 ; Robin, 1995 ; Bonn et Rochon, 1992).

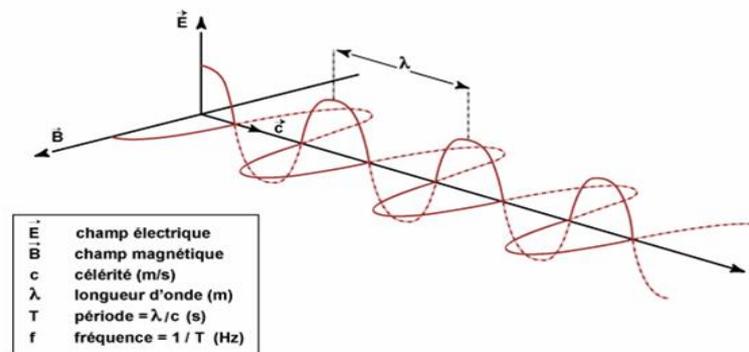


Figure 3.4: L'onde électromagnétique (Envcal, 2008).

#### 3.4.4.2. Spectre électromagnétique

« Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie » (Envcal, 2008). Le spectre s'étend des courtes longueurs d'onde (les rayons  $\gamma$  et X) (figure 3.5) jusqu'aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio) (Girard et Girard, 2010 ; Robin, 1995 ; Bonn et Rochon, 1992).

A cause des propriétés de transparence de l'atmosphère en particulier, la télédétection spatiale n'utilise pas tout le spectre électromagnétique. Les trois fenêtres spectrales les plus utilisées (Envcal, 2008) sont :

- Le domaine de la lumière visible
- Le domaine des canaux infrarouges
- Et le domaine des micro-ondes et des hyperfréquences (RADAR, etc.)

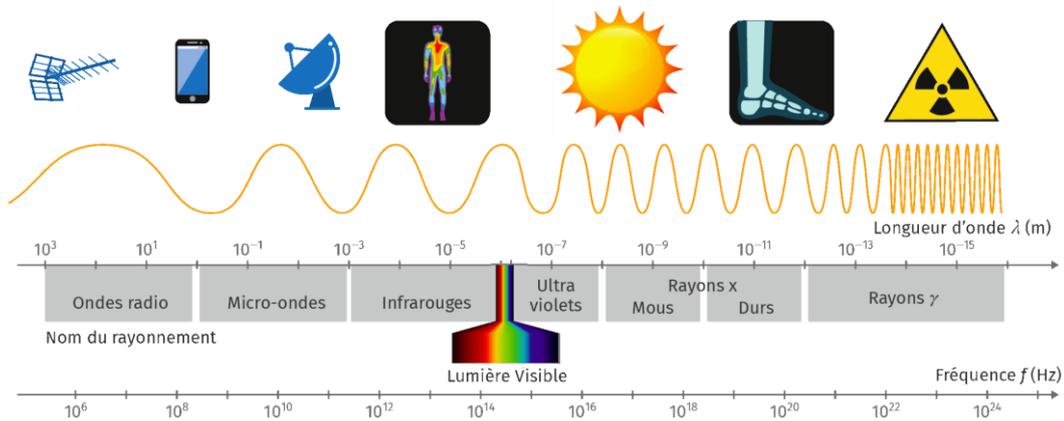


Figure 3.5: Le spectre électromagnétique simplifié. Source : <https://www.lolivrescolaire.fr>

### 3.4.4.3. Interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière

Lorsque le rayonnement entre en contact avec une matière, il peut être soit absorbé, transmis ou réfléchi. Le phénomène prépondérant dans le domaine du visible et du proche infrarouge c'est la réflexion, alors que dans les domaines de l'infrarouge thermique et des hyperfréquences c'est l'émission naturelle qui prédomine.

Les facteurs d'absorption, d'émission et de réflexion sont propres à chaque matière d'où la notion de « signature spectrale ». Cette dernière est à la base de l'interprétation des données enregistrées par les capteurs (figure 3.6) (Thenkabail, 2016 ; Envcal, 2008 ; Robin, 1995 ; Bonn et Rochon, 1992).

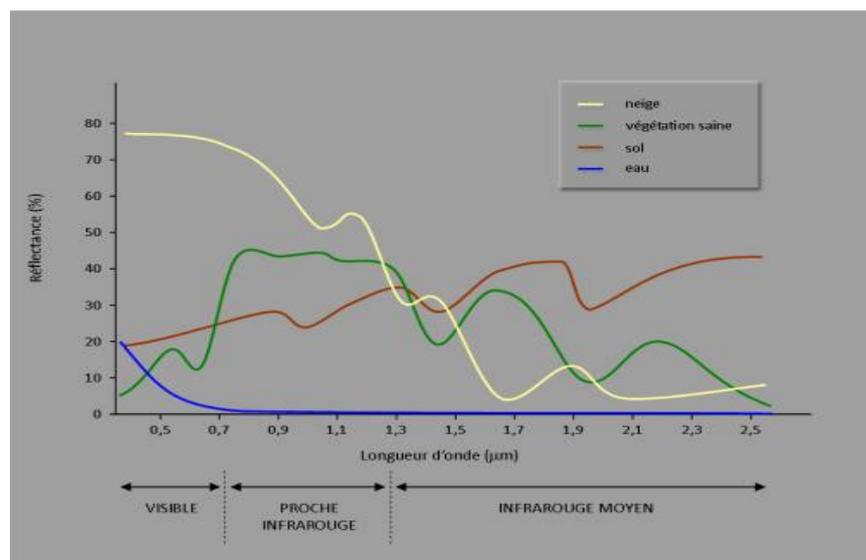


Figure 3.6: Comportement spectral de certaines surfaces dans le domaine du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen. (Envcal, 2008).

### **3.4.5. Les vecteurs (Satellites)**

En télédétection spatiale, les satellites artificiels sont les vecteurs qui portent les différents capteurs. Lorsqu'un satellite est en orbite, le capteur "observe" une partie de la surface de la terre. Cette surface est appelée fauchée. Elle varie d'un capteur à l'autre.

### **3.4.6. Les capteurs de télédétection**

Le capteur est l'instrument qui enregistre le rayonnement réfléchi, émis ou rétrodiffusé par la cible. Il permet de transformer l'énergie mesurée en un signal électrique. Ce signal est codé sur 8 bits soit un nombre entier entre 0 et 255. Les capteurs sont de différents types : caméra, appareil photographique, radiomètre, etc. Ils peuvent être embarqués sur différents types de plateforme (terrestre, aéroportée ou spatiale) (Jacquemoud, 2007 ; Desjardins et al., 2000).

### **3.4.7. Traitement numérique des images satellites**

Les données de télédétection requièrent un traitement numérique avant l'interprétation et l'extraction de l'information (Thenkabail, 2016 ; Desjardins et al., 2000). Ces traitements passent par plusieurs étapes :

1. Prétraitement (différentes corrections)
2. Rehaussement de l'image (amélioration du contraste, filtrage)
3. Transformation de l'image (composition colorée, calcul des néocanaux)
4. Classification et analyse de l'image

### **3.4.8. Prétraitement numérique des images satellites**

Lors du processus d'acquisition d'une image satellitaire le signal reçu est affecté par plusieurs facteurs. L'atmosphère et les caractéristiques du capteur sont à l'origine des déformations et des erreurs. Il est donc nécessaire d'effectuer des prétraitements afin d'obtenir des valeurs de réflectance corrigées. Les opérations de prétraitement visent à augmenter la lisibilité des images brutes en vue de faciliter leur interprétation (Thenkabail, 2016 ; Girard et Girard, 2010 ; Desjardins et al., 2000). Les prétraitements les plus fréquents sont : les corrections géométriques, les corrections radiométriques et les corrections atmosphériques.

#### **3.4.8.1. Les corrections radiométriques**

Les données spectrales d'une image sont fournies en comptes numériques (digital numbers DN), et codées sur 16 bits pour chaque pixel. Les corrections radiométriques

consistent alors à convertir ces comptes numériques (les valeurs brutes en niveaux de gris) en valeurs de luminance au niveau du capteur satellitaire, en réflectance au-dessus de l'atmosphère (TOA : Top Of Atmosphere) puis en réflectance Top of Canopy (TOC). En d'autres termes, elles ont pour objet de transformer les mesures de luminance en valeurs de paramètres physiques (réflectance, température, etc.). La calibration ou l'étalonnage de l'image permet donc de résoudre les problèmes liés aux variations dans la géométrie de visée et dans l'éclairement solaire (Jacquemoud, 2007).

### **3.4.8.2. Les corrections géométriques**

Les images du satellite doivent être superposables à d'autres documents (images ou cartes), mais elles présentent en général des déformations et des distorsions qui sont dues à : la rotation et la courbure de la terre, la déformation due au relief, aux erreurs des systèmes de mesure, à la réfraction atmosphérique, à la variation des paramètres du capteur (altitude, vitesse, angle de balayage), etc. (Soudani, 2005) (Jacquemoud, 2007). Ces erreurs sont corrigées par :

- Ortho-rectification (corriger les distorsions et les déformations géométriques).
- Géoréférencement (calage de l'image dans un référentiel géographique : WGS 84, UTM, etc.).

### **3.4.8.3. Les corrections atmosphériques**

Le rayonnement électromagnétique traverse deux fois l'atmosphère terrestre avant d'arriver au capteur (le long du trajet soleil-sol puis lors du trajet sol-capteur) (Girard et Girard, 2010). Il est donc nécessaire de s'affranchir des effets perturbateurs de l'atmosphère sur le signal reçu par le capteur. Après avoir converti les données numériques en valeurs de luminance, les effets atmosphériques sont éliminés pour obtenir la réflectance au niveau de la cible visée au sol (Jacquemoud, 2007 ; Soudani, 2005).

La méthode Dark Object Soustraction (DOS) (Song et al., 2001) est parmi les méthodes de correction les plus simples utilisées à cet effet. Son calcul se base essentiellement sur les données de l'image.

### **3.4.9. Les transformations des images multispectrales**

Les transformations d'images peuvent être appliquées à une seule bande (comme c'est le cas dans le rehaussement ou le filtrage), ou à plusieurs bandes à la fois (l'analyse

en composantes principales (ACP) ; Tasseled cap transformation (TCT) ; les indices spectraux dont font partie les indices de végétation, etc.) (Baig et al., 2014 ; Girard et Girard, 2010). Ces transformations consistent à créer de « nouvelles » images appelées néocanaux, à l'aide d'un processus basé sur l'arithmétique des canaux ; ces opérations mathématiques s'opèrent sur chaque pixel individuellement. Le résultat est une nouvelle bande qui est une fonction des bandes de l'image originale. Les applications des transformations multispectrales sont multiples telles que le suivi du couvert végétal, le suivi des océans ou l'étalement urbain.

#### **3.4.10. Rehaussement de l'image**

Après les différentes corrections de prétraitement, le rehaussement vise à améliorer l'apparence de l'image numérique pour faciliter l'interprétation et l'analyse visuelle et la compréhension de l'image. Les traitements de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour faciliter la discrimination des éléments d'une scène. En travaillant sur l'histogramme d'une image, le rehaussement des contrastes applique un changement des valeurs radiométriques des pixels afin d'exploiter toute la plage des valeurs possibles. D'autres méthodes de filtrage spatial (convolution, lissage, etc.) sont appliquées aussi pour rehausser les patrons sur une image (Girard et Girard, 2010). Ainsi on obtient une distinction des tons et une bonne perception des couleurs ce qui permet de distinguer les différents éléments constitutifs de la zone d'étude (catégories d'occupations du sol).

#### **3.4.11. Calcul des néocanaux (indices spectraux)**

Le calcul des néocanaux ou des indices spectraux fait partie des opérations de transformations des images multispectrales. Ces indices sont calculés au moyen de rapports spectraux pour améliorer la discrimination entre les classes dans une image satellite (Girard et Girard, 2010). Voici quelques exemples d'indices utilisés dans l'analyse des images satellites :

Pour cartographier la couverture végétale plusieurs indices sont utilisés. Le plus utilisé NDVI (l'indice de végétation par différence normalisée). Il existe d'autres indices tels que le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), etc. Ils combinent généralement les réflectances dans des bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR) pour bien caractériser la végétation (la végétation a une grande réflexion dans le canal infrarouge). L'indice de NDWI (Normalized Difference Water Index) permet d'améliorer la discrimination de l'eau

par exemple. Dans la détection du bâti et des zones urbaines l'indice de NDBI (Normalized Difference Built-up Index) est souvent utilisé (Hidayati et Suharyadi, 2019).

### **3.4.12. La composition colorée**

La composition colorée consiste à assigner à chaque couleur de base (Rouge (R), Vert (V), Bleu (B)) les informations comprises dans trois bandes spectrales d'un capteur satellitaire. Les pixels dans les différentes bandes présentent initialement des niveaux de gris. On utilise chacune des trois couleurs primaires du moniteur pour visualiser simultanément trois canaux. C'est le principe de la synthèse colorée additive entre les trois couleurs fondamentales. L'objectif est de faciliter l'analyse et l'interprétation de l'image. Les compositions colorées « *sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multispectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux, comme les feux de forêts, les vents de sable, les glaces de mer, etc.* » (Envcal, 2008).

Il existe deux modes de composition selon les applications (Girard et Girard, 2010) :

- Composition « vraies couleurs » ou « couleurs naturelles » pour visualiser des images réalistes.
- Compositions « fausses couleurs » pour représenter des objets ou phénomènes que l'on ne peut pas voir de nos yeux tels que l'activité chlorophyllienne de la végétation.

### **3.4.13. Cartographie de l'occupation du sol (Land Use/Land Cover LULC)**

### **3.4.14. Classification thématique d'images de télédétection**

La cartographie de l'occupation du sol est une étape incontournable dans les études d'îlots de chaleur de surface. L'identification dans l'image satellite des types de surface (bâti, végétation, eau, sol nu, etc.) permet la mise en relation entre la température de surface et la nature de chaque type de couvert. La télédétection optique est mieux adaptée à la problématique de l'occupation du sol (Girard et Girard, 2010 ; Envcal, 2008). La classification c'est le passage de l'image multispectrale à une carte thématique.

La classification numérique d'image est un processus qui consiste à regrouper au sein d'une même entité les pixels de l'image ayant des propriétés spectrales similaires. Elle est basée sur les caractéristiques statistiques des valeurs des pixels et donc de la signature

spectrale des objets au sol. Le but étant « d'assigner » une classe particulière ou thème (bâti, eau, végétation, désert, etc.) à chacun des pixels de l'image à l'aide d'un algorithme de classification. La nouvelle image est composée « d'une mosaïque » de pixels. Chaque groupe de pixels similaires correspond à un thème particulier. L'image qui en résulte est une classification thématique de l'image satellite initiale (figure 3.7 et 3.8) (Phiri et Morgenroth, 2017 ; Thenkabail, 2016 ; Girard et Girard, 2010).

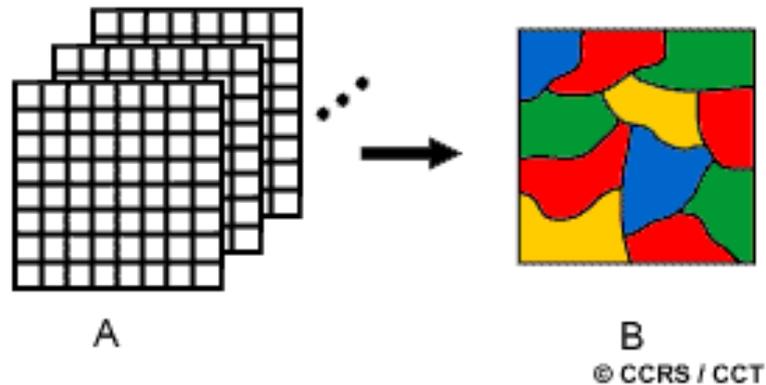


Figure 3.7 : La classification thématique d'image numérique. (Source : CCT <https://www.rncan.gc.ca/>)

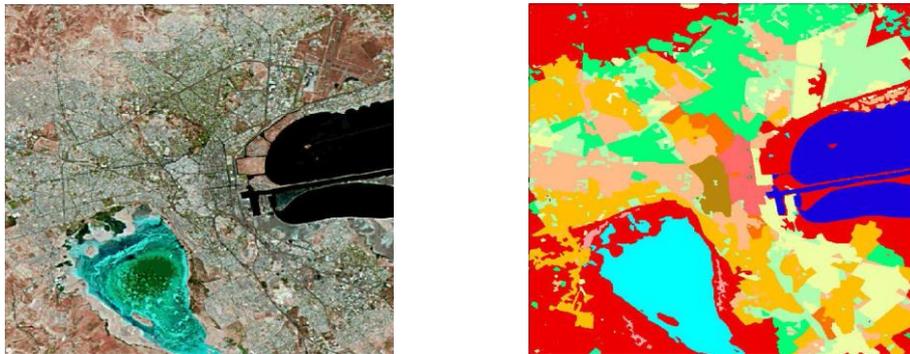


Figure 3.8 : Exemple de classification d'image (Tébourbi, 2009).

Il existe plusieurs méthodes de classification (Raiyani et al., 2021 ; Lu et al., 2020 ; Fan et al., 2017 ; Nassar et al., 2016). Il y a la classification dite orientée-Pixels (classification par pixel) qui consiste à examiner chaque pixel individuellement et à déterminer la classe thématique correspondant à sa couleur. Et la classification orientée-Objets (OBIA) où on considère qu'une image est composée d'objets plutôt que de pixels (Lillesand et al., 2008). La classification dite orientée objet s'avère beaucoup plus utile dans la classification d'images à très haute résolution spatiale (Rougier, 2016).

Il existe deux méthodes de classification : la méthode supervisée (dirigée) et la méthode non-supervisée (non-dirigée) :

### **3.4.14.1. Classification non-supervisée**

Dans la classification non supervisée on cherche à regrouper les pixels en classe selon leur signature spectrale. Ainsi les zones ayant la même signature spectrale sont censées représenter le même type d'occupation du sol. Cette approche ne demande pas donc de connaissance a priori sur le terrain. Un algorithme effectue le regroupement ou « clustering » automatiquement. L'analyste va ensuite associer à ces zones spectrales ou « clusters » des classes ou thèmes correspondant aux types de surface sur le terrain (Bandyopadhyay et Saha, 2013 ; Girard et Girard, 2010 ; Jacquemoud, 2007).

Plusieurs algorithmes sont utilisés pour ce type de classification ; citant par exemple k-moyennes (k-means) ou ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm) (Oyekola et Adewuyi, 2018 ; Phiri et Morgenroth, 2017).

### **3.4.14.2. Classification supervisée**

En revanche, la classification supervisée est basée sur la connaissance préalable du terrain (la connaissance de la nature des surfaces et leur position). L'opérateur doit identifier des sites d'entraînement sur l'image (des échantillons ou Region of Interest ROI). Les signatures spectrales des « zones de reconnaissance » serviront comme références pour l'algorithme de classification pour générer des classes correspondant aux zones d'entraînement selon les informations radiométriques des pixels dans l'ensemble de l'image (Girard et Girard, 2010 ; Jacquemoud, 2007 ; Soudani, 2005).

Différents algorithmes sont utilisés pour cette classification : Maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood), machine à vecteurs de support, forêts aléatoires (Random Forest), Minimal distance, Spectral Angle Mapper (Noui et al., 2023 ; Khatami et al., 2016 ; Thenkabail, 2016 ; Lillesand et al., 2008).

### **3.4.14.3. Evaluation de la précision de la classification**

Une fois la classification thématique est réalisée on procède à son évaluation et sa validation à l'aide d'outils statistiques. Une matrice de confusion (tableau de contingence) sera calculée pour déterminer la précision de la classification (Congalton, 1991). La matrice de confusion effectue une comparaison de la classification de l'algorithme (cartographie de l'occupation du sol) avec des zones tests (la vérité de terrain). La vérité de terrain est obtenue à partir des régions d'intérêt (les ROI) sélectionnées dans l'image. La matrice de confusion qui est un tableau à deux dimensions calcule les erreurs de

commission et d'omission et donne la précision globale de la classification (Overall Accuracy).

En plus de la précision globale, le coefficient Kappa (équation 5.1) est aussi calculé pour bien estimer la performance de la classification (Landis et Koch, 1977). Le coefficient Kappa évalue dans la matrice de confusion l'accord entre la classification du programme et la vérité-terrain. Il a une échelle de 0 à 1. Le tableau 3.1 décrit les catégories de la qualité de la classification de fonction de la valeur de Kappa.

Tableau 3.1 : Interprétation du coefficient de Kappa. (Source : Landis et Koch, 1977 ; Chalifoux et al., 2006)

Valeur de Kappa	Précision de la classification
<0,00	Faible
0,00-0,20	Légère
0,21-0,40	Acceptable
0,41-0,60	Modéré
0,61-0,80	Bonne
0,81-1,00	Très bonne

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (3.1)$$

Où

K : le coefficient Kappa

r : le nombre de lignes dans la matrice de confusion.

x<sub>ii</sub> : nombre d'observations dans la ligne i et la colonne i.

x<sub>i+</sub> et x<sub>+i</sub> : total marginal de la ligne i et de la colonne i, respectivement.

N : nombre total d'observations.

### 3.4.15. Cartographie thermique : Estimation de la température de surface LST depuis l'espace

La température de la surface terrestre est la température de l'interface entre la surface de la terre (sol, eau, végétation, etc) et de l'atmosphère (Avdan et Jovanovska, 2016 ; Rajeshwari et Mani, 2014). Les thermographies des températures de surface de la terre mesurées dans l'infrarouge par télédétection permettent la spatialisation du champ thermique de surface dans le cadre de l'étude de l'ICU de surface au niveau du sol

(Deilami et al., 2018). La télédétection par satellite offre la possibilité de pouvoir travailler à l'échelle de toute une ville et ainsi de pouvoir quantifier les températures de surface sur un vaste territoire (l'agglomération et ses alentours). Les satellites actuels offrent une bonne résolution. Les images satellites thermiques ont ainsi beaucoup contribué à l'étude des effets des îlots de chaleur urbains de surface pour la ville et sa campagne environnante (Wemegah et al., 2020 ; Sanecharoen et al., 2019 ; Guha et al., 2018 ; Zaeemdar et Baycan, 2017).

Durant les dernières décennies, les méthodes de restitution de la température de surface par satellite à partir des bandes de l'infrarouge thermique (IRT) par satellite ont connu un grand développement (Kumar et al., 2022 ; Salakham et Piyatadsananon 2020 ; Sekertekin et Bonafoni, 2020). Benmecheta (2016) a présenté une revue des principales méthodes pour l'extraction de températures de surface des images satellitaires qui utilisent un ou deux canaux thermiques d'un capteur. Ces méthodes utilisent des algorithmes qui calculent la température de surface LST à partir des valeurs d'émissivité en transformant les valeurs spectrales de l'image (Jimenez-Munoz et al., 2014).

Divers satellites offrent des données dans l'infrarouge thermique tels que les satellites NOAA, Sentinel, ASTER, MODIS, ou la série de satellites LANDSAT dont le dernier né est Landsat-9.

### **3.5. Conclusion**

Chaque type d'ICU a sa propre méthode de mesure. Une campagne de mesure sur site permettra la caractérisation de l'ICU de l'air. L'indice choisi pour la présente étude est le THI (Temperature-Humidity Index). Il a été beaucoup employé pour évaluer le stress thermique dans les zones chaudes et arides. Un des objectifs de cette étude est de comparer les résultats obtenus dans notre zone d'étude avec ceux des recherches effectuées dans des contextes climatiques similaires. L'ICU de surface nécessite le recours à la télédétection spatiale. La mesure de la température de surface (LST) et la cartographie de la zone d'étude nécessitent une succession de traitements et de calculs. Il apparaît que la résolution de l'image numérique des satellites est déterminante pour une bonne caractérisation de l'ICU de surface. Plus la résolution de l'image thermique est bonne, plus l'étude de l'ICU de surface est fine. Parmi les satellites accessibles, les données du capteur Landsat-8 sont intéressantes pour cette étude. De même, une carte d'occupation du sol de haute résolution permet la discrimination des objets urbains et plus particulièrement l'élément végétal. Les

images du capteur Sentinel-2 présentent une résolution de 10 m. Elles sont bien adaptées à la thématique urbaine.

## **CHAPITRE IV**

# **EFFETS MICROCLIMATIQUES DE LA VÉGÉTATION**

## 4. EFFETS MICROCLIMATIQUES DE LA VÉGÉTATION

### 4.1. Introduction

La végétation est un des moyens de lutte contre l'ICU. Ce chapitre expose certaines formes et typologies végétales. De plus, il récapitule les principales fonctions de la végétation urbaine. Une section sera consacrée à l'apport de la télédétection dans l'étude du végétal. Une synthèse bibliographique sur l'effet de rafraîchissement de la végétation est présentée en fin de chapitre.

### 4.2. Typologie et morphologie végétale

#### 4.2.1. Typologie de la végétation

Les végétaux sont des êtres vivants qui se développent et fonctionnent suivant plusieurs mécanismes physiologiques tels que la transpiration, la photosynthèse, la respiration, etc. Ils se présentent selon diverses catégories et formes :

##### 4.2.1.1. Les arbres

L'arbre est une espèce végétale ligneuse et vivace, caractérisée par un tronc et une couronne formée de branches ramifiées et un feuillage. Il atteint au moins 7 m de hauteur (figure 4.1) et les branches principales se développent à partir d'une certaine hauteur du tronc (Hallé, 2008 ; Viatte, 2002 ; Larue, 1996).

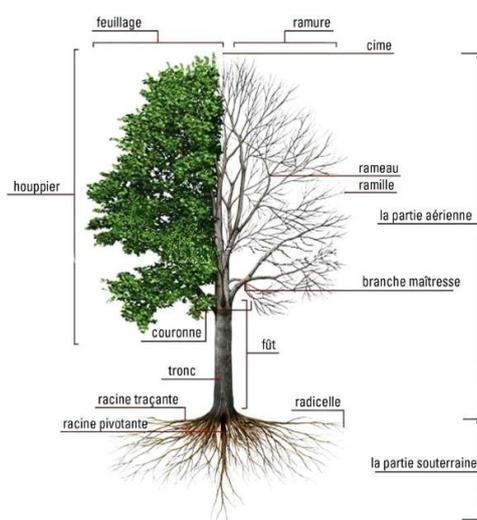


Figure 4.1 : Structure d'un arbre. Source : [www.aquisav.com](http://www.aquisav.com)

### 4.2.1.2. Les palmiers

A la différence des arbres, les palmiers ont la particularité d'avoir une tige non ramifiée appelée « stipe » (figure 4.2). La couronne foliaire est sous forme d'un bouquet de feuilles pennées ou palmées (Munier, 1973 ; BenChennouf, 1971).

Le palmier dattier est l'espèce végétale la plus répandue dans les régions chaudes et arides. C'est l'élément principal des oasis traditionnelles d'où le nom de palmeraie. Le palmier permet une agriculture à plusieurs étages au sein de l'oasis. Sa couronne forme la strate supérieure qui couvre la deuxième strate des arbres fruitiers (figuiers, citronniers, abricotiers, etc.). La dernière strate est formée par les cultures maraîchères, fourragères et céréalières. Elles poussent à leur tour à l'ombre des arbres fruitiers (Ahriz, 2018).

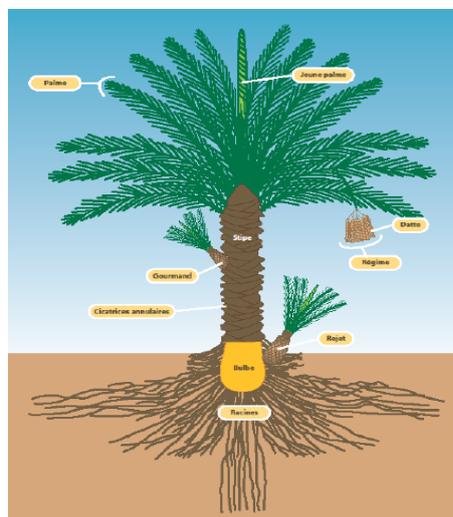


Figure 4.2 : Le palmier dattier. Source : relais-sciences.org, 2012 in Achoura (2013).

### 4.2.1.3. Les arbustes et arbrisseaux

Ce sont aussi des plantes ligneuses tout comme l'arbre mais d'une hauteur inférieure à 7 m (figure 4.3).

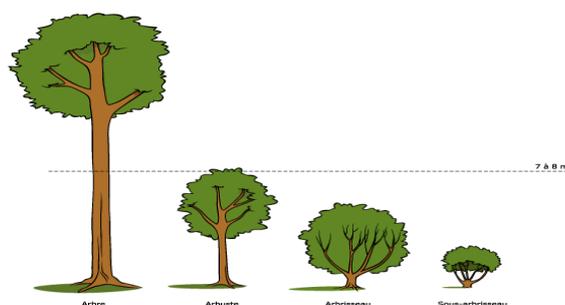


Figure 4.3 : Arbre, arbuste, arbrisseau et sous-arbrisseau. Source : www.mabiologie.com

#### 4.2.1.4. Les plantes grimpantes

Ce sont généralement des plantes ayant des tiges souples (figure 4.4). Elles sont capables de grimper en s'attachant à un support (Maaoui, 2014).



Figure 4.4 : plantes grimpantes. Source : [www.gerbeaud.com](http://www.gerbeaud.com)

#### 4.2.1.5. Les herbacées

Ce sont des plantes non-ligneuses caractérisées par des tiges tendres telles que l'herbe de toutes sortes, les fleurs, etc. (figure 4.5). Généralement de couleur verte, elles peuvent être annuelles ou vivaces (Maaoui, 2014).



Figure 4.5 : Les herbacées. Source : [www.anglevert-services.com](http://www.anglevert-services.com)

#### 4.2.1.6. Les succulentes

Ce sont des plantes charnues adaptées aux milieux arides (figure 4.6). Elles résistent très bien à la sécheresse (Maaoui, 2014).



Figure 4.6 : Les succulentes. Source : <https://espacepouurlavie.ca>

## 4.2.2. Formes du végétal urbain

Le végétal urbain en ville se présente sous de multiples formes. Parmi les divers dispositifs de végétation, les plus répandus sont présentés dans ce qui suit.

### 4.2.2.1. Les parcs, jardins et forêts urbaines

Ce sont généralement des espaces verts délimités, regroupant des arbres, des arbustes, des massifs fleuris, de la pelouse, des plans d'eau, etc. (figure 4.7). Ce sont des lieux de détente et de loisirs ou de sport. Par le passé, les palmeraies formaient un couvert végétal étendu au-delà des murailles de la ville au désert. Cependant, à l'époque contemporaine, l'urbanisation a envahie l'oasis et les palmeraies font souvent partie intégrante de la ville à l'image des parcs urbains, bien qu'elles soient propriétés privées (Bensalah et al., 2018 ; Bouchair, 2004 ; Côte, 2002).



Figure 4.7 : Les parcs, jardins. Central Park à New York. Source : [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com)

#### 4.2.2.2. Les arbres d'alignement et l'arbre isolé

Les arbres d'alignement sont une formation arborée plantée suivant un axe et à une distance régulière le long des rues et des boulevards et autres voies de communication (figure 4.8). Ils participent à la structure de l'espace urbain.

L'arbre isolé est souvent mis en valeur en se détachant dans le paysage urbain. Il est planté seul dans les places publiques pour l'ombre et l'agrément. En général c'est un arbre monumental et ancien qui joue le rôle d'élément de repère et d'écrin aux édifices.

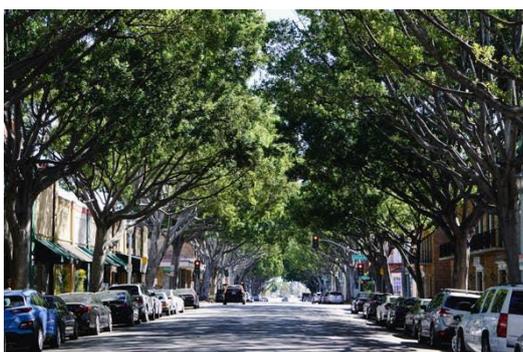


Figure 4.8 : Arbres d'alignement. Los-angeles-tree-tunnels. Source : Pernell Quilon, [www.buzzfeed.com](http://www.buzzfeed.com)

#### 4.2.2.3. La végétalisation des sols urbains (pelouse, fleurs, ...)

Les formations végétales herbacées peuvent être utilisées comme couvre-sols. Ce sont généralement des plantes tapissantes ou rampantes de faible hauteur servant à enherber le sol et les talus. La végétation couvrante peut être constituée de pelouse, de prairie et de diverses formations fleuries (figure 4.9). Elles sont souvent régulièrement tondues et entretenues afin qu'elles conservent leur aspect esthétique et pour la pratique du sport.



Figure 4.9 : La végétalisation des sols. Pelouse et bordure fleurie. Source : Dude Pascalou / [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

#### 4.2.2.4. Toit vert et mur végétal

La toiture verte consiste à aménager le toit du bâtiment en toit-terrasse ou toit-jardin. Le toit est recouvert de végétation à la place des tuiles, des tôles, etc. (figure 4.10). La toiture verte est constituée d'un substrat pour la culture des plantes. Le mur végétal ou façade végétalisée est un mur sur lequel poussent des plantes grimpantes (figure 4.11).



Figure 4.10: Toit vert. Gap's headquarters in San Bruno, California. Source: Photograph: Steve Proehl/www.gettyimages.fr



Figure 4.11 : La façade végétalisée. Source : www.istockphoto.com

#### 4.2.2.5. Les plantes grimpantes (treillis et pergolas)

Les différents treillis et pergolas servent comme support pour les plantes grimpantes. Ils sont souvent utilisés pour leur rôle d'ombrage et de décoration (figure 4.12).



Figure 4.12 : Les plantes grimpantes (treillis et pergolas). Source : <https://designmag.fr/jardins-et-terrasses>

#### **4.2.2.6. Les haies**

Ce sont des clôtures végétales constituées d'arbres, d'arbrisseaux, de plantes grimpantes, etc. (figure 4.13). Les haies sont donc des écrans de verdure qui peuvent remplir des fonctions dans la ville. Elles peuvent servir à embellir ou à délimiter et protéger un espace urbain.



Figure 4.13 : Les haies. Source : [www.rustica.fr](http://www.rustica.fr)

### **4.2.3. Morphologie végétale**

Les végétaux se distinguent par la forme (le port), la taille, le type et la forme des feuilles, etc.

#### **4.2.3.1. Les feuilles**

Les feuilles sont le siège de la photosynthèse, de la respiration et de la transpiration. Les échanges gazeux s'effectuent à travers des ouvertures, appelées stomates (Gorenflot et de Foucault, 2005 ; Zaffran, 1998). Les végétaux présentent une large variété des types et formes des feuilles.

### 4.2.3.2. L'indice Foliaire (LAI)

L'indice foliaire, appelé aussi « indice de surface foliaire » (LAI, en anglais Leaf Area Index), est le rapport entre la surface totale des feuilles d'un arbre et la surface du sol sous-jacente (Bréda, 1999). C'est une grandeur sans dimension variant de 0 (pour un sol nu) à 10.

### 4.2.3.3. Le port des arbres

Le port correspond à l'aspect général et la forme naturelle d'un arbre (Larue, 1996). De par leurs dimensions et leurs formes, les arbres ont des silhouettes différentes (figure 4.14). La sélection des arbres selon leurs formes est déterminée par les besoins d'aménagement en ville.

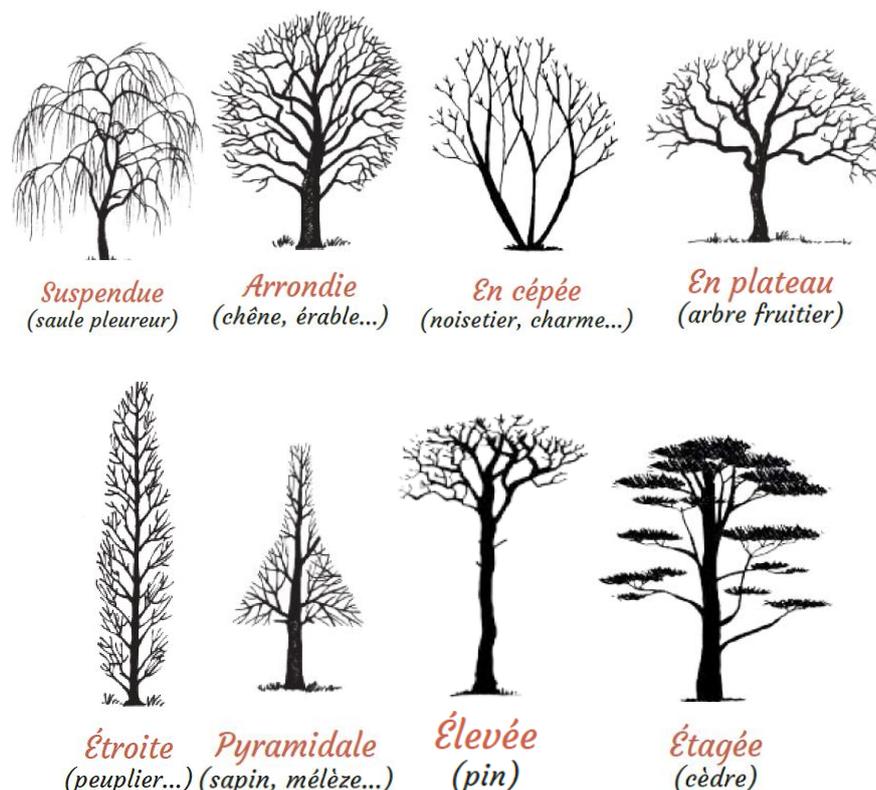


Figure 4.14 : Ports d'arbre. Source : <https://cicadelle.org>

### 4.2.4. La végétation caduque et persistante

Les végétaux peuvent avoir des ambiances saisonnières différentes selon leur typologie (Larue, 1996). On distingue les végétaux de type caduc qui perdent leur feuillage durant la période hivernale, et les végétaux à feuillage persistant qui maintiennent leurs feuilles tout au long de l'année. L'usage de la végétation caduque ou persistante est dicté

par les objectifs d'aménagement et les solutions bioclimatiques recherchées (ombrage, brise-vent, etc.) (figure 4.15). Le palmier dattier, l'élément dominant dans l'oasis, a un feuillage persistant.

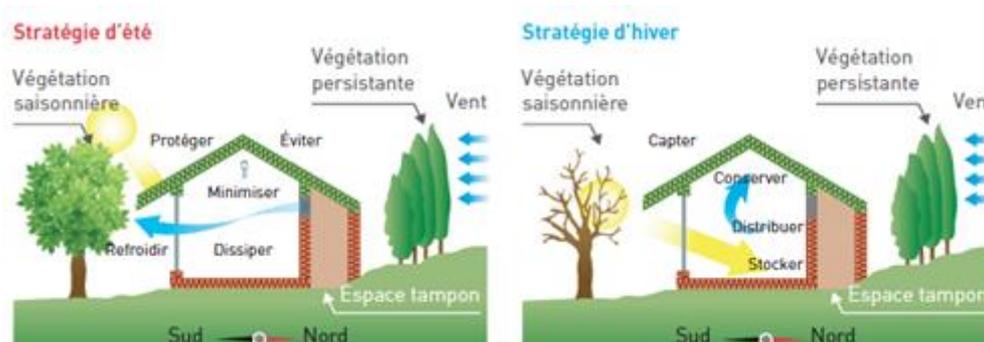


Figure 4.15 : L'usage de la végétation caduque ou persistante. Source : [www.marine-bezia-architecte.com](http://www.marine-bezia-architecte.com)

### 4.3. Rôles et fonctions écosystémiques de la végétation urbaine

La végétation apporte de nombreux bienfaits environnementaux, économiques, socio-culturels et de santé humaine. Le végétal urbain remplit aussi une fonction symbolique et esthétique (McDonald et al., 2018 ; Veerkamp et al., 2021 ; Van den Bosch et Nieuwenhuijsen, 2017 ; Laille et al., 2014). Dans ce qui suit, sont présentés quelques services écosystémiques que les infrastructures vertes rendent à l'environnement urbain.

#### 4.3.1. Rôles environnementaux

Les bienfaits écologiques et environnementaux que rendent la végétation urbaine sont nombreux :

##### 4.3.1.1. Atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain

La végétation est un moyen de rafraîchissement de la ville. Elle peut atténuer l'effet de l'îlot de chaleur urbain par l'évapotranspiration et l'ombrage (voir la section de stratégie de lutte contre l'ICU). La littérature scientifique montre que les zones végétalisées sont de véritables îlots de fraîcheur (Marando et al., 2022). Les parcs et les espaces verts assurent une fonction de régulation thermique particulièrement lors des vagues de chaleur. Le rôle potentiel de la végétation urbaine comme régulateur du microclimat sera abordé en détail dans une prochaine section.

#### **4.3.1.2. Biodiversité et conservation de la nature : habitats et corridors écologiques**

Le milieu urbain affecte la biodiversité animale et végétale : îlot de chaleur urbain, pollution de l'eau, dégradation de la qualité de l'air, fragmentation des territoires naturels, nuisances sonores et lumineuses, etc. (figure 4.16) (Clergeau, 2007). La végétation urbaine favorise la biodiversité et joue un rôle d'habitat écologique (abri, protection et nourriture) et de corridors biologiques pour la conservation et la reproduction de la flore et la faune urbaine (insectes, micro-organismes et oiseaux, mammifères, etc.) (Anquetil, 2010). Les parcs arborés et les jardins publics constituent un habitat écologique pour de nombreuses espèces animales et végétales (Saümel et al., 2010). Les corridors biologiques peuvent être constitués de mails plantés, de ripisylves, d'arbres d'alignement le long des rues et boulevards, etc. Ils assurent la connectivité de ces habitats écologiques et permettent les flux d'espèces (le déplacement et la dispersion de la faune et la dissémination des espèces). Ainsi, les espaces verts urbains constituent des viviers de biodiversité en hébergeant de nombreuses espèces. La création d'espaces verts est primordiale pour compenser la perte de biodiversité due à l'urbanisation et assurer la continuité des corridors écologiques. De même, afin de réduire l'effet d'isolement des habitats, il est important de bien penser les trames vertes urbaines (Cormier et al., 2010).

#### **4.3.1.3. Séquestration du carbone : Puits de carbone**

Les émissions issues des activités humaines telles que le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> ou le N<sub>2</sub>O sont très toxiques pour l'homme, la faune et la flore (Anquetil, 2010) (figure 4.16). Les végétaux ont la capacité de séquestrer le carbone via la photosynthèse, dans la biomasse et dans le sol (Davis et al., 2011 ; Singh, 2007 ; Nowak et Crane, 2002). Les arbres constituent ainsi de véritables puits de carbone. La séquestration est d'autant plus efficace que les arbres sont jeunes. Ce service rendu par la végétation peut être directement ou indirectement monétisés (Sadeghian et Vardanyan, 2013 ; Nowak et al., 2007).

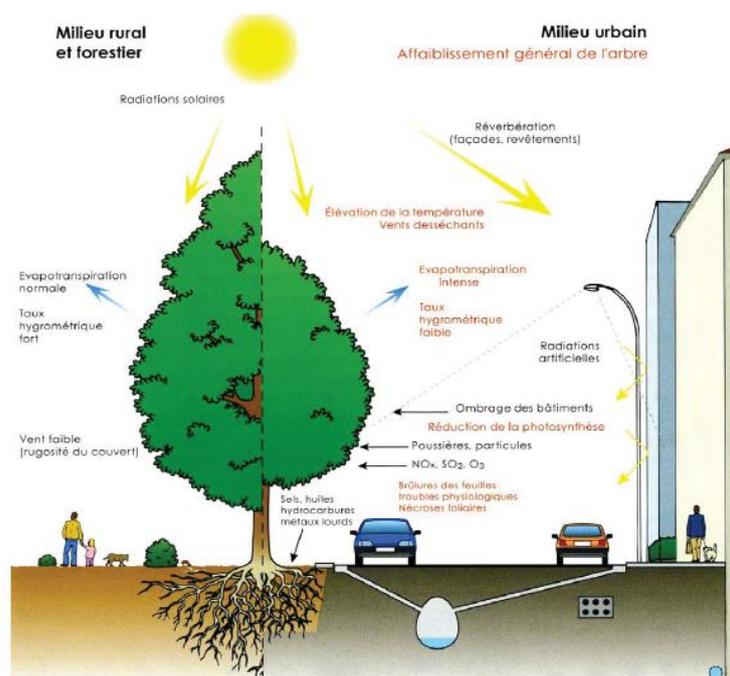


Figure 4.16 : Les incidences du microclimat et de la pollution sur la végétation. (Source: Gillig et al., 2008)

#### 4.3.1.4. Réduction et filtration de la pollution et la poussière

La végétation contribue à purifier, à dépolluer et à assainir l'air en milieu urbain (Laille et al., 2014). Les végétaux peuvent capter les composés gazeux et les particules en suspension (NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, COV, etc.) (Morakinyo et al., 2016). Ils interceptent par leurs feuilles les particules nocives dans l'air en filtrant les poussières fines et en séquestrant les métaux lourds (plomb, cadmium, manganèse...) (Mestayer et Brunet, 2015). La végétation absorbe les polluants gazeux et piège les polluants particuliers. La capacité de filtration varie d'une espèce à une autre. Cependant, si la végétation est capable d'absorber les aérosols en suspension, certaines espèces émettent des composés organiques volatils (COV) et des pollens allergisants (Pascal et al., 2018 ; Xue et Li, 2017 ; Pacifico et al., 2009).

#### 4.3.1.5. Gestion des eaux pluviales et contrôle de l'érosion

Comme il a été cité plus haut, l'imperméabilisation des sols urbains réduit considérablement l'infiltration des précipitations dans le sol et augmente le ruissellement superficiel. Cet aspect a été abordé dans le chapitre II. La végétation assure la protection des sols de l'érosion. Grâce à son système racinaire, elle fixe le sol et stabilise le terrain notamment dans les pentes. En somme, la végétation urbaine est un moyen efficace dans la

gestion des eaux pluviales. De nombreux aménagements urbains peuvent être utilisés tels que les jardins de pluie, les bassins de rétention ou les noues végétalisées.

### **4.3.2. Bienfaits économiques**

L'aménagement et l'entretien des espaces verts contribuent à la création de richesses économiques, tant de manière directe qu'indirecte.

#### **4.3.2.1. Réduction de la consommation énergétique des bâtiments**

Les dispositifs de végétalisation qui accompagnent les constructions (toit vert, mur végétal, plantation d'arbres pour ombrage ou écran brise-vent, etc.) agissent sur la température à l'intérieur des bâtiments (Gago et al, 2013). En été, la végétation réduit les températures indirectement via l'évapotranspiration et directement par ombrage des parois. L'atténuation de la chaleur extérieure permet de réduire la consommation d'énergie de climatisation (Aram et al., 2019). En hiver, "l'effet d'écran" des arbres contre les vents froids diminue considérablement les besoins de chauffage. Les toits et les murs végétalisés renforcent l'isolation thermique des bâtiments et permettent de limiter les coûts de climatisation et de chauffage.

#### **4.3.2.2. Valeur de la propriété et attractivité des villes**

Les espaces de verdure augmentent la valeur foncière des propriétés. La proximité d'un espace vert correspond souvent à une valorisation du foncier (Crompton, 2001 ; Cho, 2008). La vue sur un parc ou un aménagement paysager constitue une plus-value financière (Luttik, 2000). Ces facteurs touchent les propriétaires aussi bien que les locataires (Hoshino et Kuriyama, 2010). Les espaces verts contribuent aussi à l'attrait des touristes, des investisseurs et des futurs propriétaires. Les parcs et jardins renforcent l'attractivité du territoire et présentent un intérêt touristique certain. Ils constituent un atout économique pour les municipalités. L'engouement pour les célèbres parcs urbains prestigieux - tels que le parc de Versailles à Paris ou le Central Park à New York - constitue un motif fort de visite (ASTERES, 2016). L'attractivité des villes impacte directement la valeur de propriété (terrain et bâtiment).

#### **4.3.2.3. Déchets recyclés, bois d'œuvre**

Les espaces végétalisés urbains produisent une quantité importante de biomasse.

L'entretien des espaces verts (taille, élagage, tonte, ...) génère de nombreux déchets carbonés (branchage, tronc, etc.) ou azotés (résidus herbacés) (Laille et al., 2014). Cette

biomasse peut être récupérée et valorisée dans les filières de production énergétique et agronomique. Les déchets peuvent être recyclés et transformés (déchiquetés, broyés, ou transformés en granules) pour la production : d'énergie, de bois d'œuvre, de fertilisants, de paillage, de panneaux de bois destinés à l'industrie, de compost, etc. (ASTERES, 2016).

#### **4.3.2.4. Agriculture urbaine**

L'agriculture urbaine ou le maraîchage urbain présentent un potentiel économique important. C'est un autre aspect de valorisation économique des espaces verts urbains. Les jardins familiaux ou partagés, sur les toits ou dans les cours, sont même encouragés par l'ONU (L'Agenda Alimentaire Urbain, FAO). Les produits cultivés localement (légumes, fruits, céréales, etc.) sont distribués dans des circuits courts diminuant de la sorte les coûts de transport et la consommation de carburant (Laille et al., 2014).

#### **4.3.2.5. Autres bienfaits économiques**

Les espaces verts permettent la réduction des coûts de traitement des eaux par filtration naturelle par exemple. Enfin, l'ombre des arbres augmente la durée de vie des chaussées (Monty, 2006).

### **4.3.3. Bienfaits sur la santé humaine**

La végétation a des effets notables sur la santé physique, la santé mentale et le confort global dans l'environnement urbain.

#### **4.3.3.1. Amélioration de la qualité de l'air**

Comme vu précédemment, la végétation urbaine peut améliorer la qualité de l'air. Les végétaux interceptent les particules de pollution, absorbent les gaz polluants et produisent de l'oxygène (Pascal et al, 2018). Les espaces verts urbains contribuent à l'amélioration de santé publique globale et en particulier pour les personnes atteintes de maladies respiratoires.

#### **4.3.3.2. Santé physique**

Les espaces verts urbains offrent aux citoyens des espaces agréables pour la pratique de l'activité physique en plein air. Ils peuvent également être une motivation pour cette pratique.

Les sentiers forestiers dans les parcs encouragent la marche et le vélo (Kaczynski et al., 2007). La réduction de l'obésité est parmi les bienfaits les plus communément associés à la présence d'un espace vert de proximité (Konijnendijk et al., 2013). La fréquentation

des espaces verts améliore l'état de santé des habitants par la marche, la course et autres agrets, et favorise la vitalité au quotidien (ASTERES, 2016). En outre, les espaces verts contribuent au confort lumineux en réduisant les phénomènes d'éblouissement.

### 4.3.3.3. Santé mentale, bien-être psychologique

Les espaces verts urbains ont une incidence psychologique positive sur les citadins. Ils permettent l'amélioration de la santé mentale, l'apaisement du stress, la diminution des épisodes de dépression (Berger et Tiry, 2012 ; Brown et al., 2013). Ils favorisent l'équilibre psychique et fournissent un endroit à l'abri du bruit, permettant le ressourcement et la détente (ASTERES, 2016).

La fréquentation et l'accès aux espaces verts sont associés au bien-être psychologique et l'amélioration de l'humeur (Laille et al., 2015). Il est admis que la végétation repose la vue et l'esprit, permet la détente, l'apaisement des tensions et la méditation (Lee et Maheswaran, 2011). Elle influence positivement les émotions des gens et leur perception des zones urbaines et diminue l'agressivité.

### 4.3.3.4. Atténuation du bruit (Confort acoustique)

L'exposition chronique au bruit est une menace majeure pour la santé des citadins (OMS, 2018 ; Basner et al. 2014). Les plantations denses et épaisses autour des bâtiments peuvent réduire les niveaux de bruit (Musy, 2014 ; Yang, 2013). L'atténuation varie selon l'espèce de végétation, la densité et la forme du feuillage. Il est nécessaire d'aménager une bande végétale suffisamment épaisse afin de réduire le bruit de quelques décibels (figure 4.17). Par ailleurs, les bruits de la faune et de la flore peuvent masquer la pollution sonore (comme le chant d'oiseaux ou le bruissement des feuilles des végétaux) (Lessard et Boulfroy, 2008).

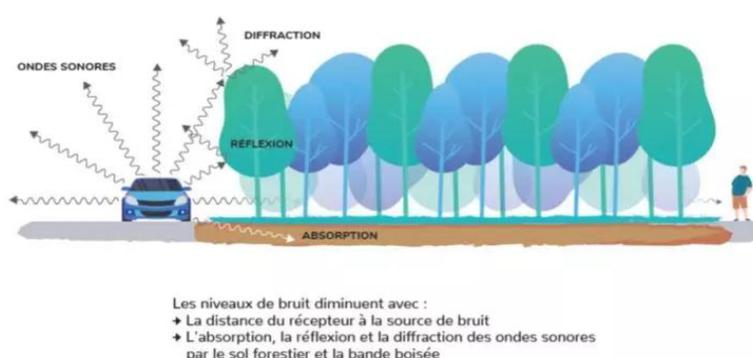


Figure 4.17 : Diminution du bruit en présence d'une bande végétale. Source : Bruxelles Environnement (2021).

#### **4.3.4. Bénéfices socio-culturels**

Les espaces verts urbains favorisent les occasions d'interactions sociales entre des personnes issues de milieux sociaux et ethniques variés. Ils renforcent le lien social, l'esprit de communauté, l'identité collective, l'attachement communautaire et le sentiment d'appartenance (Laille et al., 2015). La fréquentation des espaces verts publics renforce la cohésion sociale à travers les activités qui s'y déroulent. Les parcs urbains, les jardins partagés ou familiaux favorisent les occasions de rencontre entre les usagers grâce aux activités communes comme le jardinage, le sport ou le jeu (Maas et al., 2006). Ils présentent ainsi, un fort potentiel de socialisation. Lors de jeux de plein air, les contacts entre enfants contribuent à leur épanouissement et leur développement affectif. Les espaces végétalisés sont aussi des lieux d'échange entre cultures et entre générations favorisant la mixité sociale (Sulaiman et al., 2016). En somme, les espaces verts publics ont des répercussions sociales positives.

En outre, les espaces verts urbains ont un rôle culturel et pédagogique. Les parcs et les jardins incarnent l'esprit de leur époque et reflètent l'histoire des courants artistiques (le classicisme dans le jardin à la française, le romantisme dans le jardin à l'anglaise, etc.). De plus, les espaces boisés constituent un lieu d'éducation à l'environnement, ainsi qu'un outil pédagogique, notamment pour le jeune public. Ce sont des lieux de découvertes et d'observation de la nature, propices à la vulgarisation scientifique du fonctionnement des écosystèmes. Ils répondent à un enjeu de sensibilisation des habitants à la protection des espaces verts et la sauvegarde de la biodiversité (Lessard et Boulfroy, 2008).

#### **4.3.5. Rôle symbolique et esthétique**

Les écrans de verdure sont des éléments d'architecture du paysage qui véhiculent caractère et identité. Ils sont appréciés pour leur esthétisme et leur aspect expressif (Redon, 2017 ; Klemm et al., 2015). Les espaces verts urbains jouent un rôle d'embellissement de la ville. Ils ont des dimensions symboliques et esthétiques. La végétation peut servir comme élément de design urbain. Elle permet d'articuler l'espace pour créer un effet de perspective. Elle peut préserver l'intimité d'un lieu en formant des écrans visuels (Lessard et Boulfroy, 2008). Les végétaux offrent un foisonnement de couleurs et de formes dans le paysage. De même, ils créent un contraste de couleurs, de texture et de formes avec les façades des bâtiments. Les espaces verts brisent la monotonie des masses minérales ; ils donnent une unité et une cohérence à la composition urbaine. Les plantations d'alignement

servent à encadrer les perspectives et renforcer la lisibilité des axes urbains (Lessard et Boulfroy, 2008).

Les bienfaits des espaces verts urbains sont nombreux. Dans notre recherche, ce sont les aspects microclimatiques qui seront plus particulièrement traités.

#### **4.4. Effets microclimatiques de la végétation urbaine**

Comme il a été évoqué précédemment, parmi la palette de services écosystémiques et environnementaux qu'offre la végétation dans le milieu urbain, c'est son rôle de régulateur thermique qui nous importe dans cette recherche. La végétation a une influence sur le microclimat de manière directe par l'ombrage et indirecte au travers de l'évapotranspiration (Qin et Li, 2019).

##### **4.4.1. Principaux mécanismes de régulation du climat par la végétation urbaine**

Les végétaux impactent le microclimat urbain en combinant les effets liés à l'ombrage, l'évapotranspiration et leur effet de brise-vent.

###### **4.4.1.1. Évapotranspiration**

L'évapotranspiration est l'association de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol et sur les végétaux et la transpiration à travers les stomates des feuilles de la plante (Zhang et Wang, 2021 ; Miralles et al., 2020 ; Musy, 2014). Elle s'exprime en millimètre d'eau évaporée, tout comme la pluviométrie. Il est à noter que l'estimation de l'évapotranspiration est difficile en particulier dans les zones arides (Saher et al., 2021).

L'émission de vapeur d'eau dans l'atmosphère peut s'effectuer depuis la surface du sol, des plans et des cours d'eau, et de la surface des végétaux. C'est une opération purement physique. La transpiration quant à elle, est un phénomène biologique. La plante peut puiser l'eau en profondeur par son système racinaire et continue à transpirer. Si le sol est sec -comme c'est le cas dans les zones chaudes et arides- l'évaporation à partir du sol est quasiment nulle. Le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux consomme de la chaleur. En consommant de l'énergie, l'évapotranspiration permet de refroidir l'environnement immédiat de l'arbre (Richards et al., 2020 ; Saudreau et al., 2015). L'évapotranspiration a pour fonction le transfert de l'humidité vers l'atmosphère. Elle a donc un effet d'humidification de l'air ambiant (figure 4.18). L'évapotranspiration est influencée par certains paramètres tels que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'albédo du sol, l'espèce végétale, la disponibilité de l'eau, etc. (Wang et al., 2020 ; Zheng

et al., 2020 ; Nouri et al., 2019). La quantité d'eau évapotranspirée varie selon les espèces, les climats, le type de sol, les conditions d'irrigation, etc. Elle peut s'élever à des centaines de litres par jour (Wanniarachchi et Sarukkalige, 2022 ; Nouri et al., 2019). L'énergie consommée pour évaporer cette quantité d'eau permet de rafraîchir l'air autour du houppier.

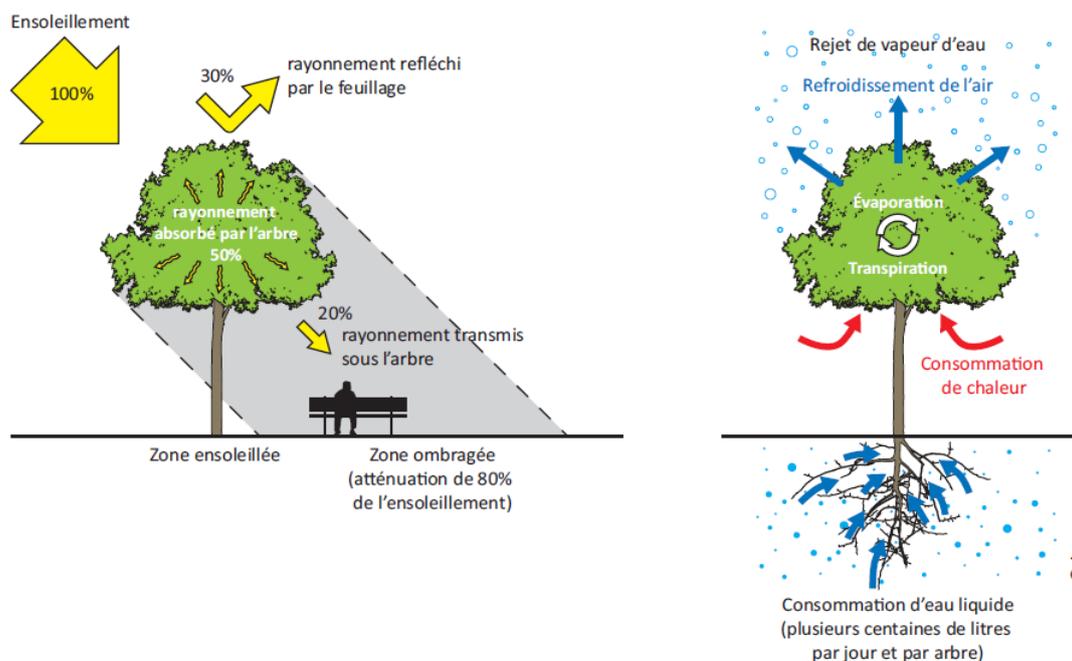


Figure 4.18 : Effet d'ombrage (à gauche) et l'évapotranspiration au niveau de l'arbre (à droite). Source : APUR, Cahier numéro 1 (2012).

#### 4.4.1.2. Ombrage

L'ombre est l'effet le plus évident de la végétation. C'est l'élément le plus recherché quand on plante un arbre dans le but d'atténuer l'îlot de chaleur urbain (Rahman et al., 2020 ; Meili et al., 2021). Le feuillage et le branchage de la végétation ont pour fonction d'intercepter et de réfléchir le rayonnement solaire. Ils bloquent les rayons incidents et réduisent fortement l'énergie atteignant le sol (figure 4.18). Le stockage de chaleur par les surfaces se trouve réduit en conséquence. Shashua-Bar et Hoffman (2000) rapportent que la majorité des effets de refroidissement des arbres d'alignement sont attribués à l'ombrage. Plus la surface foliaire est grande, plus elle intercepte et réfléchit les rayons du soleil. La densité foliaire détermine le niveau de perméabilité de la couronne de l'arbre au rayonnement solaire. Un arbre d'une grande densité foliaire a la capacité de limiter l'apport d'énergie sur les surfaces du sol et des bâtiments. Une couronne foliaire dense et épaisse peut filtrer jusqu'à 98% de la radiation solaire tandis qu'une couronne

aérée n'en intercepte que 60 à 80 % (Vergriete et Labrecque, 2007). En hiver, quand l'ombre n'est plus recherchée, les arbres à feuilles caduques laissent passer le rayonnement solaire à travers ses branches (Brunet, 2016). L'albédo des feuilles intervient aussi dans la réflexion de l'énergie lumineuse. Ainsi, une surface engazonnée (albédo de 0,25 à 0,30) réfléchit plus de lumière qu'un couvert arboré (albédo de 0,15 à 0,18) (Tan et al., 2015 ; Guay et Baudoin, 2003) mais ne produit pas d'ombrage. L'étendue de l'ombre dépend du port de l'arbre. La forme et la silhouette du houppier déterminent la surface de l'ombre projetée au sol (figure 4.19). Les ports qui ont effet "parasol" tel que le port étalé masquent une grande surface et offrent plus d'ombre (Vinet, 2000 ; Bouyer, 2009). D'après une étude menée par Kotzen (2003) au désert de Néguev (figure 4.20), les arbres aux larges couronnes présentent les meilleures performances pour les climats chauds et arides. En général, l'orientation de la façade à ombrager détermine le choix de la forme et de l'espèce des végétaux à planter.

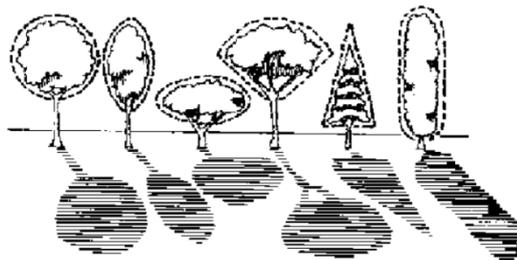


Figure 4.19 : Effet du port de l'arbre sur l'ombrage. Source : Meerow et Black (1993).

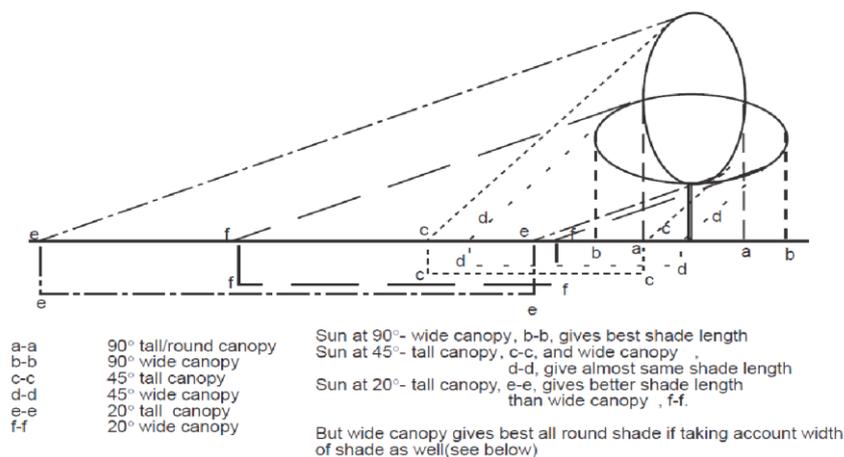


Figure 4.20 : Comparaison de la surface d'ombre créée pour une canopée étalée et érigée. Source : Kotzen (2003).

L'ombre de la végétation agit sur les échanges radiatifs de l'espace urbain. Elle implique donc une diminution directe de la température de surface et une réduction indirecte de la température de l'air (figure 4.21) (Rahman et al., 2020 ; Meili et al., 2021 ; Musy, 2014 ; Reiter, 2007).

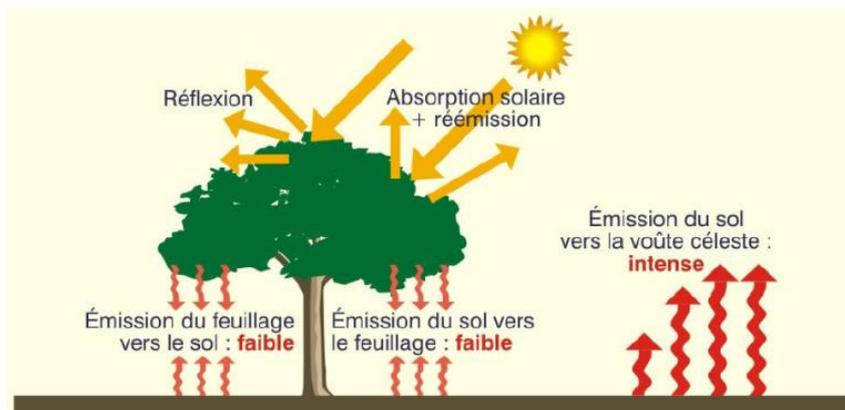


Figure 4.21 : Interaction de la végétation avec le rayonnement solaire. Source : Reiter (2007).

Le feuillage de la végétation absorbe plus de 80% du rayonnement solaire dans le processus de la photosynthèse. La lumière absorbée (les longueurs d'ondes visibles de 400 à 700 nm) sera transformée en énergie chimique. Le reste du rayonnement solaire ( $\approx 20\%$ ) est transmis vers le sol (figure 4.22) ou réfléchi vers l'atmosphère (Saudreau et al., 2015). L'absorption et la réflexion du rayonnement dépendent des propriétés géométriques et radiatives des feuilles.

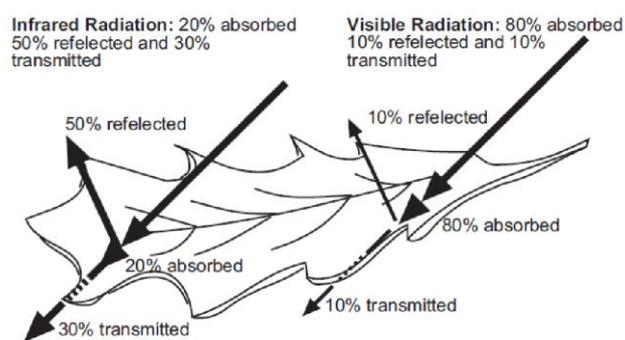


Fig. 5. Leaf absorption, transmission and reflection. After Brown and Gillespie.

Figure 4.22 : absorption, transmission et réflexion des feuilles d'arbres. Source : Kotzen (2003)

L'ombre des végétaux réduit considérablement le gain de chaleur dans les bâtiments en réduisant les températures des murs et planchers. De même, la canopée des arbres limite les échauffements des surfaces urbaines telles que les trottoirs, les chaussées et les façades.

En effet, l'ombre diminue la température moyenne radiante de l'environnement ( $T_{mrt}$ ) qui est un paramètre déterminant du confort thermique.

Certaines études ont montré, via la thermographie, que la température de surface du feuillage est très proche de celle de l'air sous abri (Apur, 2012 ; Vinet, 2000 ; De La Torre et al. 1998 ; Hoyano, 1988) (figure 4.23). Les températures de surface mesurées par une caméra infrarouge montrent la couronne de l'arbre à 27, 28 et 29 °C tandis que la température de l'air est à 28 °C (Alvarez et al., 2000). En milieu urbain, la température de surface de la pelouse (figure 4.24 et 4.25) est nettement plus fraîche qu'une surface minérale (pavage, asphalte, etc.) (Apur, 2012).

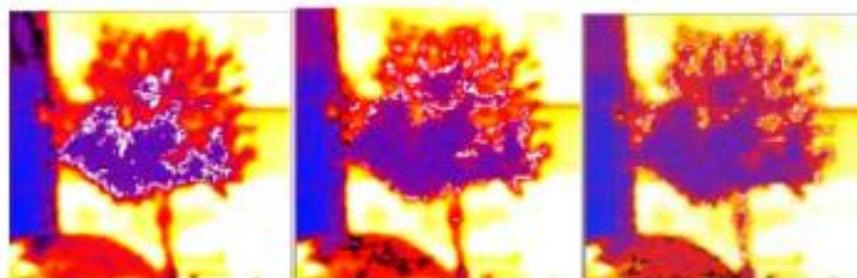


Figure 4.23 : Température de surface d'un arbre. Ligne blanche = isothermes de 27, 28 et 29°C. Source : Alvarez et al., (2000) cité dans Vinet (2000).

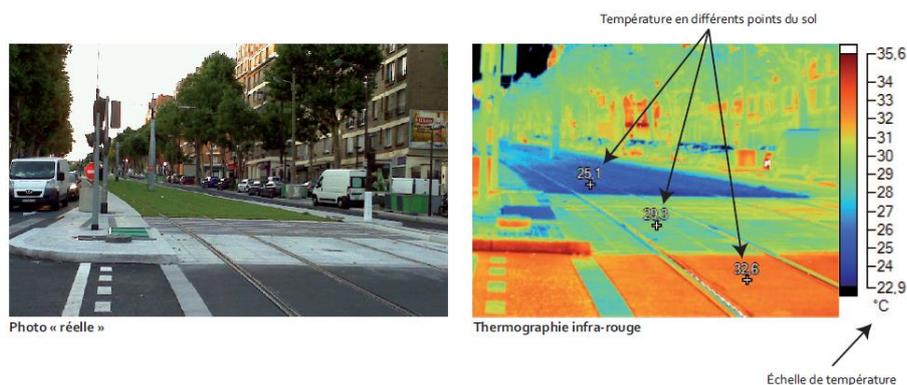


Figure 4.24 : Différence de température de surface du gazon et des surfaces asphaltées. Source : Apur (2012).



Figure 4.25 : Différence de température de surface du gazon et des surfaces pavées. Source : Apur (2012).

#### 4.4.1.3. Écoulements aérauliques

Le végétal est très utilisé pour son effet de brise-vent. En hiver, les arbres à feuillage persistant peuvent être placés comme écran contre les vents dominants froids (généralement de direction nord, figure 4.26). Les haies ou les écrans végétaux doivent être de dimensions suffisantes et d'une grande résistance mécanique. La protection de la façade nord du bâtiment permet des gains énormes en chauffage (Knight et al., 2021 ; Wong et al., 2021 ; Saaroni et al., 2018 ; Redon, 2017 ; Musy, 2014). Les végétaux à feuillage caduc peuvent être employés pour canaliser les brises fraîches d'été vers les endroits souhaités. En milieu urbain, le végétal peut faire face aux vents violents. Les arbres et les arbustes en particulier, apportent une rugosité au sol et détournent les écoulements d'air dans les aménagements urbains afin d'améliorer le confort aux usagers de l'espace public (Louafi, 2013).

Dans les climats désertiques, les arbres contribuent à bloquer les vents chauds sachant que le vent du désert a un pouvoir asséchant.

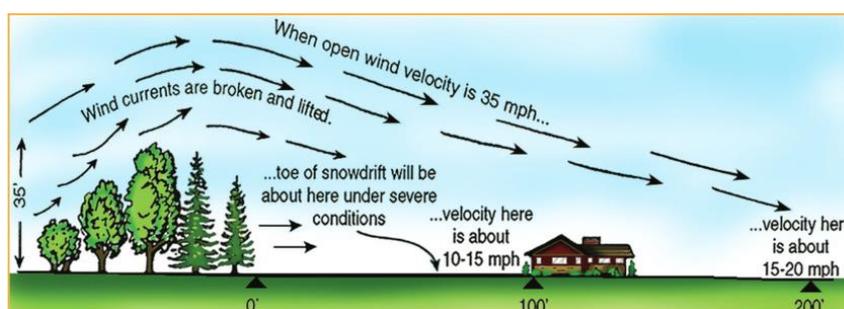


Figure 4.26 : L'effet brise-vent de la végétation. Source : Schalau (2018)

#### 4.4.1.4. Apport de la télédétection dans l'étude du rôle du végétal sur le microclimat

Les données de télédétection sont devenues incontournables dans l'étude de l'effet du végétal urbain dans l'atténuation de l'ICU à plus grande échelle (Westendorff, 2020).

La végétation est détectée grâce à ses caractéristiques spectrales propres notamment sa réflexion dans la bande de l'infrarouge. La température de surface des végétaux est généralement nettement plus faible que les autres surfaces minérales de l'espace urbain (figure 4.27 et figure 4.28) (AUDAB, 2021). Les cartographies thermiques issues des images satellites sont de plus en plus utilisées dans l'étude des effets thermiques de la végétation urbaine.

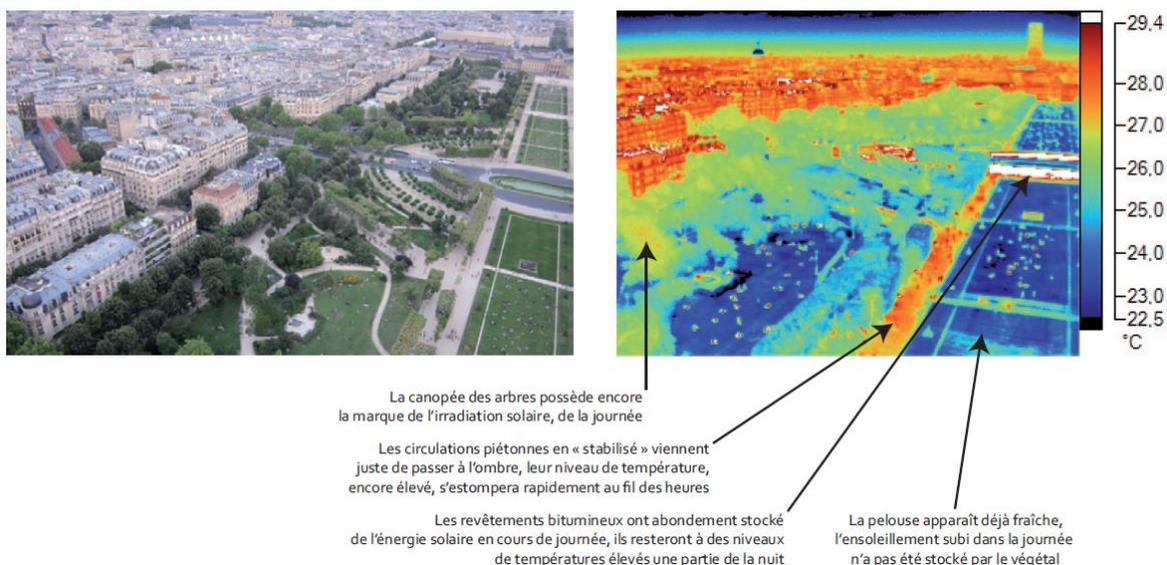


Figure 4.27 : Différence de température entre surfaces végétales et minérales. Vues aériennes sur le Champs-de-Mars vers 20h peu après le coucher du soleil. Source : Apur (2012).

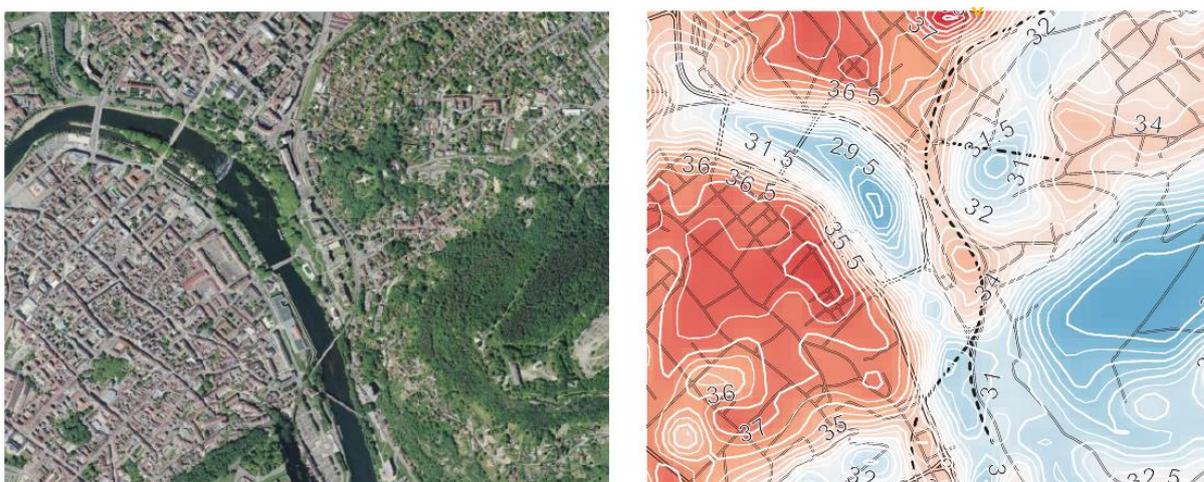


Figure 4.28 : L'influence de l'eau et de la végétation dans la lutte contre l'ICU. (Données Landsat 8, 2019). Exemple d'un quartier à Besançon, France. Source : AUDAB (2021).

## 4.5. Synthèse bibliographique : Impact du végétal sur le microclimat urbain

L'effet microclimatique de la végétation est l'effet combiné de l'ombrage, de l'évapotranspiration et de l'effet aéraulique. L'atténuation des températures d'air et de surface dans les espaces extérieurs correspond au cumul de ces trois facteurs. (Kraemer et Kabisch, 2022 ; Xiao et al., 2022 ; Yang et al., 2022 ; Du et al., 2021 ; Knight et al., 2021 ; Wong et al., 2021 ; Kuang, 2020 ; Algretawee et al., 2019).

Un arbre modifie le microclimat dans son environnement immédiat. Il peut baisser la température d'air et augmenter l'humidité et réduire la vitesse du vent (De Abreu-Harbich et al., 2015). L'arbre représente l'élément végétal le plus efficace dans la lutte contre l'ICU (Marando et al., 2019 ; Norton et al., 2015 ; Park et al., 2012 ; Meier et Scherer, 2012 ; Shashua-Bar et al., 2012 ; etc.). Les études montrent que même un arbre isolé peut rafraîchir le microclimat (Streiling et Matzarakis, 2003 ; Souch et Souch, 1993). Des chercheurs montrent que l'effet rafraîchissant des arbres varie entre 1.5 et 3 °C en été dans le climat désertique (Potchter et al., 2010). L'effet refroidissant des arbres dépend de plusieurs facteurs comme la taille ou la quantité, le LAI (Leaf Area Index), la géométrie de la canopée, etc. (Gal, 2014). Des recherches récentes se sont focalisées sur l'évaluation de l'effet de rafraîchissement de la végétation à l'échelle horizontale et verticale ; en d'autres termes sur l'effet 3D de la végétation (Tan et al., 2022). Les résultats montrent que pour tirer le maximum de confort thermique d'un parc, il faut opter pour une combinaison arbre-pelouse (tree-grass TG) car elle offre le plus grand effet rafraîchissant 3D (horizontal et vertical).

Pour qualifier l'effet de rafraîchissement de la végétation, certains chercheurs utilisent l'acronyme "CEI" (cooling effect intensity) ou "PCI" (Park Cool Island) (Chow et al., 2010 ; Spronken-Smith et Oke, 1998) et l'acronyme "CED" (cooling effect distance) pour l'étendue ou la distance de l'effet de rafraîchissement (Aram et al., 2019 ; Saaroni et al., 2018 ; Fung et Jim, 2017 ; Spronken-Smith et Oke, 1998).

Bowler *et al.*, (2010) rapportent un effet de refroidissement moyen de 0.94 °C d'après une méta-analyse sur 24 publications dans divers climats. Dans une autre analyse conduite sur 89 publications, Saaroni et al., (2018) rapportent que l'effet de refroidissement maximal (PCI max) varie entre 1.5 et 3.5 °C. Knight et al. (2021) rapporte une moyenne de 1.5 °C d'après leur revue de la littérature qui englobe 308 études. Dans une revue exhaustive sur l'impact microclimatique des espaces verts urbains, Aram et al.,

(2019) montrent que les grands couverts végétaux comme les parcs présentent l'effet de rafraîchissement le plus important et qu'il s'étend au-delà des limites du parc. Wong et al., (2021) ont analysé à leur tour un groupe de 30 études dans divers climats. Ils concluent que l'effet de rafraîchissement des parcs urbains est de 3 °C en moyenne, allant de 2 à 4 °C. En matière de température de surface l'effet rafraîchissant de la végétation est largement supérieur. Il peut aller de 9.2 à 19 °C, avec une moyenne de 14 °C.

Dans ce qui suit, nous allons passer en revue certaines recherches sur l'effet thermique du végétal urbain. L'impact microclimatique de la végétation sera examiné sous ses différentes formes.

Le type et la forme de l'espace vert urbain, le plus courant, correspond aux parcs urbains, aux squares, jardins, palmeraies, etc. Ce sont des couverts végétaux d'une taille relativement importante. Dans une recherche effectuée à Toronto, Canada, les parcs urbains sont plus frais de 4 °C par rapport aux secteurs commerciaux et industriels de la ville (Rinner et Hussain, 2011). Doick et al. (2014) rapportent un effet de refroidissement de 0.5 à 4 °C dans un grand parc à Londres. L'étendue de cette fraîcheur peut aller jusqu'à 400 m au-delà du parc. À Addis Ababa (Ethiopie), sur 21 espaces verts urbains, Feyisa et al., (2014) rapportent un effet de rafraîchissement (PCI) maximal de 6.72 °C et une étendue maximale de 240 m. Ren et al., (2013) ont observé un PCI maximal de 4.52 °C dans un parc à Changchun (Chine). Dans un parc au Japon, Cao et al., (2010) relatent un PCI maximal de 6.82 °C à Nagoya. Dans une étude, Pramanik et Punia (2019) ont constaté que la température d'air des sites végétalisés à Delhi (Inde) était de 3.14 °C inférieure à celle des sites bâtis sans végétation.

Une étude à New York, dévoile que les parcs urbains, les prairies urbaines, et les quartiers densément végétalisés sont en moyenne plus frais que les sites à faible végétation (Susca et al., 2011). L'étude de Cui et Foy (2012) à Mexico City montre que le végétal urbain pourrait atténuer les températures d'air de 2 à 4 °C et les températures de surface de 0 à 3 °C. La végétation, à elle seule, peut réduire l'intensité de l'ICU de 50 %. Dans leur étude à Kuala Lumpur et Hong Kong, Aflaki et al. (2017) montrent que les espaces verts réduisent de 4.5 °C la température d'air et la température radiante moyenne.

Au sein d'un parc à Lisbonne, l'effet de refroidissement a atteint 6.9 °C dans une journée chaude d'été (Oliveira et al., 2011). Dans une étude sur un parc urbain à Athènes, il a été trouvé une forte corrélation entre la vitesse du vent et le PCI (Skoulika et al., 2014). Le PCI max diurne relevé est de 2.8 °C, et l'effet de refroidissement peut s'étaler jusqu'à

300 m. Fung et Jim (2017) ont évalué le PCI dans un vaste terrain de golf à Hong Kong. Le terrain est caractérisé par de larges étendues de gazon exposées au soleil et des couverts arborés. Le PCI maximal de 2.97 °C a été relevé dans le site arboré ce qui souligne l'importance de l'ombre sur l'effet régulateur de la végétation.

Par temps calme et sous des conditions anticycloniques, l'air frais du parc se déplace à l'extérieur vers les espaces bâtis. Certains chercheurs appellent ce phénomène « la brise du parc » (Irie, 2022 ; Oshio et al., 2021 ; Gunawardena et al., 2017). La brise de parc résulte en effet du gradient de pression entre l'air frais du parc et l'air chaud des espaces bâtis adjacents (Sugawara et al., 2016 ; Oshio et al., 2021).

Cohen et al., (2012) ont relevé un PCI maximal de 3.8 °C en été à Tel Aviv, mais il peut arriver à 4.5 °C en période de canicule. Le PCI en hiver était de 2.5 °C. Cependant, les chercheurs estiment que le rafraîchissement induit par la végétation en été l'emporte sur la réduction de la température d'air en hiver. Dans un climat chaud et humide, une forêt au Brésil peut être jusqu'à 3 °C plus fraîche que les zones bâties limitrophes (Amorim et Leder, 2012).

L'effet de rafraîchissement du parc urbain peut être variable au sein d'un même parc. Un couvert végétal peut être composé de plusieurs types d'aménagement : sentiers et cheminements pavés, étangs et plans d'eau, surfaces enherbées, surfaces arborées, massifs fleuris, espèces végétales variées, etc. (Morakinyo et al., 2020). Venhari et al., (2017) considèrent que l'effet et l'étendue de rafraîchissement des espaces verts sont affectés par certains paramètres tels que : l'indice de taille (Size index), l'indice de forme (Shape index), le taux de végétalisation, le type ou l'espèce végétale, la vitesse du vent, la densité du bâti, la topographie et le relief de la ville, etc.

Alexandri et Jones (2008) considèrent que plus le climat est chaud et aride, plus l'effet de la végétation est important. De surcroît, plus les radiations solaires sur une surface sont intenses, plus elle est froide quand elle est protégée par la végétation. Le travail de Perini et Magliocco (2014) conforte aussi ces conclusions. Dans la ville chaude du Caire, il a été trouvé que la température d'air dans les quartiers végétalisés est inférieure de 6 °C, durant le jour, par rapport aux quartiers sans végétation (AboElata, 2017) (figure 4.29). L'auteur attribue ce rafraîchissement essentiellement à l'ombre des canopées. Durant la nuit, en revanche, les quartiers végétalisés sont plus chauds à cause de l'effet de piégeage de la chaleur sous la canopée des arbres. Dans la ville de Mendoza (Argentine), l'effet rafraîchissant maximal d'un parc urbain a été de 4 °C, enregistré la nuit. La

fraîcheur du parc gagne les quartiers limitrophes dans la ville de Mendoza, jusqu'à 1000 m (Puliafita et al., 2013).

Cependant plusieurs chercheurs ont aussi constaté que la végétation urbaine entrave le refroidissement nocturne en piégeant l'air chaud sous la canopée des arbres (Sofer et Potchter, 2006). A noter aussi que les végétaux dans les climats chauds et arides nécessitent souvent une irrigation régulière et une protection contre les vents chauds et secs. Les températures estivales extrêmes exposent les végétaux au stress hydrique qui affecte leur pouvoir humidifiant.

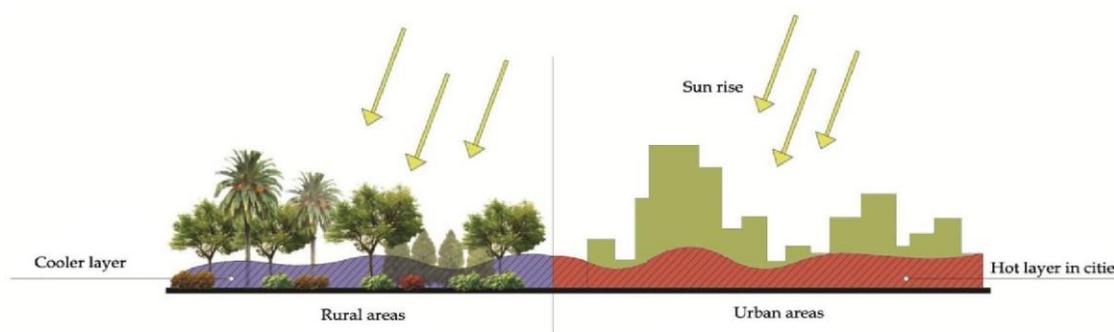


Figure 4.29 : les couverts végétaux étendus présentent des températures plus fraîches.  
Source : AboElata (2017)

Il existe plusieurs systèmes de murs végétaux qui diffèrent dans le type des supports de fixation, des procédés de plantation, etc. (Manso et Castro-Gomes 2015). Les façades vertes ou les murs végétaux contribuent à la réduction de la consommation de l'énergie de climatisation à l'intérieur des bâtiments. Pérez et al., (2014) affirment dans leur étude sur de nombreuses recherches que la température de la face externe des murs des bâtiments peut être réduite de jusqu'à 15 °C. La température d'air peut être diminuée de 3°C aux abords d'un mur végétal (Cameron et al., 2014). De surcroît, la température de surface derrière la végétation est plus froide de 9.9°C par rapport au mur sans végétation. Les murs végétalisés "vivants", en particulier, peuvent apporter des gains énormes en matière de température de surface externe. La réduction peut aller à 28 °C à Shanghai (He et al., 2017). Dans un contexte semi-aride, la baisse de température de surface peut aller jusqu'à 30 °C (Victorero et al., 2015).

Les toitures végétales agissent directement sur la réduction des températures de surface en ville en réduisant les surfaces minérales à forte absorption de chaleur (Suszanowicz et Wiecek, 2019). L'effet rafraîchissant des toits verts n'est pas limité aux toits mais peut s'étendre jusqu'au niveau des piétons (Peng et Jim, 2013). A Toronto,

Canada, les toits verts contribuent à réduire la température d'air en milieu urbain de 0.4°C (Berardi, 2016). Une étude de simulation à Chicago (USA) montre que les toits verts pourraient réduire la température d'air de 3 °C à l'échelle de la ville (Smith et Roebber, 2011). Peng et Jim (2013) ont obtenu une réduction de température d'air niveau des piétons de 0.4 à 0.7°C pour un toit extensif (faible épaisseur du substrat, végétation basse), et de 0.5 à 1.7 °C pour un toit vert intensif (importante épaisseur du substrat, grande variété de végétaux). Une revue de la littérature documente que les toits verts participent à la réduction de l'îlot de chaleur de 0.3 et 3 °C (Santamouris, 2014). Ainsi, la multiplication des toitures végétales est recommandée dans la stratégie globale contre le réchauffement urbain et planétaire (Razzaghmanesh et al., 2016). La performance des toits verts dépend de plusieurs facteurs tels que le climat, l'espèce végétale, la nature du substrat, l'irrigation, entre autres (Shahmohammad et al., 2022). Les recherches s'accordent sur le fait que le LAI (Leaf Area Index) plus précisément, joue un rôle déterminant dans l'effet de rafraîchissement (da Cunha et al., 2021 ; Tadeu et al. 2021 ; Samah et al., 2020 ; Zhou et al., 2018).

Certaines études indiquent que plus l'espace vert est grand, plus le PCI est important (Chen et al., 2011 ; Bacci et al., 2003 ; Jauregui, 1991 ; Barradas, 1991). Wu et al., (2017) rapportent que l'impact des espaces verts sur la température et l'humidité de l'air est lié à leur taille. Néanmoins, Doick et Hutchings (2013) considèrent que l'effet de refroidissement des espaces verts d'une taille inférieure à 0.05 km<sup>2</sup> est négligeable. Dans une étude sur plusieurs villes européennes, Marando et al. (2022) concluent qu'un couvert végétal d'au moins 16 % est nécessaire pour aboutir à une réduction de 1 °C de la température moyenne en été. Dans une autre recherche par télédétection, Kong et al. (2014a) estiment que l'augmentation de 10 % dans le couvert végétal en ville se traduirait en une réduction de 0.83 °C dans la température de surface. Saaroni et al., 2004). Middel et al. (2015) estiment qu'une augmentation du couvert végétal en ville de 10 % à 25 % pourrait faire baisser la température d'air de 2 °C à Phoenix (Arizona, USA), une ville connue par son climat extrêmement chaud et aride.

Certaines études ont analysé l'effet rafraîchissant des espaces verts par l'estimation des niveaux du confort thermique au sein et à l'extérieur de l'espace vert. Dans la ville du Caire, Mahmoud (2011) montre à travers une simulation par le programme « ENVI-met » qu'un parc de 26 ha peut améliorer le confort thermique en été entre 22 et 30 °C. Abaas (2020) a montré à l'aide de l'outil ENVI-met que la végétation urbaine impacte

grandement le confort thermique dans la ville chaude et aride de Bagdad. Du et al. (2021) ont étudié l'effet de la forme de l'espace vert urbain sur le niveau de refroidissement et d'humidification à travers l'application de l'indice de confort thermique "THI" (Temperature Humidity Index) à Shanghai (Chine). Les résultats sur 35 espaces verts montrent que la valeur de THI décroît significativement quand on s'éloigne de l'espace vert. Contrairement à certaines études, les auteurs relatent que la surface du parc n'a pas un grand effet sur le confort thermique. L'effet de refroidissement des parcs varie de 2.1 à 3.1 °C. Quant à l'effet d'humidification, il est relativement faible et varie de 1.8 % à 3.8 %.

Les recherches dans les climats chauds et arides montrent que la végétation joue un rôle déterminant dans la réduction du stress thermique (Matallah et al., 2020 ; Taleb et Taleb 2014 ; Potchter et al., 2013 ; Potchter et al., 2010 ; Mahmoud, 2011 ; Chow et al., 2010 ; BenShalom et al., 2009 ; Rosheidat et al., 2008 ; Sofer et Potchter, 2006 ; Correa et al., 2006).

Wang (2012) et Alkhatib et Qrunfleh (2018) ont trouvé que les effets de refroidissement et d'humidification varient selon les types et les espèces de végétaux. Leurs résultats corroborent les travaux de Kotzen (2003) sur l'effet des espèces sur l'effet de rafraîchissement dans le désert de Néguev. L'effet modérateur de la végétation peut varier aussi d'une saison à l'autre (Willemen, 2020). La topographie joue aussi sur l'intensité et l'étendue de l'effet rafraîchissant des espaces verts. Hamada et al. (2013) ont analysé la température de surface d'un parc urbain à partir de données satellites. Le parc étant situé sur une colline, les chercheurs ont constaté que l'effet de pente accentue le débordement de la fraîcheur vers les quartiers environnants. Yang et al. (2022) considèrent aussi qu'une bonne organisation de l'espace vert accentue l'effet de refroidissement. Ainsi, leur recherche suggère que la diminution de l'espacement entre les arbres augmente le taux de confort thermique. Ce qui corrobore les conclusions de Park et al. (2017) et Sodoudi et al. (2018). La densification de l'espace vert, sa délimitation et sa protection contre le vent par des bâtiments, constitue une recommandation bien adaptée aux climats chauds et arides (Alexandri et Jones, 2008).

Certaines recherches se sont appuyées sur la télédétection dans le but d'étudier l'effet de rafraîchissement des espaces verts et de son étendue au-delà des limites des aires des couverts végétaux. Le travail consiste en la prise d'images thermiques infrarouges (thermal infrared TIR). Les moyens utilisés peuvent être des caméras portatives pour des

champs restreints ou des avions ou satellites pour de larges étendues (Coutts et al., 2016 ; Weng, 2009). La télédétection aéroportée et spatiale offre la mesure de la température de surface au sol LST (Land Surface Temperature) de toute la zone urbanisée. La végétation en milieu urbain présente des températures de surface faibles (Gherraz et al., 2020). En analysant les images thermiques des satellites ASTER et IKONOS pour 92 parcs urbains à Nagoya (Japon), il a été rapporté un PCI maximal de 6.82 °C (Cao et al., 2010). A partir des données de Landsat-8, la température de surface LST de la ville de Rome (Italie) a été analysée (Marando et al., 2019). Les chercheurs notent une corrélation entre les couverts arborés et les îlots de fraîcheurs à travers la ville. Ils concluent que les arbres sont un moyen efficace dans la lutte contre l'ICU. Les recherches effectuées sur toute la ville par télédétection spatiale indiquent aussi qu'il y a une corrélation négative entre le couvert végétal et la température de surface LST (Rinner et Hussain, 2011 ; Li et al., 2011). Dans une étude réalisée dans la ville désertique de Phoenix (USA), Myint et al. (2010) ont analysé les relations entre les surfaces vertes et les surfaces imperméables à travers les données de Landsat ETM+. Ils ont trouvé que les espaces verts réduisent grandement la température de l'air. Les emplacements de stationnement dans les parkings influencent beaucoup le développement de l'ICU. La végétalisation des parkings réduit considérablement la température de surface et participe à la réduction de la température de l'air. Sur un seul emplacement de parking, Onishi et al. (2010) estiment que la végétalisation des stationnements peut réduire la température de surface jusqu'à 7.26 °C en été. La préservation de la foresterie urbaine est vitale pour la lutte contre l'ICU. Une étude au Texas (États-Unis), a montré que les quartiers qui ont appliqué un plan de protection des arbres sont 7.1 °C (LST) plus frais que ceux qui n'en ont pas appliqué (Sung et al., 2013).

## Conclusion de la partie 1

A l'issue de cette première partie il apparaît que les zones chaudes et arides sont les plus vulnérables aux vagues de chaleur. Les études climatiques en Algérie montrent que les températures de l'air sont en hausse et la consommation de l'énergie de climatisation continue d'augmenter. Dans cette partie il a été abordé le phénomène de l'îlot de chaleur urbain, son mécanisme de formation et ses différents effets. Chaque type d'ICU a sa propre méthode de mesure. L'ICU de l'air est mesuré à travers des mesures in situ tandis que l'ICU de surface nécessite la mesure de la température de surface (LST). La télédétection spatiale et la cartographie de la zone d'étude nécessitent une succession de traitements et de calculs. La résolution de l'image numérique des satellites est déterminante pour une bonne caractérisation de l'ICU de surface. Les données du capteur Landsat-8 sont exploitées pour la réalisation de la carte thermique dans cette étude. Quant à la carte d'occupation du sol, les images du capteur Sentinel-2 présentent une résolution de 10 m. semblent bien adaptées à la thématique urbaine et l'étude de la végétation urbaine. L'effet microclimatique de la végétation est l'effet combiné de l'ombrage, de l'évapotranspiration et de l'effet aéraulique. L'atténuation des températures d'air et de surface dans les espaces extérieurs correspond au cumul de ces trois facteurs. L'indice de confort sélectionné pour la présente recherche est le THI (Temperature-Humidity Index). Il est parmi les indices les plus utilisés dans l'évaluation du stress thermique dans les zones chaudes et arides.

## **PARTIE 2 : INVESTIGATION**

## **Introduction de la partie 2**

Dans cette seconde partie de la thèse nous allons présenter la méthodologie adoptée pour la recherche, l'analyse et la discussion des résultats. Le cinquième chapitre présente une description générale de la zone d'étude : son climat, sa géographie, ses caractéristiques morphologiques, la géométrie du bâti, la végétation, etc. Il décrit la méthodologie employée, les outils et instruments utilisés pour chaque type de mesure. Les processus d'acquisition et de traitement numérique des images satellitaires y sont détaillés. Le sixième chapitre présente l'étude de la variation de l'îlot de chaleur de l'air dans la ville de Ghardaïa. L'effet de rafraîchissement de la végétation PCI est calculé et analysé ainsi que l'évaluation des niveaux de confort thermique dans les espaces publics dans la ville de jour comme de nuit. L'interprétation des résultats du confort thermique s'appuie sur les catégories établies dans l'échelle de valeurs de THI. Les résultats de l'étude de l'îlot de chaleur de surface sont exposés et interprétés dans le dernier chapitre. La répartition du couvert végétal est évaluée à partir d'indices de végétation. Une étude de corrélation a été effectuée entre la température de surface LST et les différents indices. L'accent a été mis sur la relation entre la végétation et la distribution de l'îlot de chaleur de surface.

## **CHAPITRE V**

# **MÉTHODOLOGIE, DONNÉES ET ZONE D'ÉTUDE**

## 5. MÉTHODOLOGIE, DONNÉES ET ZONE D'ÉTUDE

### 5.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les zones et périmètres d'étude pour l'îlot de chaleur atmosphérique et l'îlot de chaleur de surface. Le protocole de mesure des paramètres microclimatiques obtenus lors de la campagne de terrain sera détaillé ainsi que la description des caractéristiques de chaque point de mesure. Les données et images satellitaires utilisées pour l'extraction de la température de surface seront présentées.

### 5.2. Mesures de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique

#### 5.2.1. Présentation de la ville et la zone d'étude

L'étude a été réalisée dans la ville de Ghardaïa, dans la vallée du M'zab. La ville est située au nord du Sahara à 600 km au sud de la capitale Alger (coordonnées géographiques : Latitude : 32°29'27" Nord, Longitude : 3°40'24" Est) (figure 5.1). La région du M'zab est connue par ses fameux ksour classés au patrimoine mondial par l'UNESCO depuis 1982. La vallée du M'zab se trouve dans un grand plateau, caractérisé par des escarpements rocheux, appelé la Chebka (filet en arabe). Elle est caractérisée par un climat désertique saharien, chaud et aride. Ce climat est codé par (Bkw) selon la classification de Koppen (Chen et Chen, 2013 ; Peel et al., 2007). Il est caractérisé par des hivers doux et des étés chauds et secs. Les précipitations y sont très faibles d'une moyenne de 60 mm par an et le nombre de jours de pluie se situe entre 11 et 15 jours par an (ONM, 2016 ; Bouchair, 2004). En été, la température moyenne de l'air est de 35°C (en juillet), avec un minimum de 27°C. Les températures maximales dépassent souvent les 45°C. La température moyenne en hiver est de 10°C (janvier) avec un maximum de 20°C et un minimum de 3°C. Les vents dominants à Ghardaïa en été sont de direction Est avec une moyenne de 13 km/h et un maximum de 29 km/h. Ils sont de direction Nord-Ouest en hiver, avec une vitesse moyenne de 12 km/h et un maximum de 29 km/h. Le ciel est généralement clair avec une forte irradiation solaire (ONM, 2016 ; Bouchair, 2004). L'aire d'étude de l'îlot de chaleur atmosphérique couvre les quartiers du centre-ville de Ghardaïa, lieu de concentration des activités pratiquées dans les espaces publics (figure 5.5).

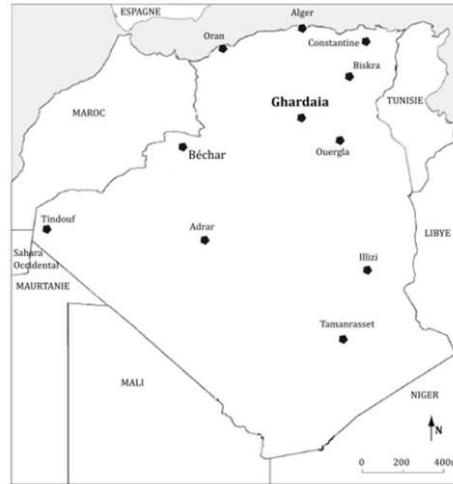


Figure 5.1: Situation de la ville de Ghardaïa. Source : Bensalah et al. (2018).

### 5.2.2. Caractéristiques morphologiques et architecturales de la ville de Ghardaïa

Le territoire géomorphologique de la zone de Ghardaïa est dominé par un plateau calcaire, où l'Oued M'zab traverse la vallée d'Ouest en Est. Les cinq villes du M'Zab sont implantées sur des pitons rocheux surplombant le cours d'eau (Benyoucef, 2010) (figure 5.2) afin de conserver les terres arables pour les cultures (Benyoucef, 1986). Chaque palmeraie est rattachée à son ksar (figure 5.3 et 5.4). L'oasis était un lieu de subsistance et un havre de fraîcheur pour les habitants du ksar. Elle constitue un élément vital dans l'écosystème dans la vallée du M'zab (Côte, 2005).

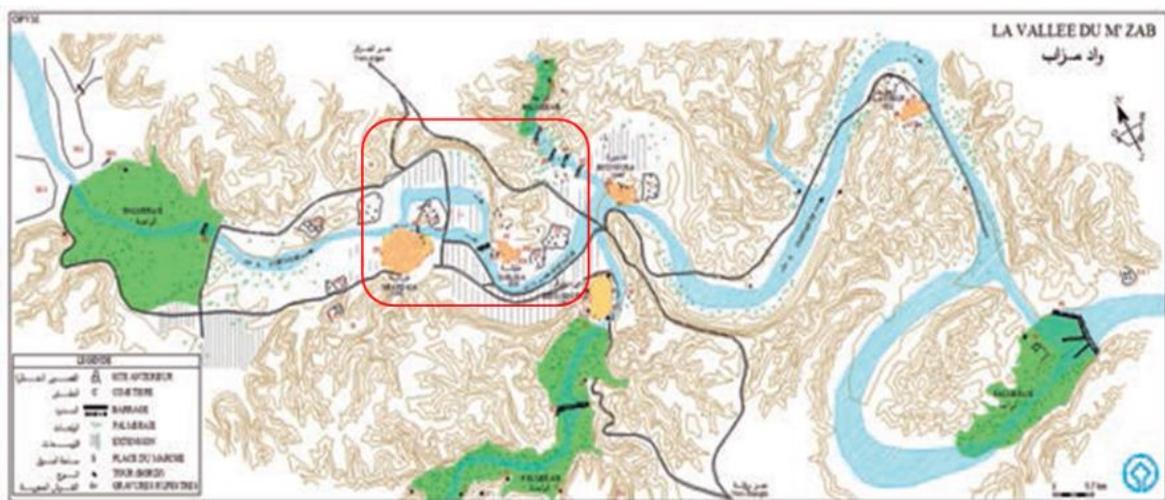


Figure 5.2 : La vallée du M'zab (d'après OPVM, 2012). (Le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude)

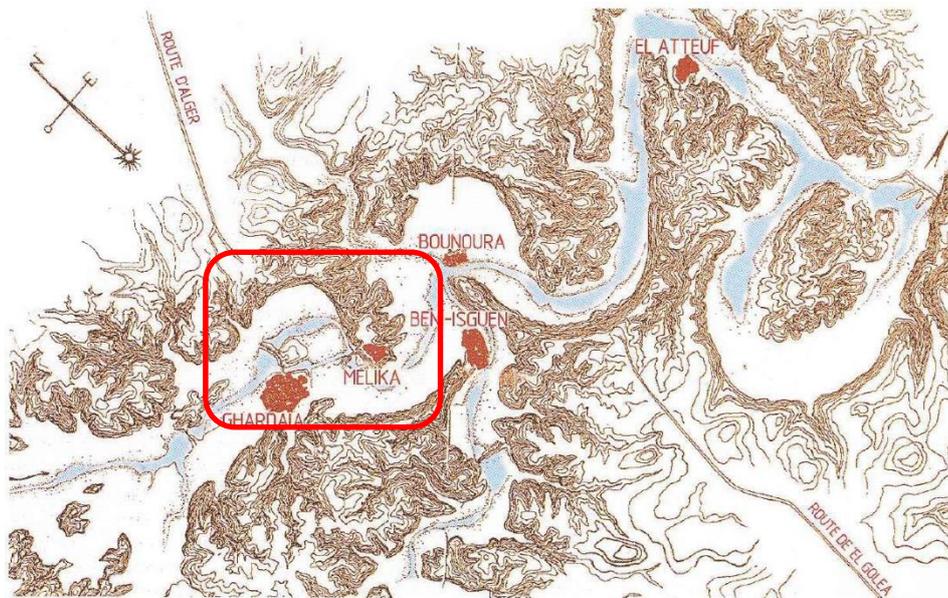


Figure 5.3 : Morphologie originale de la vallée du M'zab (le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude). (D'après Ravereau et al., 2003).

Le ksar se caractérise par un tissu compact dicté par la rigueur du climat et les besoins de la vie en communauté. Les habitations épousent la pente de la colline. Elles se développent autour d'une pièce centrale dotée d'une ouverture zénithale appelée « Chebek ». Cette dernière assure l'aération et l'éclairage dans la maison. L'habitation traditionnelle se développe, en générale sur deux niveaux. Les habitants du ksar pratiquent un nomadisme vertical-quotidien qui varie selon la saison en se déplaçant d'un niveau à un autre. Les habitants occupent le rez-de-chaussée durant la journée et la terrasse fraîche durant la nuit en été. Tandis qu'en hiver, ils vivent sur la terrasse ensoleillée durant la journée, et ils passent la nuit au rez-de-chaussée. Le patio joue ainsi le rôle de régulateur thermique. Les habitants qui possèdent des résidences d'été dans la palmeraie pratiquent un autre nomadisme saisonnier. Ils passent tout l'été dans l'oasis et retournent au ksar en hiver (Adad et Mazouz, 2013 ; Nouibat et Tacherift, 2007). Le système des rues et ruelles suit un schéma radioconcentrique. Les ruelles étroites présentent un profil profond et les habitations sont collées les unes les autres en raison de la rudesse du climat. Par conséquent, les maisons qui sont construites en pierre locale ont peu de surfaces exposées au soleil.

Les extensions contemporaines extra-muros n'obéissent pas à ce modèle urbain ancestral (Côte, 2002). En raison de la circulation automobile, les voies y sont plus larges. La ville traditionnelle constitue une entité totalement minérale sans végétation. Elle est

construite sur un piton rocheux. Les extensions contemporaines par contre, ont connu l'aménagement de plusieurs jardins et d'autres formes d'espaces verts.



Figure 5.4: Vue aérienne sur le ksar de Ghardaïa. Source : Arthus-Bertrand (2014).

### 5.2.3. Méthodes

Un parcours urbain jalonné de 22 sites de mesure serpentant la ville de Ghardaïa a été défini (figure 5.5). Les sites choisis sont représentatifs des caractéristiques urbaines et végétales de la ville. Si l'accent a été mis plus particulièrement sur les sites végétalisés afin de quantifier l'effet du végétal, d'autres critères de choix concernent la diversité de l'ouverture au ciel (site dense fermé/site ouvert) ou la fréquentation des sites choisis (tableau 5.1). Les points de mesure sont parcourus par un véhicule afin de relever les paramètres climatiques. Le parcours urbain avait une durée de 20 minutes en moyenne. Le tour des sites commence par le site de référence (Moussalla Moustadjeb PT01) et fait une boucle en passant par tous les points de mesure. Le parcours urbain permet de dévoiler les variations microclimatiques entre sites dans la ville (Chebli et al., 2020 ; Ghribi et Dahech, 2020 ; Sharifi *et al.*, 2017 ; Zoulia *et al.*, 2009).

La campagne de mesure s'étalait du 27 juillet jusqu'au 04 août 2015. La période a été caractérisée par des températures extrêmes. Les données mesurées sont : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. La prise de mesure est effectuée à 1.5 m du sol trois fois par jour, soit 27 mesures pour chaque site :

- À 05:00 h à l'aube où les températures nocturnes sont les plus faibles.

- À 14:30h, au milieu de journée. C'est l'heure de fin des activités notamment dans le secteur du bâtiment.
- À 00:00h, c'est le moment de la fermeture des commerces. La majorité des activités urbaines nocturnes cessent. Les habitants de Ghardaïa passent la nuit à l'extérieur (cours ou jardins) ou sur les terrasses des habitations.

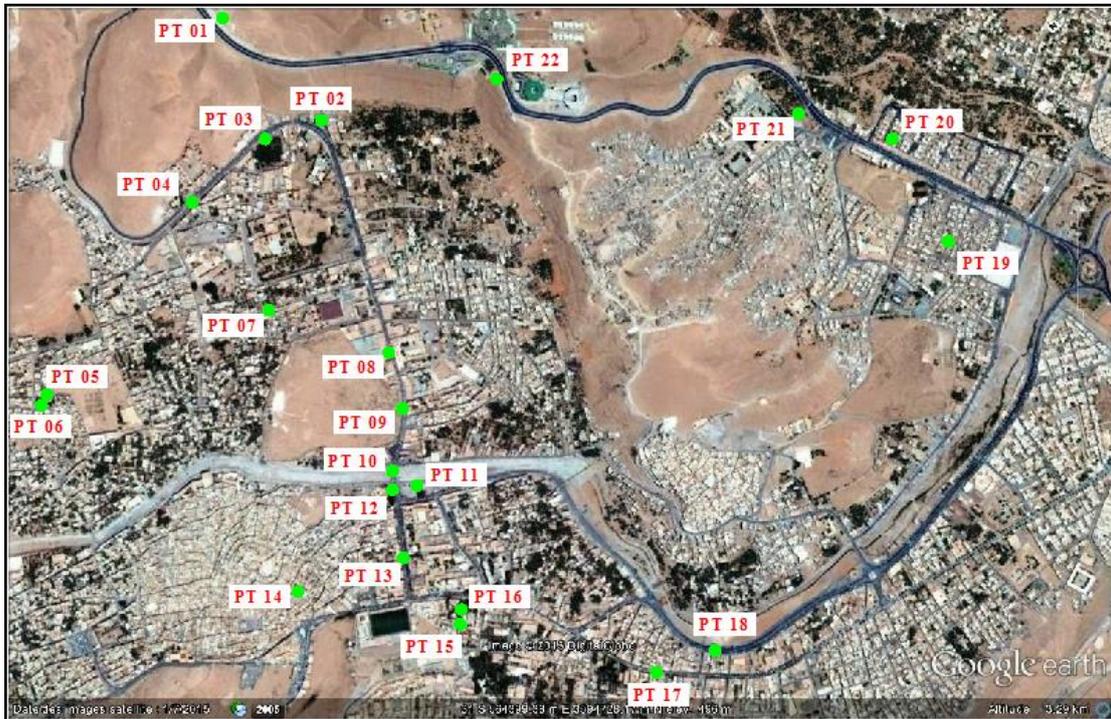


Figure 5.5 : Les points de mesure dans le long du parcours urbain (fond de carte : GoogleEarth)

Les mesures ont été réalisées par un appareil thermomètre-anémomètre « testo 415 » (de 0 à 50°C, de 0 à 10 m/s), en plus d'un appareil multi-fonction mesurant la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Quant au rayonnement solaire, il a été relevé à l'aide d'un pyranomètre (ST-1307). Les instruments étaient calibrés et protégés du rayonnement direct. Les données de la campagne de mesure sur toute la période de mesure ont permis de calculer les valeurs moyennes de chaque paramètre.

Le point du Moussalla Moustadjeb (PT01) constitue le site de référence. Il est situé en dehors de l'agglomération de Ghardaïa, sur un plateau en haut de la colline tandis que les autres sites urbains sont situés dans la ville en contrebas dans la vallée (figure 5.6 et tableau 5.1).

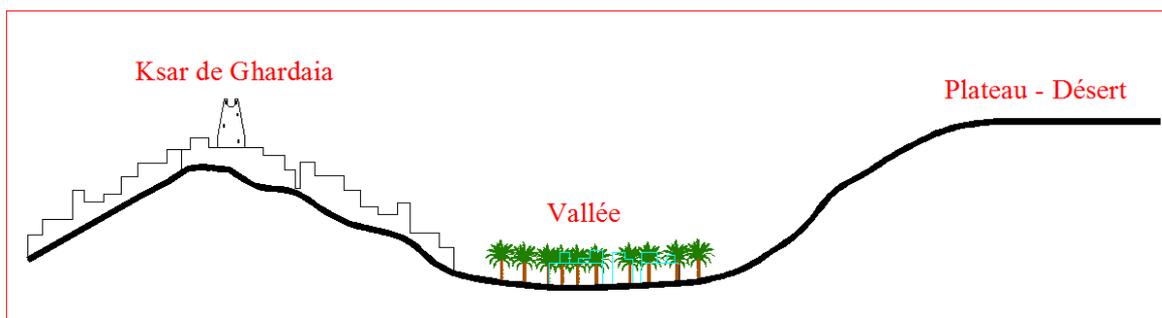
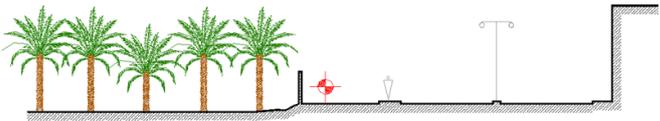
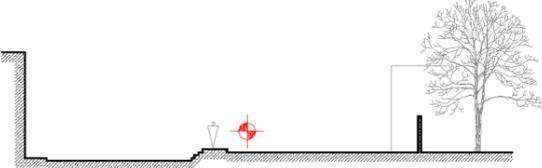
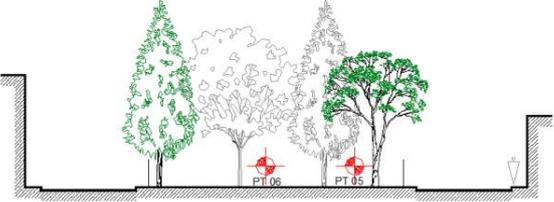


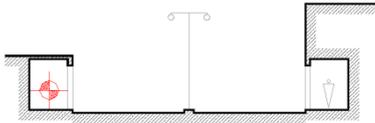
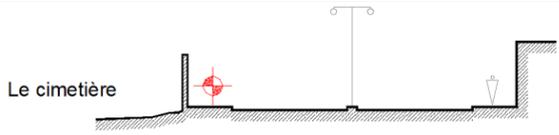
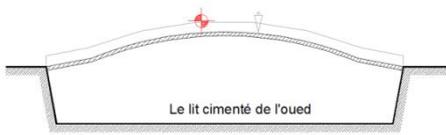
Figure 5.6 : profil schématique sur la zone d'étude. (Source : Auteur)

L'intensité de L'ICU et l'IFU est calculée par la différence entre la température d'air du site de référence le PT 01 et des sites de mesures en ville (Potchter et al., 2010). Quant au PCI (Park Cool Island PCI, ou l'effet de rafraîchissement de la végétation), il est calculé par l'écart de température entre le site végétalisé et le site de référence ou par rapport à un autre site urbain sans végétation (Saaroni et al., 2018 ; Bowler et al., 2010).

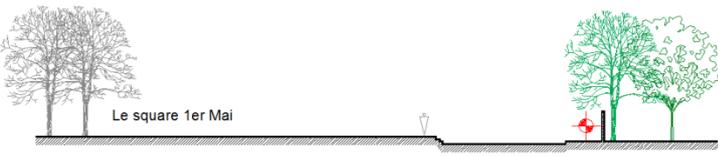
Tableau 5.1: Description des sites de mesure (photos et profil).

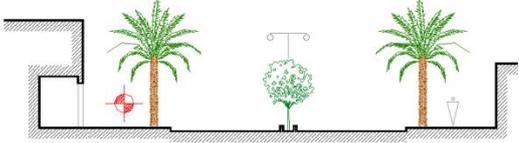
Numéro du point de mesure	Photos et profil du site de mesure	Description
PT 01	<p>Moussalla Moustadjeb</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Désert</li> <li>- Très Large SVF</li> </ul>
PT 02	<p>Registre de commerce</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic faible</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Administration</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Large SVF</li> </ul>

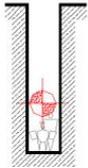
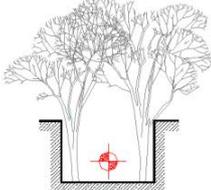
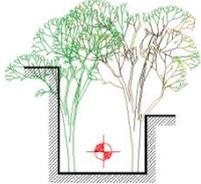
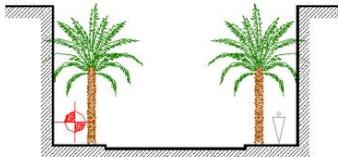
<p>PT 03</p>	 <p>Camping M'zab</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Végétation dense dans le camping</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Orientation NE/SO</li> <li>- Administration/loisir</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Large SVF</li> <li>- Le jardin n'est pas irrigué régulièrement</li> </ul>
<p>PT 04</p>	 <p>Cimetière des martyrs</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Très faible végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Large SVF</li> </ul>
<p>PT 05 PT 06</p>	 <p>Jardin de Mermed</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic moyen</li> <li>- Végétation dense</li> <li>- Résidentielle/loisir</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Large SVF</li> <li>- PT 05 est sous la canopée</li> <li>- PT 06 point au soleil</li> </ul>
<p>PT 07</p>	 <p>Rue Zoubiri Zoubir</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic faible</li> <li>- Très faible végétation</li> <li>- Résidentielle</li> <li>- Orientation E/O</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Tissu contemporain</li> </ul>

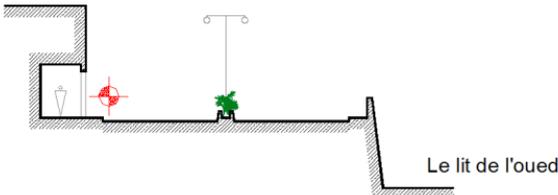
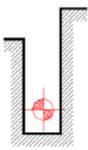
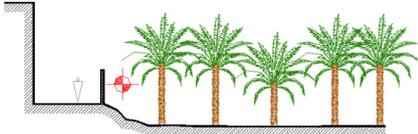
<p><b>PT 08</b></p>	  <p>Galerie Didouche Mourad</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Orientation NE/SO</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu contemporain</li> </ul>
<p><b>PT 09</b></p>	 <p>Le cimetière</p> <p>Boulevard Didouche Mourad</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Orientation NE/SO</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Large SVF</li> </ul>
<p><b>PT 10</b></p>	 <p>Le lit cimenté de l'oued</p> <p>Pont de l'oued</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic très intense</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Très large SVF</li> </ul>

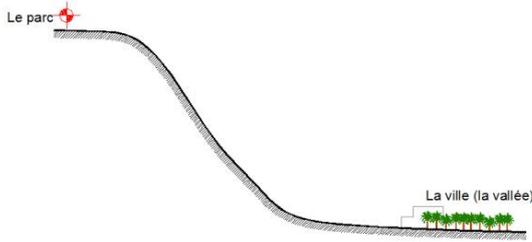
<p><b>PT 11</b></p>	 <p>Le lit cimenté de l'oued</p> <p>Le square 1 Mai</p> <p>Place 1er mai</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Faible végétation</li> <li>- Sol en pavé de béton</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Très large SVF</li> </ul>
---------------------	--	---

<p><b>PT 12</b></p>	 <p>Le square 1er Mai</p> <p>La CNAS</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Touffe d'arbres</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Très large SVF</li> </ul>
---------------------	---	--

<p><b>PT 13</b></p>	 <p>Boulevard Talbi Ahmed</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Trois rangées d'arbres</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu colonial</li> </ul>
---------------------	---	---

<p>PT 14</p>	  <p>Ruelle du ksar</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic : motocycle et piétons</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en ciment</li> <li>- Habitat traditionnel</li> <li>- Tissu vernaculaire</li> </ul>
<p>PT 15</p>	  <p>Rue Ibn Sina (ensoleillé)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic faible</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en béton</li> <li>- Administration/habitat</li> <li>- Tissu colonial</li> </ul>
<p>PT 16</p>	  <p>Rue Ibn Sina (sous la canopée)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic faible</li> <li>- Tunnel d'arbres</li> <li>- Sol en béton</li> <li>- Administration/habitat</li> <li>- Tissu colonial</li> </ul>
<p>PT 17</p>	   <p>Boulevard 1er Novembre</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Deux rangées de palmiers</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu colonial</li> </ul>

<p>PT 18</p>	 <p>Boulevard de l'indépendance (5 juillet)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Faible végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Activité commerciale</li> <li>- Tissu colonial</li> </ul>
<p>PT 19</p>	  <p>Cité 20 août 1956</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic piétonnier</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Habitations</li> <li>- Tissu contemporain</li> </ul>
<p>PT 20</p>	  <p>Cité 400 logements</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic faible</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Sol en asphalte</li> <li>- Habitations</li> <li>- Tissu contemporain</li> </ul>
<p>PT 21</p>	 <p>Palmeraie de Bounoura</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic piétonnier</li> <li>- Lisière de la palmeraie</li> <li>- Sol en ciment</li> <li>- Habitat/Équipements</li> <li>- Tissu contemporain</li> <li>- Cette parcelle dans la palmeraie n'est pas irriguée régulièrement.</li> </ul>

PT 22	 <p>Le parc</p> <p>La ville (la vallée)</p> <p>Parc de loisir "Oasis Kids"</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trafic intense</li> <li>- Pas de végétation</li> <li>- Parc de jeux (enfants)</li> <li>- Très Large SVF</li> </ul>
-------	--	---

Le point de mesure 

## 5.3. Mesures du confort thermique dans les espaces extérieurs

### 5.3.1. Présentation de la zone d'étude

Le calcul du confort thermique dans les espaces urbains est réalisé dans le périmètre d'étude de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique (figure 5.5, tableau 5.1). L'objectif est l'évaluation de l'ambiance thermique extérieure à travers les différents sites urbains, et en particulier les sites végétalisés.

### 5.3.2. L'indice du confort choisi

L'indice du confort thermique sélectionné est le Temperature-Humidity Index (THI), il est une version améliorée de Discomfort Index (DI). Le THI est calculé par l'équation 2.5 (voir chapitre II). Les données utilisées dans le calcul du THI sont tirées des paramètres climatiques de la campagne de mesure de l'îlot de chaleur urbain de l'air. L'échelle de confort de THI est présentée dans le tableau 2.1.

## 5.4. Mesure de l'îlot de chaleur urbain de surface via télédétection

### 5.4.1. Zone d'étude

Le périmètre d'étude de l'îlot de chaleur urbain de surface est plus large que celui de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique. Les images satellites permettent d'étudier la zone habitée de la vallée du M'zab dans sa totalité. Il est à noter que l'aire urbanisée dans la ville de Ghardaïa ne forme pas une seule zone « ramassée » mais plutôt plusieurs entités parfois dissociées. La ville a une emprise irrégulière et clairsemée et les zones urbanisées sont éparpillées sur une grande surface. Si le centre-ville présente une forme plus compacte et ramassée, plusieurs quartiers et parties de la ville sont implantés sur des plateaux séparés de ravins et d'oueds. Le relief de la zone a fait que la ville se développe en quartiers qui ne

sont pas rattachés spatialement. Le mode de croissance et de développement de la ville le long des axes routiers comme la RN1 (route nationale n 1) a conduit à un développement en forme de « taches » urbaines ou « tentacules ». C'est le cas notamment des quartiers de Bouhraoua au nord de la ville ou de la zone industrielle et de la zone des sciences où se trouvent la majorité des équipements sportifs, les instituts, l'université, les résidences universitaires. L'aéroport est proche de l'université et se situe au sud de la ville dans la zone de Noumérat qui comprend plusieurs équipements et quartiers résidentiels. L'essentiel des zones urbaines ainsi que les palmeraies sont inclus dans un périmètre de 37,35 x 33,72 km ce qui définit une surface totale de 1259,442 km<sup>2</sup> de l'aire d'étude dans l'image satellite.

## **5.4.2. Images satellitaires de Landsat-8 et traitement numérique**

### **5.4.2.1. Caractéristiques du capteur Landsat-8**

Landsat est un programme de télédétection spatiale de la NASA initié par les États-Unis destiné à des fins civiles. L'objectif du programme d'observation de la terre est de fournir de façon régulière des images à haute résolution. Landsat-1 a été lancé en 1972 et plusieurs satellites se sont succédés depuis, dont le Landsat-8 qui a été lancé courant 2013 (USGS, 2019). Deux instruments sont embarqués sur le satellite Landsat-8 (tableau 5.2) :

- Le capteur OLI (Operational Land Imager)
- Le capteur infrarouge thermique ou TIRS (Thermal Infra-red Sensor).

Landsat-8 offre des images d'une fauchée de 185 kilomètres. Les images du capteur OLI ont une résolution spatiale de 30 m, et celles du capteur de TIRS ont une résolution spatiale de 100 m (rééchantillonnée à 30 m par le fournisseur USGS). Landsat-8 présente aussi une bonne résolution temporelle car il compte deux passages par mois sur la même zone (tous les 16 jours) (USGS, 2019). En effet, il existe aujourd'hui plusieurs satellites qui fournissent des images thermiques autres que Landsat-8, tels que MODIS, Sentinel 3, etc. Néanmoins, ces satellites présentent des résolutions qui ne sont pas adaptées aux études urbaines (1000 mètres pour MODIS et Sentinel 3 par exemple).

Tableau 5.2 : Caractéristiques des capteurs du satellite Landsat-8 OLI-TIRS. Source : <https://www.usgs.gov/>

Capteur	Bande	Domaine	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Résolution (m)
OLI	1	Aérosol côtier	0.43-0.45	30
OLI	2	Bleu	0.45 - 0.51	30
OLI	3	Vert	0.53 - 0.59	30
OLI	4	Rouge	0.64 - 0.67	30
OLI	5	PIR	0.85 - 0.88	30
OLI	6	MIR 1	1.57 - 1.65	30
OLI	7	MIR 2	2.11 - 2.29	30
OLI	8	Panchromatique	0.50 - 0.68	15
OLI	9	Cirrus	1.36 - 1.38	30
TIRS	10	Thermique 1	10.6 - 11.19	100
TIRS	11	Thermique 2	11.50 - 12.51	100

#### 5.4.2.2. Acquisition des images Landsat 8

Les données Landsat-8 sont mises à disposition gratuitement dans la plateforme d'images Earth Explorer de l'USGS (United States Geological Survey) à l'adresse <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Landsat-8 fournit une image tous les 16 jours, le satellite offre une scène couvrant la zone d'étude en date du 29/07/2015 (figure 5.7). Cette date convient très bien car elle est en pleine période de la campagne de mesure de l'ICU de l'air. De surcroît, elle représente la période des grandes chaleurs de l'été dans cette région. La zone d'intérêt dans l'image ne présente pas de couvert nuageux. Les caractéristiques de l'image multi-bandes sélectionnée sont reportées dans le tableau 5.3. Le fichier de l'image téléchargé contient plusieurs bandes spectrales. Les bandes utilisées de cette image multispectrale sont la bande thermique de l'instrument TIRS et les bandes optiques nécessaires au calcul des indices spectraux pour le calcul de la température de surface LST. Cette dernière est le principal indicateur de l'îlot de chaleur de surface. Les autres bandes optiques nécessaires pour la classification du sol sont fournies par un autre satellite ayant une résolution plus fine.



Figure 5.7 : Aperçu sur l'image sélectionnée du Landsat 8 OLI-TIRS. (Le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude) Source : l'USGS

Tableau 5.3 : Caractéristiques de l'image Landsat 8 OLI-TIRS

Acquisition Date	Acquisition Time	Cloud Cover (%)	Sun Elevation (Degree)	Sun Azimuth (Degree)	Path	Row
29/07/2015	10:20:06	0.00	64.73041105	118.98452739	195	37

#### 5.4.2.3. Traitement de l'image satellitaire Landsat-8

Afin d'identifier et spatialiser l'îlot de chaleur de surface il faut restituer la température de surface LST. La méthode d'extraction de la température de surface LST sur Landsat-8 est décrite dans le manuel (Data Users Handbook) donné par le fournisseur (USGS, 2019). L'extension SCP a été employée pour extraire la température de surface LST. La bande thermique 10 de TIRS est utilisée puisque la bande 11 présente des incertitudes (Li et al., 2020a ; Nassar et al., 2016 ; Barsi et al., 2014 ; Montanaro et al., 2014). Le processus d'obtention de LST passe par plusieurs étapes (Elmarakby et al., 2022 ; Farid et al., 2022 ; Zhang et al., 2021 ; Sahnoune et al., 2021 ; Gherraz et al., 2020 ; Li et al., 2020a ; Yang et al., 2020 ; Kaiser et al., 2020 ; Naserikia et al., 2019 ; Lu et al., 2020 ; Boudjellal et Bourbia, 2017).

Les paramètres d'étalonnage associés au capteur sont fournis dans le fichier métadonnées MTL qui accompagne l'image multi-bande (Young et al., 2017) (voir annexe B). Les bandes utilisées sont : 4, 5, 6 et 10. L'organigramme de traitement ou la méthode d'extraction de LST est schématisé dans la figure 5.8.

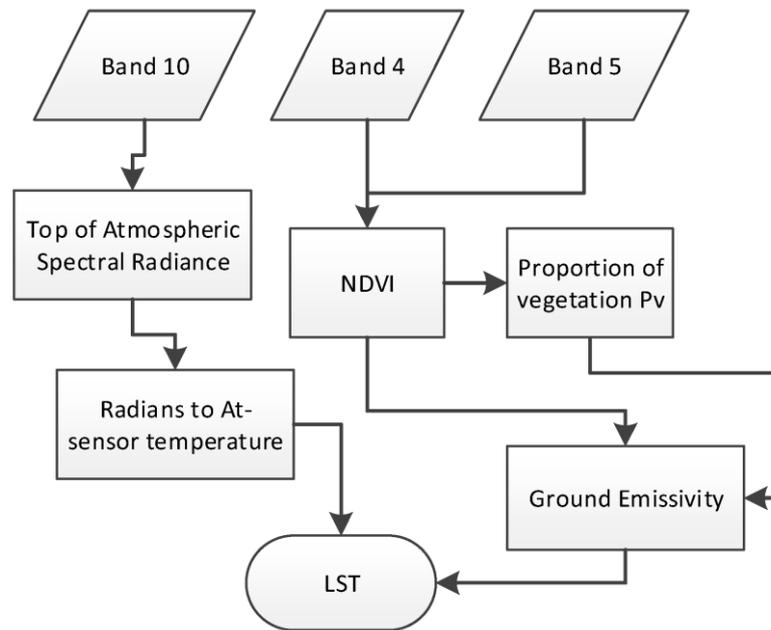


Figure 5.8: Chaîne de traitement des données Landsat-8 pour l'extraction de la température de surface LST. Source Kaplan et al. (2018).

#### 5.4.2.4. Logiciel utilisé

L'image multi-bande est manipulée dans un logiciel de « systèmes d'information géographique » (SIG) en libre accès QGIS. Le traitement et le prétraitement et de l'image ont été effectués grâce à l'extension SCP (Semi Automatic Classification Plug-in). Le calcul des indices spectraux et des équations de température de surface a été réalisé par la calculatrice raster de QGIS.

Un fichier vecteur délimitant la ville de Ghardaïa et ses alentours désertiques est créé sous forme d'un cadre. La zone d'étude est ensuite découpée de l'image originale globale suivant les limites définies par le cadre. L'image multispectrale résultante fera l'objet des traitements qui suivent.

#### 5.4.2.5. Correction géométrique

Les corrections géométriques permettent la superposition d'images -avec précision- d'autres documents cartographiques (format matriciel et format vectoriel). L'image est déjà géoréférencée et orthorectifiée par le fournisseur. Elle a été projetée dans le système de coordonnées WGS 1984 UTM zone 31N (USGS, 2019). (UTM : Universal Transvers Mercator).

#### 5.4.2.6. Correction atmosphérique

La correction atmosphérique "Dark Object Soustraction" a été réalisée par la fonctionnalité DOS dans SCP.

#### 5.4.2.7. Calcul de la Radiance spectrale TOA (Top of Atmosphere) à partir de DN

Les comptes numériques (DN : digital number) des bandes spectrales seront convertis en luminances spectrales au sommet de l'atmosphère TOA (Top of Atmosphere) ou ( $L_\lambda$ ) pour chaque pixel de l'image (Twumasi et al., 2021 ; Abulibdeh, 2021). La luminance (radiance spectrale) est calculée selon l'équation suivante :

$$L_\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (5.1)$$

Où :

$L_\lambda$  : la luminance exprimée en  $W/(m^2 \cdot ster \cdot \mu m)$ ,

$\lambda$  : la longueur d'onde de la bande concernée en  $\mu m$ ,

ML : facteur multiplicatif spécifique à la bande concernée,

$Q_{cal}$  ou DN : la valeur du pixel en compte numérique correspondante à la bande concernée,

AL : facteur additif spécifique à la bande concernée,

Les paramètres d'étalonnage  $ML$  et  $AL$  sont issus du fichier métadonnées du capteur (tableau 5.4).

#### 5.4.2.8. Conversion de la température TOA en luminosité (Température de brillance)

La luminance ou radiance spectrale est ensuite convertie en en luminosité (Température de brillance BT ou T) par la formule suivante :

$$T = \frac{K_2}{\ln \ln \left( \frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)} \quad (5.2)$$

Où :

T : La température apparente de brillance de la surface mesurée au niveau du capteur en Kelvin (K),

$L_\lambda$  : la luminance exprimée en  $W/(m^2 \cdot ster \cdot \mu m)$ ,

K1 : est la constante de conversion thermique spécifique de la bande 10 en  $W/(m^2 \cdot ster \cdot \mu m)$ ,

K2 : est la constante de conversion thermique spécifique de la bande 10 en Kelvin (K)

Les constantes de conversion spécifique de la bande 10 K1 et K2 sont tirées du fichier métadonnées et présentées au tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Les constantes de conversion spécifique de la bande 10 K1 et K2. Source : <https://www.usgs.gov/>

Thermal Constant	Band 10
K1	1321.08
K2	777.89
Rescaling Factor	Band 10
ML	0.000342
AL	0.1

#### 5.4.2.9. Calcule de l'NDVI

Le néocanal NDVI (l'indice de végétation par différence normalisée) a pour but de cartographier la couverture végétale (Fatima et al., 2022 ; Khan et al., 2021 ; Qiao et al., 2020 ; Guha et al., 2020 ; Herbei et Sala, 2020 ; Olmos-Trujillo et al., 2020). Il est calculé comme suit :

$$NDVI = \left( \frac{PIR - R}{PIR + R} \right) = \left( \frac{bande_5 - bande_4}{bande_5 + bande_4} \right) \quad (5.3)$$

Où :

PIR : bande proche infrarouge

R : bande rouge

Les valeurs de NDVI varient entre -1 et +1.

#### 5.4.2.10. Calcul de la proportion de végétation Pv

La proportion de végétation Pv (ou fraction de la végétation) est nécessaire pour le calcul de l'émissivité terrestre (Mirzaei et al., 2020 ; Krtalić et al., 2020). Elle est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$P_v = \left[ \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right) \right]^2 \quad (5.4)$$

Où :

NDVImin : la valeur minimale de NDVI dans l'aire d'étude,

NDVImax : la valeur maximale de NDVI dans l'aire d'étude

#### 5.4.2.11. Calcul de l'émissivité

L'émissivité terrestre  $\varepsilon$  ou LSE (Land Surface Emissivity) correspond à l'aptitude d'une surface à émettre un rayonnement thermique. C'est un facteur sans unité allant de 0 à 1, qui exprime la fraction du flux émis par une surface par rapport au flux émis par un corps noir à la même température. L'émissivité est calculée par plusieurs méthodes dont celle de Sobrino et al. (2004) (Gourfi et al., 2022 ; Hassani et al., 2021). Elle est calculée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = 0,004 * P_v + 0,986 \quad (5.5)$$

Où :

$\varepsilon$  : l'émissivité de la surface

$P_v$  : la proportion de végétation

#### 5.4.2.12. Calcul de la température de surface terrestre LST

Après avoir trouvé l'émissivité terrestre, la température de surface LST au niveau de la surface terrestre est enfin calculée par la formule suivante :

$$T_s = \frac{T}{1 + (\lambda * T / \rho) \ln \varepsilon} \quad (5.6)$$

Où :

$T_s$  : La température de surface LST au niveau de la surface terrestre en Kelvin (K),

$T$  : La température apparente de brillance de la surface mesurée au niveau du capteur en Kelvin (K),

$\lambda$  : la longueur d'onde de la bande concernée en  $\mu\text{m}$ ,

$\rho$  : est calculé par  $hc K^{-1}$  ( $1.438 * 10^{-2} \text{ mK}$ ),

$h$  : la constante de Planck ( $6.626 * 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ ),  
 $c$  : vitesse de la lumière ( $2.998 * 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ),  
 $K$  : la constante de Boltzman ( $1.38 * 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ),  
 $\varepsilon$  : l'émissivité terrestre

LST est ensuite convertie en degrés Celsius via l'équation qui suit :

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (5.7)$$

Où :

$T (^{\circ}\text{C})$  : la température de surface LST en degré celsius,

$T (\text{K})$  : la température de surface LST en Kelvin

Au final, à l'issue de cette chaîne de traitements, la carte thermique de la zone d'étude est élaborée avec une résolution de 30 m.

#### 5.4.2.13. La cartographie de l'îlot de chaleur de surface

Il n'existe pas une méthode standard pour le calcul de l'îlot de chaleur de surface et la définition de la zone rurale par l'image satellite (Rasul et al., 2017). Certains chercheurs ont essayé de délimiter la surface de la zone rurale dans l'image afin de pouvoir obtenir sa température de surface ( $LST_{\text{zone rurale}}$ ) par la création d'un anneau autour de la zone urbaine par deux polygones concentriques (Imhoff et al., 2010 ; Fan et al., 2017). Dans d'autres études, la zone rurale est représentée par une zone tampon (buffer zone en anglais) de plusieurs km de largeur autour de l'agglomération urbaine (Dewan et al., 2021 ; Sobrino et Irakulis, 2020 ; Dialesandro et al. 2019 ; Rasul et al., 2017). Les polygones sont créés dans le format vecteur et sont superposés aux images raster. D'autres encore, ont sélectionné un petit polygone (échantillon) pour représenter la zone rurale dans l'image (Nassar et al., 2016). Quand l'image est prise dans sa totalité ou quand une classification de la zone d'étude est réalisée, la température de surface de la zone rurale est le LST de la classe "zone rurale" dans l'image (Khan et Javed, 2022 ; Blooshi et al., 2020 ; Lu et al., 2020 ; Gago et al., 2020 ; Charfi et Dahech, 2018 ; Ali et Mohammed, 2016 ; Houet et Pigeon, 2011 ; Kong et al., 2014b). La classe "zone rurale" dans le cadre de ce travail est la classe "désert".

L'îlot de chaleur urbain de surface est la différence de température entre la surface de la zone urbaine et la surface du désert autour de la ville (Hassan et al., 2021 ; Ma et al.,

2021 ; Wemegah et al., 2020 ; Zhou et al., 2019a ; Aina et al., 2017 ; Rasul et al., 2015 ; Sobrino et al., 2013). Son intensité est calculée comme suit :

$$SUHI = LST_{urban} - LST_{Desert} \quad (5.8)$$

Où :

$SUHI$  : l'îlot de chaleur urbain de surface ou surface urban heat island.

$LST_{urban}$  : la température de surface de la zone urbaine.

$LST_{Desert}$  : la température de surface de la zone désertique (rurale).

D'autres approches sont développées et utilisées pour étudier la répartition de la température de surface et la détermination de l'îlot de chaleur urbain de surface (Khan et Javed, 2022 ; Dewan et al., 2021 ; Sobrino et Irakulis, 2020 ; Dialesandro et al 2019 ; Li et al., 2018 ; Lu et al., 2020 ; Gago et al., 2020 ; Fan et al., 2017 ; Imhoff et al., 2010).

#### 5.4.2.14. Calcul de l'indice SAVI

L'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) permet de visualiser la couverture végétale tout comme le NDVI (Olmos-Trujillo et al., 2020 ; Hidayati et Suharyadi, 2019 ; Dutta et al., 2018 ; Piragnolo et al. 2018). Cet indice est calculé comme suit :

$$SAVI = \left[ \frac{(PIR - R)}{(PIR + R + 1.5)} \right] * 1.5 = \left[ \frac{(bande_5 - bande_4)}{(bande_5 + bande_4 + 0.5)} \right] * 1.5 \quad (5.9)$$

Où :

PIR : bande proche infrarouge

R : bande rouge

#### 5.4.2.15. Calcul de l'indice NDBI

L'indice NDBI (Normalized Difference Built-up Index) permet de cartographier le bâti et les zones urbaines (Isioye et al., 2020 ; Maskooni et al., 2020 ; Malik et al., 2019 ; Govil et al., 2019). Il est calculé comme suit :

$$NDBI = \frac{(MIR - PIR)}{(MIR + PIR)} = \frac{(bande_6 - bande_5)}{(bande_6 + bande_5)} \quad (5.10)$$

Où :

PIR : bande proche infrarouge

MIR : bande moyen infrarouge

L'étude des corrélations entre la température de surface LST et les différents indices spectraux NDVI, SAVI et NDBI est réalisée à l'aide des programmes R-studio et Saga.

### **5.4.3. Images satellitaires de Sentinel-2 et traitement numérique**

#### **5.4.3.1. Caractéristiques du capteur Sentinel-2**

Les deux satellites Sentinel-2 (A et B) font partie du programme d'observation de la terre "Copernicus" de l'Union européenne en collaboration avec l'agence spatiale européenne (ESA). Le satellite Sentinel-2A est lancé et mis en orbite en 2015, alors que le Sentinel-2B a été lancé plus tard en 2017. Leurs capteurs fournissent des images optiques multispectrales à haute résolution spatiale dans le domaine du visible jusqu'au moyen infrarouge (tableau 5.5). Le capteur imageur utilisé est Multi-Spectral Instrument (MSI) qui offre des images d'une résolution spatiale plus fine du Landsat-8 (à partir de 10 m) tous les cinq jours et d'une fauchée de 290 kilomètres (ESA, 2015). Cette résolution spatiale permet de créer des cartes d'occupation du sol de la zone d'étude d'une plus grande précision (sans altérer la qualité de l'image par rééchantillonnage).

Tableau 5.5 : Caractéristiques du capteur Multi-Spectral Instrument (MSI) embarqué sur les deux satellites Sentinel-2. Source : <https://sentinel2.cnes.fr/fr/instruments-2>

Bandes Sentinel-2	Sentinel-2A		Sentinel-2B		Résolution spatiale (m)
	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de bande (nm)	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de bande (nm)	
Bande 1 – Aérosol côtier	442.7	21	442.2	21	60
Bande 2 – Bleu	492.4	66	492.1	66	10
Bande 3 – Vert	559.8	36	559.0	36	10
Bande 4 – Rouge	664.6	31	664.9	31	10
Bande 5 – Végétation "red edge"	704.1	15	703.8	16	20
Bande 6 –	740.5	15	739.1	15	20
Bande 7 –	782.8	20	779.7	20	20
Bande 8 – PIR	832.8	106	832.9	106	10
Bande 8A – PIR	864.7	21	864.0	22	20
Bande 9 – Vapeur d'eau	945.1	20	943.2	21	60
Bande 10 – SWIR – Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
Bande 11 – SWIR	1613.7	91	1610.4	94	20
Bande 12 – SWIR	2202.4	175	2185.7	185	20

### 5.4.3.2. Acquisition des images Sentinel-2A

Les produits du satellite Sentinel-2A sont accessibles gratuitement via diverses plateformes telles que ESA, THEIA (Pôle Thématique Surfaces Continentales) ou CNES (Centre national d'études spatiales). Les images utilisées sont téléchargées de la plateforme (<https://scihub.copernicus.eu>). La ville de Ghardaïa et ses environs immédiats sont situés à cheval sur deux scènes (tuiles ou granules) de Sentinel 2A. Les deux scènes sélectionnées de la zone d'étude sont en date du 16/08/2015 (figure 5.9 et 5.10). Les caractéristiques des tuiles sélectionnées sont présentées dans le tableau 5.6. Ce sont des images exprimées en réflectance au sommet de l'atmosphère, sans nuages, et elles sont très proches de la période de mesure de l'îlot de chaleur de l'air. Afin de couvrir toute la zone d'étude dans une seule image, une mosaïque a été créée. Les deux tuiles juxtaposées ont été regroupées et fusionnées pour ne former qu'une seule image (figure 5.11). Un rééchantillonnage a été effectué pour ramener la résolution spatiale de toutes les bandes à une taille de pixel de 10 m (Li et al., 2020b).

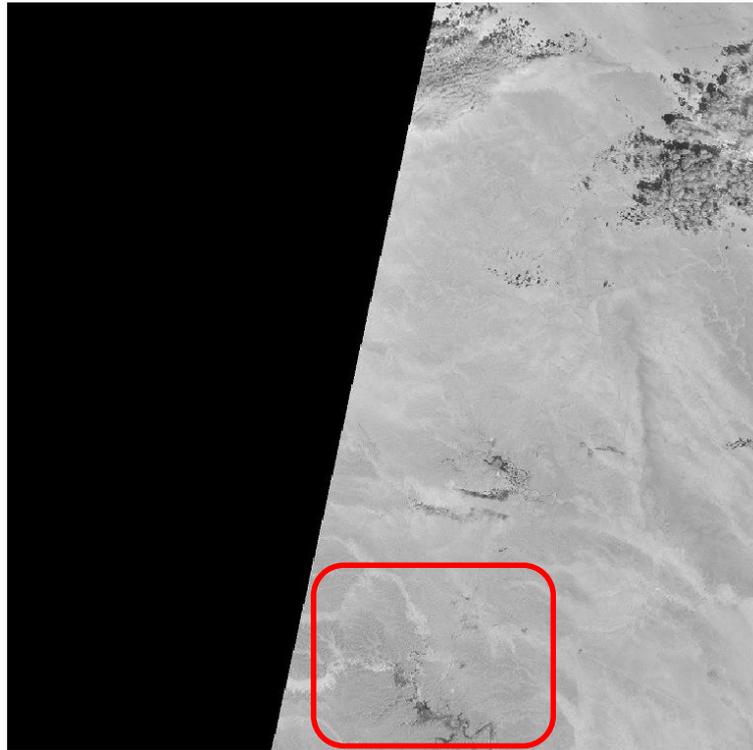


Figure 5.9 : Aperçu sur l'image sélectionnée du Sentinel 2 (tuile 1). (Le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude). Source : Copernicus Open Access Hub.

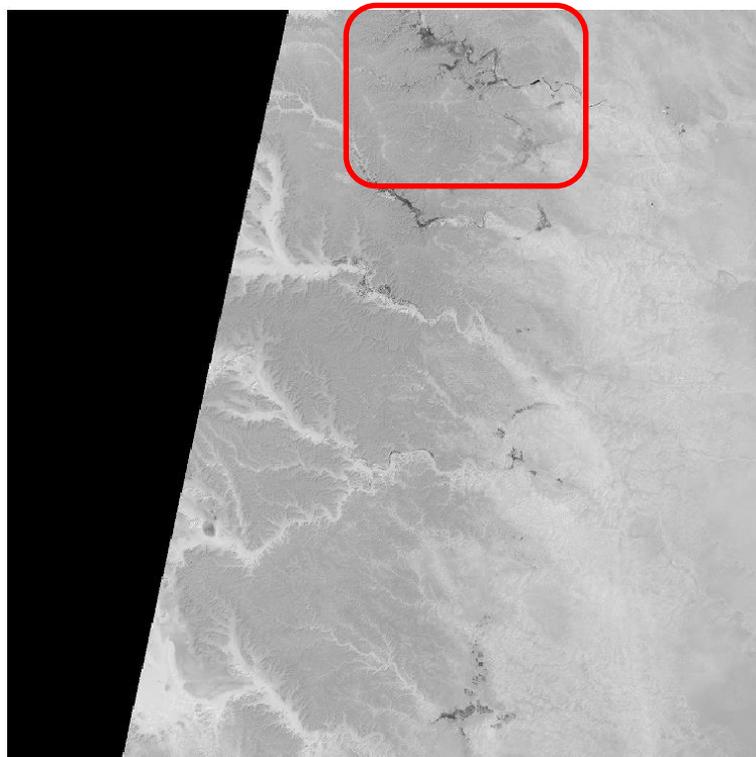


Figure 5.10 : Aperçu sur l'image sélectionnée du Sentinel 2 (tuile 2). (Le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude). Source : Copernicus Open Access Hub.

Tableau 5.6 : Caractéristiques de l'image Sentinel-2A Level-1C.

Acquisition Date	Acquisition Time	Cloud Cover (%)	Sun Elevation (Degree)	Sun Azimuth (Degree)
16/08/2015	10:20:26	0.0	25.5153019639847	131.286218112567
16/08/2015	10:20:26	2.1512	26.1530314495506	132.578332946004

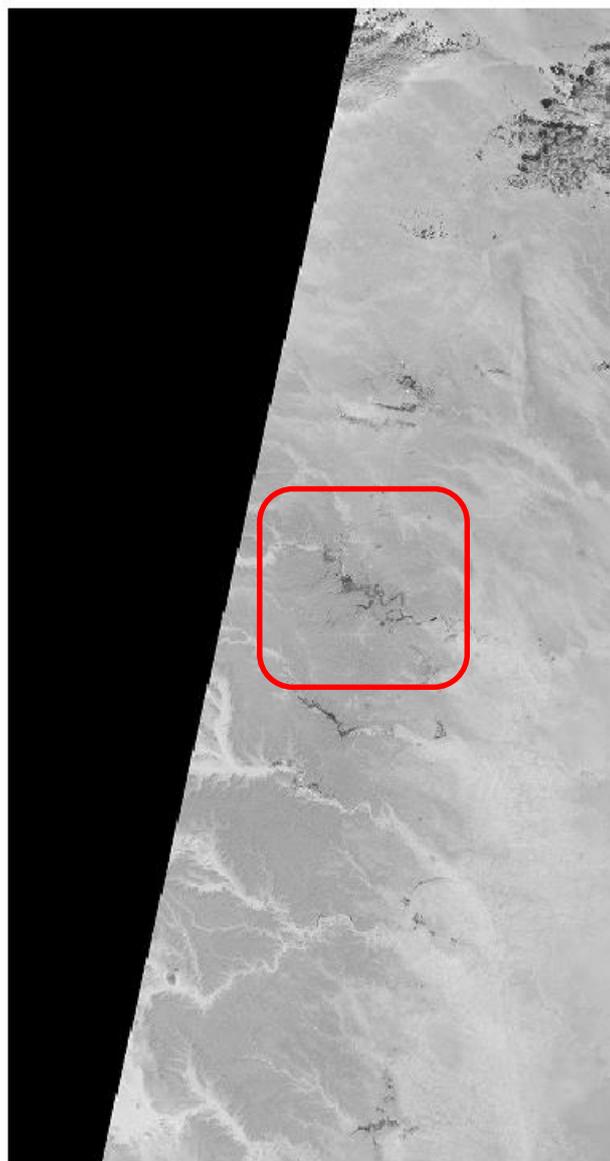


Figure 5.11 : Fusion des deux tuiles sélectionnées du Sentinel-2A. (le rectangle rouge délimite le périmètre d'étude).

### 5.4.3.3. Traitement de l'image satellitaire Sentinel-2A

Le fichier métadonnées contenant les paramètres d'étalonnage du capteur Sentinel-2A pour les images sélectionnées est livré avec les images, il est présenté en annexe C et D. Les bandes utilisées sont : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A, 11 et 12.

#### **5.4.3.4. Logiciel utilisé**

L'image multi-bande est manipulée dans le même logiciel SIG afin de superposer facilement les images des deux satellites (Landsat-8 et Sentinel-2A). Le Plug-in SCP permet une bonne segmentation de l'image et offre divers algorithmes de classification (Tempa et Aryal, 2022 ; Leroux et al., 2018). Le même fichier vecteur de la zone d'étude est appliqué pour les images des satellites Landsat-8 et Sentinel-2A afin de garantir la superposition des images. L'image multispectrale de la zone d'étude découpée subira les opérations de classification thématique (Zhou et al., 2019b).

#### **5.4.3.5. Correction géométrique**

L'image multi-bande de Sentinel-2A est géoréférencée, orthorectifiée et projetée dans le même système de coordonnées WGS 1984 UTM zone 31N afin que les images des deux satellites soient superposables.

#### **5.4.3.6. Correction atmosphérique**

Le Plug-in SCP applique la méthode DOS "Dark Object Soustraction" pour la correction atmosphérique des images (Aka et al., 2022).

#### **5.4.3.7. Calibration radiométrique**

Le Plug-in SCP effectue tous les traitements de l'image Sentinel-2A (correction, calibration, etc.). L'image est aussi rehaussée pour en améliorer son apparence. Des opérations d'étirement et de contraste ont été effectuées afin de faciliter l'analyse et l'interprétation visuelle de l'image.

#### **5.4.3.8. La composition colorée**

Deux combinaisons dans l'image Sentinel-2A ont été réalisées. Une composition colorée " vraies couleurs " à partir des bandes « R V B = 4 3 2 » reflétant l'apparence réelle, afin que l'image soit identique à une photographie classique (Aka et al., 2022). L'autre composition colorée est celle des "fausses couleurs" à partir des bandes « R V B = 8 4 3 » ; permet de bien visualiser la végétation qui apparaît en rouge dans la zone d'étude.

#### **5.4.3.9. Classification de la zone d'étude et carte d'occupation du sol**

La cartographie de l'occupation du sol (Land Use/Land Cover LULC) de la zone d'étude a été réalisée via des algorithmes de classification fonctionnant sur toutes les bandes à la fois. La méthode choisie est l'approche par pixel (la classification dite orientée-

Pixels). La classification non supervisée a été utilisée dans le cadre de ce travail (Aka et al., 2022 ; Yousefi et al., 2022 ; Boulaassal et al., 2020 ; El Kharki et al., 2015).

Deux algorithmes de classification largement utilisés sont appliqués pour les images Sentinel-2A : ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis) et K-means (Paradis, 2022 ; Tempa et Aryal, 2022). Après plusieurs opérations, la classification par l'algorithme K-means a été retenue car elle présente le meilleur résultat et un très faible niveau d'anomalies. L'algorithme K-means est couramment employé dans la création des cartes thématiques (Alcaras et al., 2022a ; Alcaras et al., 2022b ; Gašparović et Singh, 2022 ; Hamada et al., 2019 ; Islam et al., 2017 ; El Kharki et al., 2015). K-means opère par itérations successives sur tous pixels de l'image multispectrale suivant N classes. Il regroupe les pixels selon des critères radiométriques. Il crée au final, une mosaïque de pixels, appartenant chacun à une classe ou un thème particulier. Après maintes opérations de classification, le nombre de classes a été fixé à 4 (tableau 5.7) (Farid et al., 2022 ; Ali et al., 2017). L'algorithme K-means a offert une meilleure discrimination entre les classes en particulier "Urbain" et "Végétation".

Tableau 5.7 : Les classes utilisées dans la cartographie de l'occupation du sol.

N°	Nom de classe
1	Eau
2	Urbain (bâti)
3	Végétation
4	Désert

L'évaluation de la précision de la classification a été effectuée par le calcul de la précision globale et le coefficient Kappa après l'élaboration de la matrice de confusion (Tempa et Aryal 2022 ; Wafdan, 2021 ; Olmos-Trujillo et al., 2020 ; Saha et al., (2020). L'évaluation de la précision a été réalisée grâce au Plug-in SCP et le logiciel libre accès Saga qui se trouve dans le pack d'installation de QGIS (Das et al., 2021 ; Gherraz et al., 2020).

## **5.5. Conclusion**

Ce chapitre s'est scindé en trois parties. La première a traité les données et la méthode de mesure de l'ICU de l'air. La deuxième s'est articulée sur la méthode d'évaluation du confort thermique en espace extérieur et le choix de l'indice utilisé. Quant à la dernière partie, elle a été consacrée au choix des capteurs utilisés pour l'étude de l'ICU

de surface. De même, il y a été développé le processus de traitement numérique des images pour l'extraction de la température de surface et la carte d'occupation du sol.

## **CHAPITRE VI**

# **ÉTUDE DE LA VARIATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR DE L'AIR ET DU CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR**

## 6. ÉTUDE DE LA VARIATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR DE L'AIR ET DU CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR

### 6.1. Introduction

Une première partie de ce chapitre concerne l'étude de la variation de l'îlot de chaleur de l'air dans la ville de Ghardaïa. Les données collectées de la campagne de mesure seront analysées pour les trois moments de mesure. L'effet de rafraîchissement de la végétation est calculé et analysé. La deuxième partie traite de l'évaluation des niveaux de confort thermique dans les espaces publics dans la ville de jour comme de nuit.

### 6.2. La variation de l'îlot de chaleur de l'air

Durant la période de mesure, le temps était calme et ensoleillé, caractérisé par des chaleurs caniculaires. Les mesures microclimatiques collectées sont représentatives du climat de Ghardaïa en période estivale. Les mesures de température d'air révèlent une amplitude thermique quotidienne moyenne est de 15°C. Les très faibles taux d'humidité illustrent le degré d'aridité dans les villes du Sahara. Durant le jour, l'écart de température entre les sites s'élève à 6°C. Durant la nuit, par contre, les écarts sont plus faibles.

#### 6.2.1. Variation de la température de l'air

La figure 6.1 présente les températures de l'air moyennes des sites durant la période d'investigation à 05 :00 h, 14 :30 h, et 00 :00 h. Des valeurs extrêmes ont été relevées. Les températures maximales s'élèvent jusqu'à 48°C et les températures minimales nocturnes dépassent les 30°C. Les mesures sont typiques de la période estivale de Ghardaïa. Ces pics et ces minimas caractérisent l'été dans les villes sahariennes telles que la ville de Ouargla (Bouchahm *et al.*, 2011).

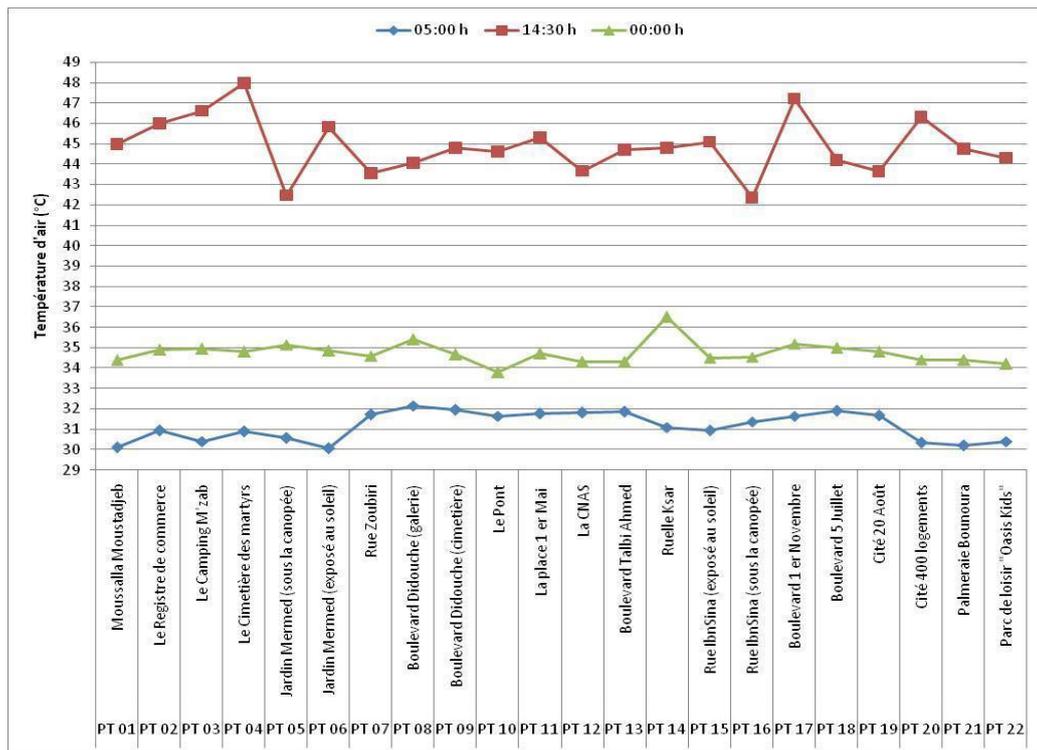


Figure 6.1: Température moyenne de l'air des sites de mesure.

### 6.2.1.1. Variation diurne (14h30)

D'après la figure 6.1, le site du cimetière des martyrs (PT04) apparaît le plus chaud parmi tous les 22 sites dans la ville avec une température moyenne de 47.95°C. L'ICU y est le plus intense avec une valeur de 2.98°C. Le boulevard 1<sup>er</sup> Novembre (PT17) enregistre le deuxième îlot de chaleur d'une intensité de 2.23°C. Les autres sites urbains manifestent un comportement thermique qui varie entre îlot de chaleur et de fraîcheur mais d'une intensité faible (moins de 1.4°C). Cependant les différences intra-urbaines restent significatives. A ce titre, certains sites de mesure comme la rue Ibn Sina (PT16) ou le jardin de Mermed (PT05) affichent des températures plus basses sous la canopée des arbres (plus de 5°C d'écart) ; d'autres comme la cité 20 Août (PT19) ou la rue Zoubiri (PT07), sont plus frais ; avec environ 4°C de différence par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04).

En effet concernant les sites végétalisés, les mesures relevées dans les points situés sous la végétation (PT05, PT12 et PT16) manifestent des températures d'air plus faibles par rapport aux points qui ne sont pas ombragés par le feuillage. Si les sites dépourvus de végétation présentent des températures similaires, les sites ombragés dans l'allée Ibn-Sina PT16, au jardin de Mermed PT05 et le point sous la touffe de la CNAS (PT12) manifestent des îlots de fraîcheur par rapport au site de référence. L'effet rafraîchissant (ou PCI) est

d'une intensité de 2.62°C, 2.50°C et 1.3°C respectivement. L'effet maximal est enregistré entre le site du cimetière des martyrs (PT04) et l'allée Ibn-Sina PT16 avec une valeur de 5.61°C. Au sein des espaces verts, les points de mesure présentent aussi des différences entre les points ombragés et ceux ensoleillés. Ainsi au niveau de l'allée Ibn-Sina (PT15 - PT 16) l'effet rafraîchissant de la végétation est de 2.72°C alors que dans le jardin de Mermed (PT06 - PT05) l'effet s'élève jusqu'à 3.36°C. L'analyse des taux de réduction du rayonnement solaire par la couronne foliaire des arbres confirme bien l'effet de l'ombre de la végétation sur la température de l'air. Le rayonnement solaire est très intense à Ghardaïa en été. Il peut dépasser les 970 W/m<sup>2</sup>. Les mesures montrent que le feuillage et le branchage de la végétation réduisent considérablement les valeurs du rayonnement solaire (tableau 6.1), (jusqu'à 800W/m<sup>2</sup> de différence).

Tableau 6.1: Valeurs de rayonnement solaire dans différents sites à 14 :30 h. (\*) indique que les mesures sont prises à l'ombre de la végétation.

Numéro de Point	Nomination	Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )
PT 01	Moussalla Moustadjeb	959
PT 02	Le Registre de commerce	951,5
PT 03	Le Camping M'zab	931,66
PT 05	Jardin Mermed sous la canopée d'un eucalyptus*	120
PT 05 bis	Jardin Mermed sous la canopée Casuarina*	113,33
PT 06	Jardin Mermed (Max)	<b>974,66</b>
PT 07	Rue Zoubiri	922
PT 09	Boulevard Didouche Mourad	937
PT 11	La place 1 er Mai (face à la CNAS)	940
PT 12	La CNAS sous la canopée d'un groupe d'eucalyptus*(Min)	<b>64</b>
PT 15	Rue IbnSina	949
PT 16	Rue IbnSina sous la canopée des tamarix*	103
PT 17	Boulevard 1 er Novembre	940
PT 17 bis	Boulevard 1 er Novembre sous le feuillage du palmier*	160

Selon les types et les espèces des arbres, les canopées présentent des taux de réduction du rayonnement variés. Au jardin de Mermed (PT06) par exemple, un grand eucalyptus diminue le rayonnement solaire de 87.7 % par rapport au point ensoleillé (PT05). Le rayonnement mesuré sous un casuarina adulte est filtré de 88.4 % (PT 05). Dans l'allée Ibn-Sina, le pourcentage de réduction du rayonnement solaire sous un tamaris va jusqu'à 91.2 % (PT16). L'atténuation du rayonnement solaire atteint 83 % sous une

haute canopée d'un palmier dattier au boulevard 1<sup>er</sup> Novembre (PT17). Il apparaît bien que les espèces d'arbres ayant une forte densité de feuillage sont les plus efficaces en matière d'ombrage.

### 6.2.1.2. Variation nocturne (00:00h et 05 :00h)

La figure 6.1 reflète une homogénéité dans les températures des sites au cours de la nuit. L'écart entre sites est plus faible par rapport au jour. La température la plus haute à minuit est relevée dans le ksar (PT14) de 36.5°C. On y a enregistré l'îlot de chaleur le plus intense d'une valeur de 2.1°C. Au niveau du pont sur l'oued (PT10) par contre il a été relevé un îlot de fraîcheur modéré de 0.6°C par rapport au site désertique. La mesure sur le pont est effectuée à 7 m au-dessus du niveau du lit de l'oued. Les vitesses de l'air enregistrées dans ce point sont élevées de jour comme de nuit (figure 6.4). Durant la nuit le vent est de direction ouest c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement de l'eau dans l'oued. D'après les figures 5.2 et 5.5 le vent souffle depuis la palmeraie de Ghardaïa située en amont de l'oued M'zab. L'IFU observé dans le point PT10 est lié en partie à l'apport d'air frais depuis la palmeraie. Le PT08 au niveau du boulevard Didouche Mourad, situé dans la galerie couverte, présente une température plus élevée de 0.75°C par rapport au point PT09 qui lui, est situé dans un espace ouvert à côté du cimetière. Ainsi, le site le plus ouvert et aéré est le plus frais.

A 00:00 h les espaces verts affichent des îlots de chaleur de faible intensité. Quatre heures après le coucher du soleil, les sites végétalisés gardent une température semblable voire supérieure à celle du désert environnant. Il convient de signaler que les arbres ne reçoivent pas d'irrigation régulière sauf dans le jardin de Mermed. Ainsi, le point de mesure PT05 qui est situé sous la canopée de la végétation manifeste en effet un îlot de chaleur d'une intensité de 0.75°C à ce moment-là, tandis que le point PT06 non couvert est plus frais de 0.3°C.

A 05h00, le site de référence en dehors de la ville manifeste un rythme de refroidissement plus rapide que les sites urbains. Dans la galerie couverte du boulevard Didouche Mourad le PT08 affiche un îlot de chaleur d'une intensité maximale de 2.05°C. L'effet rafraîchissant maximal de la végétation ( $PCI_{max}=2.08^{\circ}C$ ) est observé à l'aube dans le PT06 au jardin de Mermed. Néanmoins, les points de mesure situés sous les arbres au niveau du jardin de Mermed et de l'allée Ibn-Sina, sont les plus chauds. Ainsi le PT05 est plus chaud de 0.5°C par rapport au point PT06 ; et le PT16 est plus chaud de 0.43°C que le

point PT15. Ce constat indique, en l'absence de vent, que la végétation conserve la chaleur sous le houppier. La canopée de végétation ralentit le refroidissement dans ce cas.

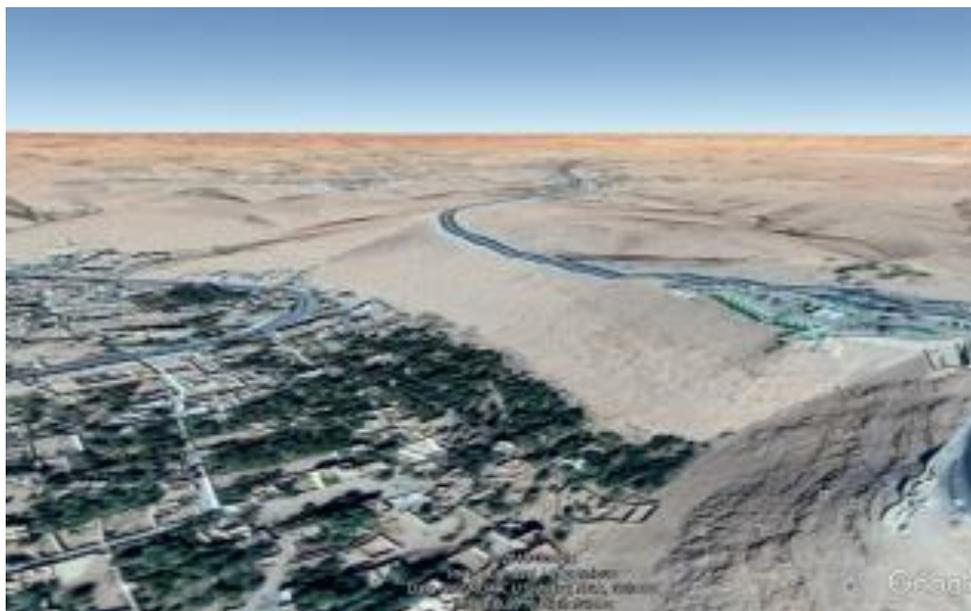


Figure 6.2 : Vue globale sur les collines et la vallée du M'zab. (Source : Google-Earth).

## **6.2.2. Variation de l'humidité relative de l'air**

Les taux d'humidité relative relevés dans l'ensemble des sites sont présentés dans la figure 6.3, pour les mesures de 05:00 h, 14:30 h, et de 00:00 h.

### **6.2.2.1. Variation diurne (14h30)**

Les valeurs d'humidité relative mesurées à 14:30 h sont faibles pour dans l'ensemble des sites. La rue Zoubiri (PT07) enregistré le taux maximal de 14.6 %, suivi du boulevard Talbi Ahmed (PT13) avec 14.4 %. La valeur la plus faible est de 9.1 %, relevée dans la ruelle du ksar. Cette valeur est même plus faible par rapport au site de référence.

Au niveau des espaces verts, l'humidité est aussi faible. Par exemple, dans la rue Ibn-Sina l'humidité relative dans le PT16=11.5 % et le PT15=11.2 %, au jardin de Mermed PT05=12.5 %, et PT06=11.8 %. Le désert au niveau du site de référence affiche une humidité relative de 10.75 %.

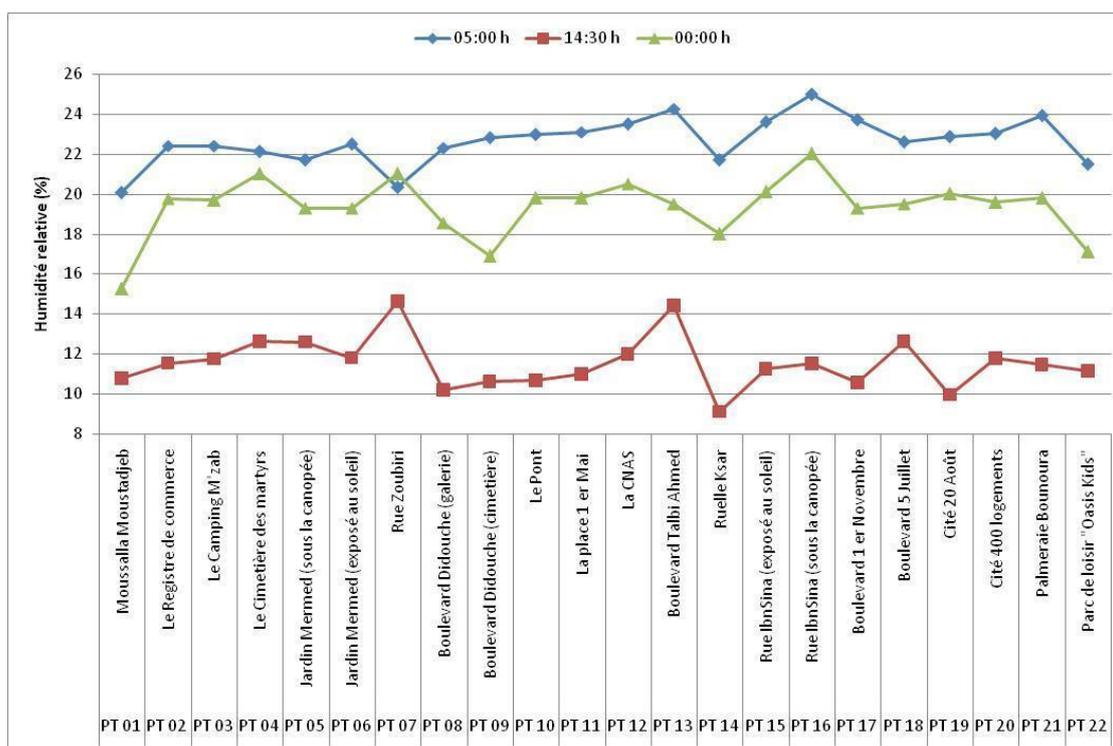


Figure 6.3: Humidité relative de l'air des sites de mesure.

### 6.2.2.2. Variation nocturne (00:00h et 05 :00h)

Les points de mesure dans la ville affichent à minuit des taux d'humidité relativement plus élevés par rapport au désert. L'humidité dans le point de mesure PT 16 dans la rue Ibn-Sina est légèrement élevée par rapport aux autres sites dépourvus de végétation. A l'aube, l'humidité relative augmente dans tous les sites, mais le désert manifeste toujours la plus faible valeur. Le point PT 16 sous la canopée dans la rue Ibn-Sina a aussi à cette heure le taux le plus élevé de 25 %.

### 6.2.3. Variation de la vitesse de l'air

Les vitesses moyennes de vent relevées dans l'ensemble des sites sont présentées dans la figure 6.4. Il apparaît que les vitesses de vent sont faibles par rapport au désert. Les vitesses de l'air fluctuent énormément en particulier dans les sites urbains. D'après la figure 6.4 on constate que les vitesses de l'air à la fin de la nuit sont les plus faibles. La vitesse de l'air est plus importante durant le jour. Les points de mesure au sommet de la colline (PT01 et PT 22, figure 6.2) ou au niveau du pont sur l'oued M'zab ont les valeurs les plus élevées de vitesse d'air. La vitesse moyenne du vent est de 4.43 m/s au niveau du site de référence du plateau. Elle est de 3.85 m/s dans le parc de loisir. Au niveau du pont

sur l'oued, la vitesse de l'air moyenne est aussi élevée qu'au niveau du plateau avec une valeur de 4.35 m/s. La valeur maximale y est de 4,45 m/s.

Durant la nuit, le temps est relativement calme par rapport au jour. Les sites urbains manifestent des vitesses d'air faibles.

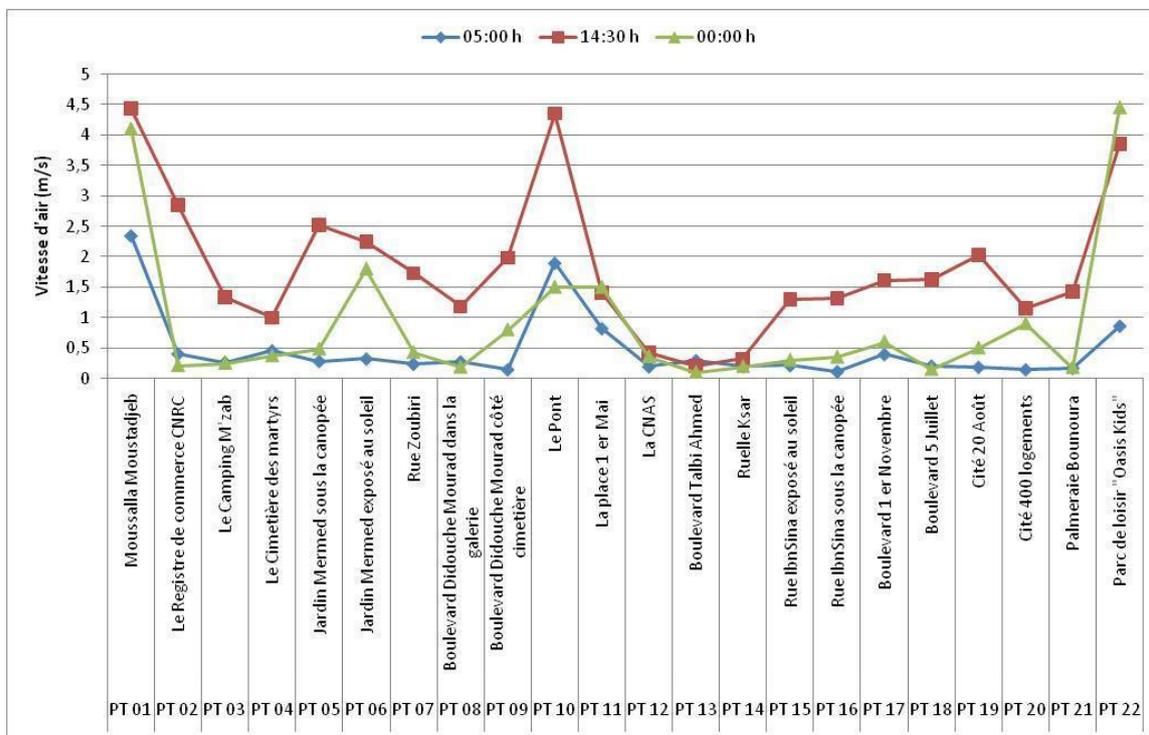


Figure 6.4 : Les vitesses de l'air dans les sites de mesure.

### 6.3. Discussion de l'îlot de chaleur de l'air à Ghardaïa

#### 6.3.1. La variation intra-urbaine de la température d'air : l'effet de la végétation et l'impact des caractéristiques des sites.

##### 6.3.1.1. Variation diurne de la température de l'air (14h30)

Les hautes températures mesurées illustrent le niveau de l'inconfort thermique dans les espaces extérieurs à Ghardaïa. Les sites de mesure ont des comportements thermiques variés. Les chaleurs extrêmes mesurées affectent les usagers des espaces urbains et les activités économiques (Harlan et al., 2006).

Le point le plus chaud de la ville est enregistré dans le site du cimetière des martyrs (PT04). Il est caractérisé d'une grande aire asphaltée de couleur sombre et d'une très grande ouverture au ciel.

Le manque d'ombre et l'exposition continue au rayonnement solaire provoquent l'élévation importante de la température au début de l'après-midi. Le PT04 connaît une très

forte émission d'énergie anthropogénique issue d'une intense circulation automobile. Sa situation aux pieds de la colline rocheuse l'expose à la forte chaleur dégagée par la masse rocheuse (figure 6.2). Le second point chaud dans la ville est le PT17 au niveau du boulevard du 1<sup>er</sup> Novembre. Ce dernier est connu pour son intense activité commerciale et forte circulation automobile. Ce boulevard est orné de part et d'autre, de palmiers dattiers avec un espacement moyen de 9 m. Les palmiers reçoivent rarement d'irrigation, ils offrent une ombre clairsemée sur la chaussée et les trottoirs. Les multiples climatiseurs accrochés aux façades du boulevard produisent une forte chaleur et contribuent à l'élévation de la température de l'air (voir image dans le tableau 5.1). Le boulevard a une hauteur de deux niveaux en général, ce qui correspond à un canyon de faible profondeur. Par conséquent, il est exposé à une forte irradiation solaire. L'ensemble de ces facteurs contribue à réchauffer l'air à ce point de mesure. Le boulevard de l'indépendance (5 Juillet, PT18) qui longe le cours d'eau est une voie parallèle au boulevard 1<sup>er</sup> Novembre, (voir image dans le tableau 5.1). Ce boulevard connaît moins de circulation automobile par rapport à la rue du 1<sup>er</sup> Novembre et a beaucoup moins d'activités commerciales. La température d'air au site du PT18 est ainsi inférieure de 3°C par rapport au site du boulevard 1<sup>er</sup> Novembre, notamment à cause de la plus faible émission anthropique, sa grande ouverture au ciel et sa proximité de l'oued. Le PT10 sur le pont de l'oued M'zab affiche une température relativement élevée à cause de l'intense trafic automobile en tous moments de la journée car c'est le principal point de liaison entre les deux rives.

Les différences de températures intra-urbaines sont significatives. La température dans la cité 20 août (PT19) est inférieure de 4.31°C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Ce constat est le résultat de la conception de cette cité qui a été élaborée par l'architecte André Ravéreau selon des principes bioclimatiques. Les ruelles sont piétonnières, brisées et de profils profonds. Elles sont dotées de passages couverts. La circulation automobile se fait en dehors de la cité. Cette atténuation dans la température de l'air souligne l'effet de la largeur des rues dans la protection contre le rayonnement solaire intense. L'influence de la forme et la géométrie urbaine peut être aussi observé dans les points de mesure dans le registre de commerce (PT02), la cité 400 logements (PT20) et dans la place 1<sup>er</sup> Mai (PT11) par exemple. Une grande ouverture au ciel caractérise ces derniers sites (voir image dans le tableau 5.1). Le site du PT07 dans la rue Zoubiri manifeste un écart de 4.39°C par rapport au PT04. Cette faible température est due en partie à la faible largeur de la rue et à son orientation est-ouest qui offre plus d'ombre au

milieu de la journée. Une orientation nord-sud exposerait la ruelle directement à l'irradiation solaire à la mi-journée. La rue Zoubiri connaît une faible circulation automobile en comparaison avec le site du cimetière des martyrs (PT04) donc moins d'émission de chaleur anthropique. Sur le boulevard Didouche Mourad les deux points de mesure PT 08 et 09 illustrent aussi l'effet de l'ombre dans le comportement thermique des sites. Le point PT09, situé sur le trottoir et exposé au soleil, est plus chaud par rapport au point PT08 qui est protégé sous la galerie à arcades. Dans le tissu traditionnel du ksar, la géométrie des rues favorise la création d'espaces ombragés. C'est le cas de la ruelle du ksar (PT14) qui est moins chaud de 3.15°C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Ce dernier est caractérisé par un fort SVF. Il apparaît bien que la forme urbaine, le degré d'ouverture au ciel, l'orientation des rues, ainsi que l'intensité du trafic urbain sont des facteurs agissant directement sur la température de l'air.

La végétation présente un effet rafraîchissant (PCI) qui diffère d'un site à l'autre le long du parcours urbain. Ces résultats corroborent ceux de plusieurs recherches (Ren et al., 2013 ; Oliveira et al., 2011 ; Potchter et al., 2010 ; Bowler et al., 2010). L'effet maximal de la végétation est enregistré au niveau du site PT16 dans la rue Ibn-Sina avec une valeur de 5.61°C. C'est l'écart de température entre le PT04 et le PT16. Cependant, dans le point de mesure au niveau du camping M'zab (PT03) et de la palmeraie de Bounoura (PT11) l'impact de la végétation n'est pas affirmé malgré la grande densité des plantations. Les points de mesures dans ces deux sites sont situés à la limite de l'espace vert et ne sont pas ombragés. Ce résultat montre que, durant le jour, l'effet rafraîchissant de la végétation est attribué principalement à l'ombre des canopées. Tewari et al. (2019) indiquent que la végétalisation présente un fort potentiel de lutte contre la chaleur urbaine dans les villes chaudes et arides.

Les résultats des mesures du rayonnement solaire montrent que les espèces d'arbres manifestent des taux de réduction variables. Le taux de réduction par la canopée de la végétation dépasse les 88%. Ces valeurs corroborent les résultats obtenus par Kotzen (2003). Ce dernier rapporte dans sa recherche dans le désert de Negev des réductions de l'ordre de 90% sous différentes espèces. Le choix des espèces d'arbres apparaît comme un élément important du confort thermique dans les espaces urbains. Les essences étudiées dans les espaces verts sont le palmier dattier, l'eucalyptus, le tamaris et le casuarina. Elles réduisent énormément le rayonnement solaire sous leur canopée. Ces espèces sont des arbres à feuillage persistant nécessitent peu d'irrigation et d'entretien. Elles sont bien

adaptées au climat de la ville de la région. D'autres recherches ont étudié la réduction du rayonnement solaire des essences d'arbres sous des climats chauds et arides. Abdel-Aziz et al. (2015) montrent que les canopées des arbres de Mimosa et Royal Poinciana peuvent réduire la radiation solaire de plus de 200 Kw au milieu de la journée en été dans la ville d'Amman en Jordanie. Ils rapportent des taux de réduction qui varient au cours de la journée. A Amman aussi, Alkhatib et Qrunfleh (2018) affirment que les arbres de Pinus halepensis et Cedruslibani réduisent considérablement l'énergie solaire incidente. A Constantine en Algérie (climat chaud et semi-aride), Louafi et al. (2017) ont mesuré une réduction de plus de 85 % du rayonnement solaire sous la canopée des arbres. Plusieurs études sur d'autres climats dévoilent des résultats similaires à nos travaux. Dans un parc à Lisbonne par exemple, des chercheurs ont mesuré une réduction moyenne de 88 % du rayonnement solaire sous une végétation dense (Andrade et Vieira, 2007). À Thessalonique (Grèce), Georgi et Ziafradis (2006) relatent une réduction du rayonnement jusqu'à 98 % sous la végétation. Les résultats s'accordent sur le fait que plus la couronne foliaire de l'arbre est dense, plus elle réduit et filtre le rayonnement et offre par conséquent, plus de confort thermique sous la végétation.

### **6.3.1.2. Variation nocturne de la température d'air (00:00h et 05 :00h)**

Pendant la nuit, les températures des sites sont relativement homogènes. L'écart est plus faible par rapport au jour. A minuit, il a été enregistré un îlot de fraîcheur d'une intensité de 0.6°C au niveau du pont de l'oued (PT10). Il semble que les courants d'air frais venant depuis la palmeraie du ksar de Ghardaïa contribuent à cette fraîcheur relative. La grande ouverture au ciel de ce point facilite aussi le refroidissement nocturne des surfaces et la baisse des températures d'air. Zhang et al. (2020) ont mis l'accent sur l'effet néfaste du piégeage de chaleur dans le milieu bâti. La ruelle dans le ksar (PT14) manifeste l'îlot de chaleur le plus intense à cette heure-ci (2.1C°). Le profil géométrique très profond des ruelles au ksar entrave la dissipation de l'énergie stockée dans les matériaux durant le jour. De surcroît, le flux de chaleur émis des climatiseurs (voir image dans le tableau 5.1) et des cuisines accentue le réchauffement nocturne (DeMunck et al., 2013). Dans le boulevard Didouche Mourad, le point de mesure situé dans la galerie couverte (PT08) maintient une température d'air plus élevée par rapport à l'autre point de mesure qui situé en dehors de la galerie (PT09). Le PT17 dans le boulevard 1<sup>er</sup> Novembre est sensiblement chaud à cette heure en raison de la chaleur anthropique des climatiseurs et de la circulation

automobile. La circulation ne commence à diminuer qu'à partir de 23h:00 h au niveau de cette artère (voir image dans le tableau 5.1).

Il a été constaté que certains espaces verts présentent à minuit des températures de l'air encore élevées. Manifestement, le manque d'irrigation a diminué sensiblement l'évapotranspiration et par conséquent l'effet rafraîchissant de la végétation. L'ombre de la canopée des arbres atténue la température d'air durant le jour, mais elle entrave considérablement le rafraîchissement nocturne par rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel. La ramification des branches et le feuillage de l'arbre piègent la chaleur au sein de la couronne foliaire. Il en résulte que les points de mesure sous la végétation affichent des températures élevées (Chudnovsky et al., 2004).

A la fin de la nuit (05h00), les sites à faible ouverture au ciel ont des températures d'air élevées. Le refroidissement nocturne est freiné dans certains sites où le ciel est obstrué. L'intensité de l'îlot de chaleur à cette heure est en général plus importante que celle mesurée à minuit. Le site de mesure au désert s'est refroidi toute la nuit par rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel. A l'extérieur de la ville, le vent élevé augmente les échanges convectifs entre l'atmosphère et le sol du désert. Par contre, en milieu urbain, les sites nécessitent beaucoup de temps pour libérer l'énergie stockée dans les matériaux. Ce retard est dû à la géométrie complexe du bâti, à la chaleur anthropique, à forte la capacité thermique des matériaux de construction, et à la faible ventilation dans les quartiers situés au fond de la vallée. En comparant le site du PT19 (la cité 20 Août) et le site PT20 (la cité 400 logements) par exemple, on s'aperçoit que la morphologie urbaine détermine en grande partie leur comportement thermique. La cité 20 Août est caractérisée par des ruelles étroites et brisées et un tissu compact. Cette configuration procure de l'ombre aux piétons durant le jour. Au niveau de la cité 400 logements par contre, la grande ouverture au ciel favorise la perte de chaleur durant la nuit. En général, un rythme de refroidissement nocturne rapide est constaté au niveau des sites avec un grand facteur de vue au ciel (PT02, PT04, PT11, PT20 et PT 13). Le gain de température d'air avec la grande ouverture du ciel n'est pas très important. Néanmoins, un grand SVF agit sur la température des surfaces, et par conséquent sur la température moyenne radiante  $T_{mr}$ . Cette dernière affecte directement la sensation du confort thermique dans ces espaces urbains (Venhari et al., 2019).

La maison traditionnelle dans le ksar applique aussi ce dispositif de refroidissement par l'ouverture au ciel dans son organisation architecturale. Deux ou trois heures avant le

coucher du soleil, les habitants ouvrent le chebek (l'ouverture zénithale) afin de dissiper la chaleur et laisser l'air frais de la nuit se déposer à l'intérieur (Ravereau, 1981). La toiture-terrasse devient durant la nuit le principal espace de vie de la maison traditionnelle.

Le désert autour de la ville manifeste des vitesses d'air élevées pendant la nuit (figure 6.4). En raison de la rugosité aérodynamique de la ville (due à la complexité du bâti et de la végétation) par contre les sites urbains ne bénéficient pas d'une bonne ventilation pour dissiper la chaleur urbaine. Cette situation est encore aggravée par l'effet de la topographie ; l'essentiel de la ville se trouvent dans une vallée encaissée tandis-que que le site de référence est au sommet de la colline à l'extérieur de l'agglomération (figure 5.5).

A l'aube, l'effet rafraîchissant de la végétation est relativement faible. À cause de la chaleur piégée au sein de la couronne foliaire, les points de mesure situés sous les arbres sont relativement chauds en ce moment. La hauteur relativement courte des troncs d'arbres dans les espaces verts étudiés ne favorise pas une ventilation efficace sous la canopée. Il apparait clairement que l'ouverture au ciel joue un rôle important dans le refroidissement des sites. Il est à noter aussi que l'évapotranspiration, étant faible ici, ne joue pas un grand rôle dans le rafraîchissement.

### **6.3.2. L'impact de la végétation sur les taux d'humidité**

#### **6.3.2.1. Variation diurne (14h30)**

Les mesures ne montrent pas de différence significative d'humidité dans les sites végétalisés par rapport aux autres sites urbains. L'élément végétal n'élève pas le niveau d'humidité relative dans les espaces verts en milieu de journée. En fait, quand les températures sont importantes, les végétaux ferment leurs stomates et arrêtent la transpiration. Ce phénomène physiologique est appelé « la résistance stomatique » (Saaroni et al., 2004 ; Dubost, 2002). Les plantes mettent en avant cette résistance afin de ne pas perdre toute leur réserve en eau. Les résultats montrent aussi l'absence de différence notable d'humidité entre les points de mesure situés sous la canopée des arbres et les points de mesure non-couvert au sein même de l'espace vert. Cependant, les écarts seraient probablement plus nuancés si l'analyse était exprimée en pression de vapeur d'eau (Ibsen et al., 2021 ; Puliafito et al., 2013 ; Givoni et Saaroni, 2003).

Les espaces verts étudiés le long du parcours urbain ne sont pas irrigués à l'exception du jardin de Mermed. En fait, quand les arbres deviennent adultes et matures, ils peuvent puiser l'eau en profondeur pour survivre, car les sites étudiés se trouvent dans le fond de la vallée. Ils ont donc capables à surmonter l'été. De surcroît, la plupart des

arbres plantés en ville sont de type xérophytique tel que le tamaris et le palmier dattier. D'autres essences sont aussi bien adaptées à la sécheresse de la région comme l'eucalyptus, le ficus ou le casuarina. La zone d'étude est située au fond de la vallée et est entourée de colline. Les sites urbains situés dans cette « cuvette » sont relativement protégés du vent chaud qui a un pouvoir desséchant. Des faibles valeurs d'humidité relative ont été aussi dévoilées dans une étude antérieure réalisée dans la vallée du M'zab (Bencheikh et Amieur, 2012). Il a été enregistré des valeurs d'humidité relative très faibles au sein de la palmeraie de Beni-Isguen, de l'ordre de 9 % en moyenne à la mi-journée. Il en ressort que l'effet humidifiant pourrait s'estomper au milieu du jour même pour un couvert végétal dense comme la palmeraie.

Dans la palmeraie de la ville de Biskra, caractérisée par un climat saharien similaire à celui de Ghardaïa, Matallah et al. (2020) notent aussi de très faibles niveaux d'humidité durant le jour. Aram et al., (2019) et Bowler et al., (2010) mentionnent que l'effet d'un petit groupe d'arbres ou d'un petit espace vert est très limité sur l'humidité relative de l'air. Le sol sec en permanence durant l'été dans les régions sahariennes ne contribue donc pas au phénomène d'évapotranspiration. Le taux d'humidité relative au niveau du site de référence (dans le désert) est de 10.75 %. Cette valeur est proche des mesures d'humidité effectuées dans la vallée du M'zab où un taux de 7 % dans le désert en milieu de journée a été relevé (Bencheikh et Amieur, 2012). La faible humidité mène alors à un grand flux de chaleur sensible et par conséquent à un important réchauffement de l'air.

### **6.3.2.2. Variation nocturne (00:00h et 05 :00h)**

A minuit, l'humidité relative au niveau des sites urbains est plus élevée de 7 % en moyenne par rapport au désert. Les points de mesure situés au sommet de la colline (le PT 01 et le PT 22), ont des valeurs similaires ce qui indique que l'altitude et la topographie ont un effet sur la variation de l'humidité à cause des vitesses de vent élevées en haut des collines (figure 6.2). Les espaces verts ne présentent pas de grande différence d'humidité relative à cette heure-là avec les autres sites urbains. Le PT16 sous la canopée de la végétation dans le jardin de Mermed manifeste une humidité relativement élevée en comparaison aux sites sans de végétation. Les faibles niveaux d'humidité dans les sites végétalisés sont dus en partie au manque d'irrigation, à la nature xérophytique des arbres. En effet, même avec des vents faibles, la différence d'humidité peut être facilement occultée entre les points de mesure sous la canopée et ceux non-couverts. Le mixage et le brassage de l'air tendent à dissiper l'humidité générée par la transpiration des arbres. Ces

facteurs expliquent en partie les faibles niveaux d'humidité et leur homogénéité dans toute la ville. Durant la nuit, l'effet humidifiant de la végétation se manifeste surtout dans le centre des espaces verts denses (le camping M'Zab et la palmeraie Bounoura par exemple). A 05h00, l'humidité relative connaît une légère augmentation dans tous les sites sauf le site désertique.

### **6.3.3. Effet de la vitesse de l'air sur les écarts de température et d'humidité**

L'intense irradiation solaire réchauffe fortement le sol au désert durant le jour. Il en résulte des gradients thermiques verticaux entraînant de grandes turbulences de l'air (Ao et al., 2017 ; Warner, 2009). Les points de mesure PT 01 et PT 22, situés en haut des collines enregistrent les vitesses de l'air les plus élevées. Les sites urbains sont relativement protégés du vent dans la ville en contrebas. Les vents faibles en ville sont dus à la forte rugosité aérodynamique du fait de la complexité géométrique des bâtiments, des aménagements urbains et de la végétation. Dans la ville saharienne de Ouargla (Algérie), Sebti et al. (2013) ont relevé des vitesses d'air allant jusqu'à 4 m/s dans le désert aux alentours de l'agglomération durant la nuit. Pour le PT10 au niveau l'oued M'zab, la vitesse moyenne au niveau du pont est aussi élevée qu'en haut de la colline avec une valeur de 4.35 m/s. Le cours d'eau sec ressemble à un canyon dont les parois sont formées par les façades des bâtiments et les murs de protection des berges. L'effet de « canalisation » accélère le vent à cet endroit.

Durant la nuit, les points de mesure en ville enregistrent aussi des vitesses d'air faibles. La topographie impacte directement la variation des vitesses du vent entre le milieu urbain et le désert, et par conséquent elle impacte aussi la distribution des températures et de l'humidité. La situation topographique des quartiers étudiés ne favorise pas le refroidissement nocturne par la ventilation naturelle. La surchauffe de l'air durant le jour se perpétue le long de la nuit et ne fait que baisser sans jamais atteindre des températures confortables. La température nocturne minimale est au-dessus des 30°C.

## **6.4. L'étude du niveau confort thermique extérieur**

Après l'étude du microclimat et la variation de l'îlot de chaleur de l'air dans la ville de Ghardaïa, nous passons à l'évaluation des niveaux du confort thermique dans les espaces extérieurs. Le confort thermique est évalué pour chaque site par le calcul de l'indice de confort THI. La figure 6.5 présente la variation des THI à 05h00, 14h30, et à

00h00. Le tableau 6.2 présente les valeurs moyennes de THI de tous les sites dans les trois moments ; celles-ci sont différenciées par couleur selon la catégorie du confort. On constate d'après le tableau 6.2 et la figure 6.5 que l'indice de confort est très élevé à travers toute la ville. Les résultats montrent que les conditions de confort extérieur à Ghardaïa sont très contraignantes en été. Les valeurs de THI suivent la variation des îlots de chaleur à Ghardaïa. De jour, les valeurs de THI des divers sites se trouvent dans la catégorie « Très chaud » et « Torride ». La nuit, tous les sites ont des valeurs de THI supérieures à 23 (THI > 23) ce qui rentre dans la catégorie « Chaud ».

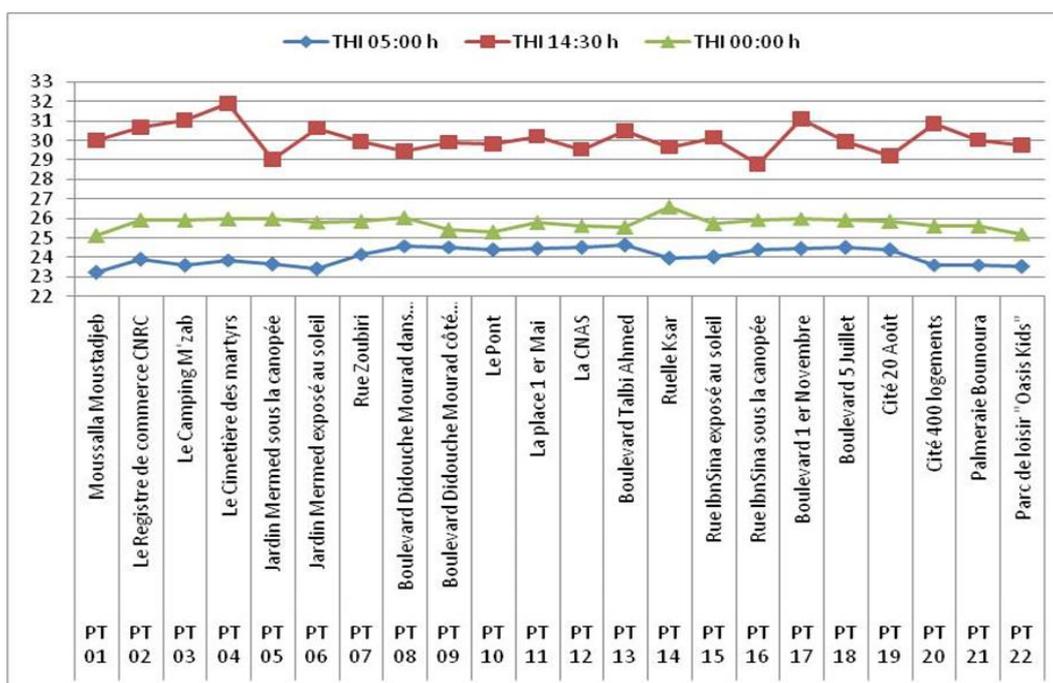


Figure 6.5: Valeurs de l'indice THI dans l'ensemble des sites.

Le site le plus inconfortable durant le jour est le point du cimetière des martyrs PT04 d'une valeur de 31,87. Comme évoqué dans le chapitre précédent, l'albédo faible de la chaussée goudronnée, l'intense circulation automobile et la grande ouverture au ciel expliquent cette grande valeur. Plusieurs sites sont dans la classe « Torride ». Le deuxième point le plus inconfortable est celui du boulevard 1er Novembre PT17 d'une valeur de 31,11. C'est une importante rue commerciale dans la ville de Ghardaïa. Le peu d'ombre et d'humidité fournie par les palmiers dattiers n'améliore pas le confort thermique pour les individus dans cette voie. De plus, la chaleur dégagée des véhicules et des climatiseurs ne fait qu'aggraver les conditions thermiques. Mathew et Siddhartha (2016) rapportent aussi que les climatiseurs aggravent les conditions de THI. Les autres sites affichent des valeurs supérieures à 28 (THI > 28). Dans la ville de Yazd en Iran caractérisée par un climat

chaud et aride, Heidari et al. (2014) ont enregistré une valeur de THI=34,1 en été à 15h00 h ; à Bandar Abbas la valeur atteint 36,03. De même à Doha (Qatar), Ghani et al. (2017) rapportent un maximum de THI = 29,44 en juillet. Les résultats de cette étude montrent clairement pourquoi les gens à Ghardaïa et dans les villes à climat similaire limitent au maximum leurs activités au milieu du jour. La plupart des chantiers de construction marquent un arrêt durant cette période extrême de l'été à cause des conditions pénibles de travail. Le risque d'un coup de soleil est très élevé quand on s'expose au soleil ou même en restant longtemps à l'extérieur dans les régions chaudes et arides (Abdel-Ghany et al., 2013).

Au niveau des sites avec végétation on note une légère amélioration du confort thermique. Dans le jardin de Mermed, le PT06 a une valeur « Torride » de 30,62 alors que le point PT05 sous la couronne foliaire des arbres passe à la catégorie « Chaud » (THI = 29,01) soit une diminution de 5,25 % (dTHI). Au sein de la rue Ibn-Sina le point PT16 a une valeur de THI = 30,15 tandis que le point couvert par la végétation PT15 passe à 28,79 soit une diminution de 4,51 %. Ces écarts peuvent être considérés comme modestes vu la faible densité de la végétation. Les études de Giannakis et al. (2016), Irmak et al. (2013) et Toy et Yilmaz (2010), entre autres, illustrent que les espaces verts améliorent les niveaux de THI. Un couvert végétal urbain plus dense pourrait améliorer davantage les conditions de confort thermique extérieur. En fait, Du et al. (2021) ont observé que la taille et la configuration du couvert végétal influencent les niveaux de THI. Georgi et Ziafradis (2006) rapportent des rafraîchissements sous la végétation dTHI > 15 % dans la ville de Thessalonique en été. A Beijing, Yan et al. (2012) ont obtenu une amélioration du confort sous la végétation de 4,3 % dans des sites où le THI à ciel ouvert peut aller jusqu'à 31,3. Nos résultats corroborent aussi ceux de Chebli et al. (2020) dans la ville de Kairouan (Tunisie). Les chercheurs montrent à travers une campagne de mesures itinérantes que l'indice de THI est dans la catégorie « chaud » à « très chaud » toute la journée. Pendant la nuit, une légère amélioration du niveau THI est observée.

Il a été constaté dans la section précédente que l'effet rafraîchissant de la végétation au niveau du point PT16 dans l'allée Ibn-Sina est plus intense avec une valeur de 5.61 °C. Les faibles niveaux d'humidité relative dans les abords des espaces verts (comme le site du camping M'zab PT03 et de la palmeraie de Bounoura et PT11) suite au manque d'évapotranspiration montrent que l'effet de la végétation sur le confort thermique est dû principalement à l'ombre de la canopée. Dans une étude sur l'oasis de Tolga en Algérie

(caractérisée par un climat aussi chaud et aride), Matallah et al. (2023) indiquent que la végétation n'a pas un grand effet sur le confort thermique extérieur durant le jour en été. Dans les climats humides par contre, les niveaux de THI mesurés sous la végétation sont plus confortables (Chow et al., 2016 ; Winansih et al., 2015 ; Ruiz et Correa, 2015a). La faible profondeur dans la plupart des rues étudiées les prive d'ombre fortement recherchée durant la journée. Les mesures du rayonnement solaire (tableau 6.1) montrent bien que l'irradiation solaire est très intense. Al-Abadla et al. (2020) indiquent aussi que l'indice de confort thermique reflète des conditions d'inconfort en raison de la chaleur estivale intense dans le contexte chaud et sec en Palestine.

Tableau 6.2: Valeurs de l'indice THI de l'ensemble de sites. (Le rouge pour la classe « Torride », l'orange pour « très Chaud » et le jaune pour « Chaud »)

		THI		
		05:00 h	14:30 h	00:00 h
PT 01	MoussallaMoustadjeb	23,24172	30,0113417	25,1241125
PT 02	Le Registre de commerce	23,9195867	30,6717063	25,89782
PT 03	Le Camping M'zab	23,61388	31,017697	25,9182575
PT 04	Le Cimetière des martyrs	23,87342	31,870585	25,97965
PT 05	Jardin Mermed (sous la canopée)	23,6475567	29,0165524	25,9844975
PT 06	Jardin Mermed (exposé au soleil)	23,431375	30,626668	25,8176525
PT 07	Rue Zoubiri	24,1767897	29,9158457	25,86655
PT 08	Boulevard Didouche (la galerie)	24,6072725	29,450194	26,0373225
PT 09	Boulevard Didouche (cimetière)	24,54073	29,90149	25,4404425
PT 10	Le Pont	24,3822588	29,8081075	25,28677
PT 11	La place 1 <sup>er</sup> Mai	24,4541125	30,2177533	25,78978
PT 12	La CNAS	24,521025	29,541214	25,64245
PT 13	Boulevard Talbi Ahmed	24,6215563	30,48184	25,53355
PT 14	Ruelle Ksar	23,95121	29,651515	26,578
PT 15	Rue IbnSina (exposé au soleil)	24,0280467	30,1514556	25,711
PT 16	Rue IbnSina (sous la canopée)	24,4060744	28,7919424	25,94855
PT 17	Boulevard 1 <sup>er</sup> Novembre	24,4530025	31,1124175	26,012305
PT 18	Boulevard 5 Juillet	24,49282	29,92321	25,923625
PT 19	Cité 20 Août	24,3839944	29,2043217	25,868
PT 20	Cité 400 logements	23,6279167	30,865075	25,605798
PT 21	Palmeraie Bounoura	23,628765	30,0174938	25,62211
PT 22	Parc de loisir "Oasis Kids"	23,535175	29,737485	25,217785

À minuit tous les sites -sauf la ruelle au ksar- sont dans la limite supérieure de la catégorie « Chaud » avec des valeurs de THI entre 25 et 26. À cette heure-ci après quatre heures du coucher du soleil les ambiances thermiques urbaines sont encore inconfortables. Les habitants de la ville portent un habit très léger en ce moment. La ruelle au ksar PT14 est la plus inconfortable suivie du point de la galerie du boulevard Didouche Mourad PT08 à cause de l'obstruction du ciel (THI= 26,57 et 26,03 respectivement). Au niveau de la ruelle au ksar, le profil géométrique très profond maintient la chaleur au fond de la ruelle, et crée une situation de stress thermique. La chaleur anthropique des climatiseurs et des cuisines aggrave les conditions thermiques durant la nuit. Pareillement, le point PT08 dans le boulevard Didouche Mourad qui se trouve dans la galerie a maintenu une valeur d'indice de confort plus élevée (THI=26,03) par rapport au point PT09 (THI=25,44) ce dernier étant ouvert vers le ciel. En général, les sites de grande ouverture au ciel connaissent la nuit une amélioration du confort thermique (le PT02, le PT04, le PT11, le PT20, et le PT 13). Les sites urbains qui correspondent à un îlot de chaleur connaissent des niveaux d'inconfort extrême.

Les espaces verts connaissent aussi un stress thermique élevé à minuit. Après quatre heures du coucher du soleil, leurs niveaux de confort sont semblables ou même supérieurs au désert. La canopée de la végétation offre de l'ombre durant le jour, mais elle garde l'espace en dessous d'elle encore chaud. La canopée joue un rôle de plafond chaud. L'évapotranspiration, faible même pendant la nuit, ne contribue pas sensiblement au confort dans les ambiances thermiques extérieures. Le point PT06 n'étant pas couvert par une canopée est légèrement frais que le PT05. Les autres espaces verts ne manifestent pas de différence notable dans les valeurs de THI. C'est le cas de la rue Ibn-Sina (PT15, PT16) et la palmeraie de Bounoura (PT21) par exemple. Les espaces verts ne fournissent pas assez d'humidité pour atténuer l'inconfort thermique. Les arbres sont en général de type xérophytique et sont bien adaptés à la sécheresse (le tamarix, le palmier dattier, le ficus, le casuarina, l'eucalyptus, etc.).

Vers la fin de la nuit les valeurs de THI sont encore élevées et se trouvent dans la catégorie « Chaud » (THI entre 23 et 24). Les hautes températures de la nuit provoquent ce niveau d'inconfort. Ce constat explique le fait que les habitants de ces régions chaudes passent la nuit à l'intérieur de chambres climatisées au lieu de la passer sur la terrasse comme on le faisait dans le passé. La chaleur dégagée des unités de climatiseurs participe à l'élévation des valeurs de l'inconfort à cette heure qui est censée être la période la plus

fraîche. Ces niveaux élevés d'inconfort thermique ne laissent pas de temps aux habitants de récupérer après avoir enduré une longue journée de chaleur extrême. À l'aube, à 05h00, les sites ayant un SVF important indiquent un indice de confort légèrement plus faible. C'est le cas du site du cimetière des martyrs ou la cité des 400 logements. La forme urbaine et la géométrie des constructions déterminent en grande partie le niveau de confort thermique. Le tissu compact qui est caractérisé par les ruelles étroites et brisées offre plus de confort thermique dans ses espaces urbains durant le jour grâce à l'ombre. En revanche, les sites à grande ouverture au ciel sont les plus confortables durant la nuit. Les points sous la canopée des arbres sont à cette heure-là plus inconfortables que les sites à ciel ouvert. Il en résulte que les sites exigus ou couverts même avec de la végétation sont défavorables d'un point de vue du confort thermique pendant la nuit. Venhari et al. (2019) ont trouvé aussi une corrélation positive entre le SVF et le niveau du confort thermique dans une ville de climat désertique. Le site désertique à l'extérieur de la ville est le plus confortable durant la nuit  $THI=23,24$ . Le sol du désert perd sa chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel tout le long de la nuit. De plus, les importantes vitesses de vent durant la nuit accentuent les échanges convectifs au niveau de la surface. Déjà évoqué dans le chapitre précédent, les sites urbains ne bénéficient pas d'une bonne ventilation nocturne par rapport au désert. La rugosité aérodynamique du milieu urbain et la topographie impacte donc fortement le niveau du confort thermique dans les espaces publiques.

## 6.5. Conclusion

### 6.5.1. La variation de l'îlot de chaleur de l'air

La période de mesure a été représentative des conditions climatiques estivales à Ghardaïa. Un gradient thermique maximal de 6 °C a été observé. Les sites de mesure manifestent soit un îlot de chaleur ou un îlot de fraîcheur. De nombreux îlots de chaleur ont été constatés le long du parcours urbain, ce qui conduit à les qualifier plutôt d'« archipel » de chaleur. Nos résultats corroborent ceux de Mohammed et al. (2020). Ces derniers rapportent des variations de températures intra-urbaines et des îlots de chaleurs multiples à Dubaï.

Durant le jour, le rayonnement solaire intense surchauffe les matériaux et l'air ambiant de la ville. Durant les courtes heures de la nuit, la ville ne parvient pas à relâcher toute la chaleur emmagasinée. La prolifération des climatiseurs provoque un surplus d'énergie à l'atmosphère urbaine. De même, la circulation automobile est une source importante de chaleur anthropique. La végétation produit un effet rafraîchissant maximal

de 5.61°C. Le milieu rural environnant se refroidit plus rapidement par rapport à la ville durant la nuit. Les sites ayant une grande ouverture au ciel connaissent aussi un rythme de refroidissement nocturne plus rapide. La couleur sombre des voies goudronnées participe à l'élévation des températures d'air.

L'ombre de la canopée de la végétation réduit significativement la température durant le jour, mais elle entrave le refroidissement nocturne. La chaleur du jour se trouve piégée entre le feuillage et le branchage des arbres. L'air sous la canopée demeure chaud en comparaison aux sites ouverts au ciel. Vers la fin de la nuit, la végétation présente un effet rafraîchissant maximal de 2.08°C. En raison du manque d'irrigation, l'évapotranspiration ne participe réellement pas au rafraîchissement de l'air. Les ambiances urbaines ne sont pas confortables même pendant la nuit, et le microclimat urbain n'a pas de temps pour se refroidir. Un couvert végétal urbain plus dense et bien irrigué pourrait améliorer les ambiances thermiques extérieures.

### **6.5.2. Le confort thermique en espace extérieur**

Les résultats présentés sont proches de ceux d'Ichim et Sfica (2020) et Yang et al. (2016) qui indiquent que la variation de THI suit la variation de l'ICU. Les résultats de l'indice du confort thermique THI qui croise la température avec l'humidité de l'air, illustrent le niveau de stress thermique que subit les habitants de Ghardaïa. L'indice THI bascule entre la catégorie « Torride » et « Chaud », même pendant la nuit. L'élévation des températures estivales ces dernières décennies accentuent les situations de stress thermique (Rusdayanti et al. 2021). Le corps humain connaît un épuisement permanent. Les sites ayant un SVF important présentent un indice de confort légèrement plus faible durant la nuit. Au niveau des espaces verts on note une légère amélioration du confort thermique (de 5,25 %). Les principaux facteurs concourant à la surchauffe urbaine sont : la grande capacité thermique des matériaux de construction, le faible albédo des surfaces, la complexité du bâti, la faible évapotranspiration, le manque du végétal urbain irrigué et la chaleur anthropique.

## **CHAPITRE VII**

# **ÉTUDE DE L'ÎLOT DE CHALEUR DE SURFACE**

## **7. ÉTUDE DE L'ÎLOT DE CHALEUR DE SURFACE**

### **7.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de l'étude de l'îlot de chaleur de surface, issus du traitement des images satellites. Dans un premier temps sera présentée la carte d'occupation du sol selon la classification de l'image satellitaire. La répartition du couvert végétal est évaluée à partir d'indices de végétation. Une étude statistique est réalisée afin d'évaluer la corrélation entre la température de surface et les différents indices ; en particulier, la relation entre la végétation et la distribution de l'îlot de chaleur de surface.

Un masque a été réalisé afin de délimiter la zone du centre la plus dense et la plus peuplée de la ville de Ghardaïa. Cette partie est considérée comme « le centre-ville » par distinction aux parties éparpillées dans la zone d'étude comme la zone industrielle, le complexe sportif, la zone des sciences (l'université, les instituts, les résidences universitaires, etc.), l'aéroport, Noumerat, etc. La zone du centre-ville est délimitée par un contour dans une couche vectorielle. Les résultats de la température de surface, des indices spectraux ainsi que de la carte d'occupation du sol sont extraits de l'image globale de la zone d'étude. Les cartes du centre-ville permettent une analyse plus fine car l'échelle est plus grande. Cette partie centrale dans l'image regroupe les ksour de la pentapole à savoir Ghardaïa, Melika, Benisguen, Bounoura et El-Ateuf et toute la zone urbanisée entre eux.

### **7.2. La cartographie de l'occupation du sol à Ghardaïa**

#### **7.2.1. La composition colorée**

L'image composite de Sentinel-2A est de meilleure résolution et plus informative que celle de Landsat-8. Elle permet en effet une meilleure interprétation visuelle. Dans la composition colorée couleurs-naturelles la bande rouge est affectée au canal rouge, la bande bleue au canal bleu et la bande verte au canal vert. La figure 7.1 présente la composition colorée couleurs-naturelles de la zone d'étude à partir des images Sentinel-2A. Toutes les cartes sont projetées dans le système WGS84 / UTM 31N.

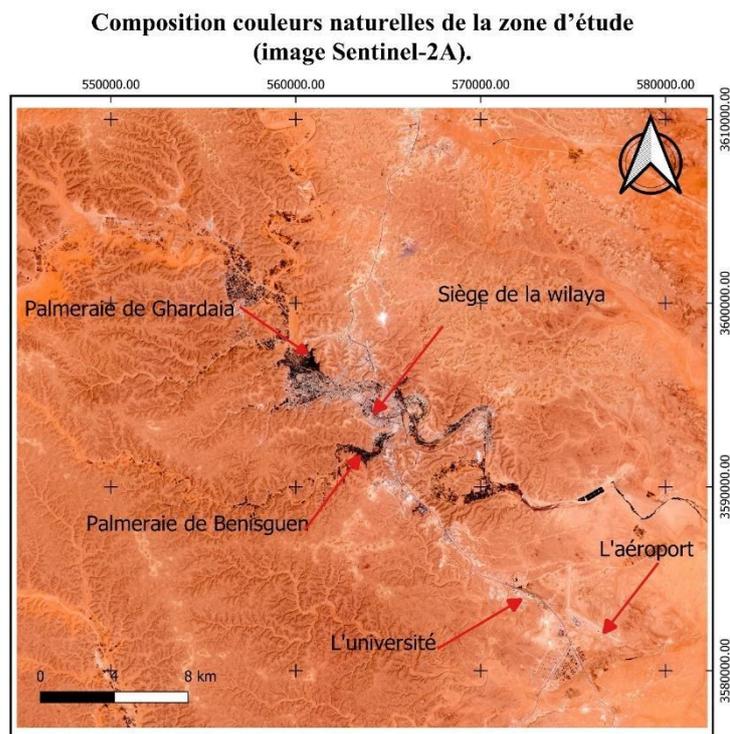


Figure 7.1 : Composition couleurs-naturelles de la zone d'étude (image Sentinel-2A 16/08/2015).

La composition colorée fausses-couleurs consiste à attribuer aux canaux rouge, vert, bleu d'autres bandes spectrales. Ces dernières seront affichées par des couleurs fictives. La figure 7.2 montre la composition fausses-couleurs de la zone d'étude à partir des images Sentinel-2A. La couleur rouge correspond à la présence de végétation.

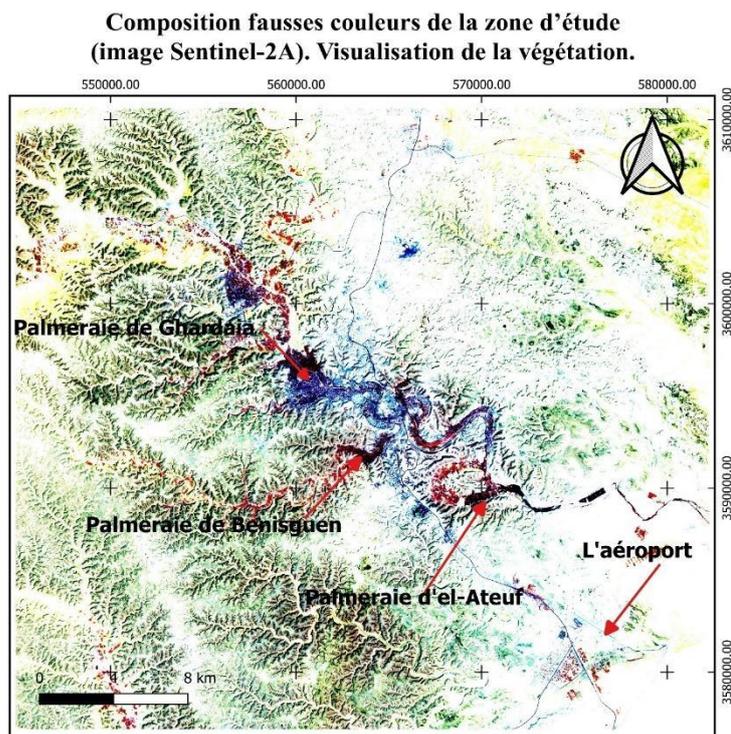


Figure 7.2 : Composition fausses couleurs de la zone d'étude (image Sentinel-2A 16/08/2015). La couleur rouge met en évidence la végétation.

### 7.2.2. Classification de la zone d'étude et carte d'occupation du sol

Les différents traitements effectués sur l'image Sentinel-2A ont permis de réaliser la classification non supervisée de la zone d'étude sur l'ensemble de l'image (Land cover/Land use). Lors des traitements, un regroupement des classes a été opéré. La classification finale a abouti à l'élaboration de la carte de l'occupation du sol de la ville de Ghardaïa au 16/08/2015. Quatre classes d'occupation du sol ont été identifiées avec une nette discrimination. Ces classes sont : Urbain, Végétation, Désert et Eau (figure 7.3). Ces classes majeures reflètent les types de surfaces dominantes dans le territoire de Ghardaïa, en particulier la classe "Désert" et "Urbain". L'image raster est convertie en image vectorielle pour un meilleur rendu cartographique. La carte d'occupation du sol dans le périmètre du centre-ville est présentée dans la figure 7.4. Les thèmes retenus servent à comprendre la spatialisation des températures dans la ville de Ghardaïa.

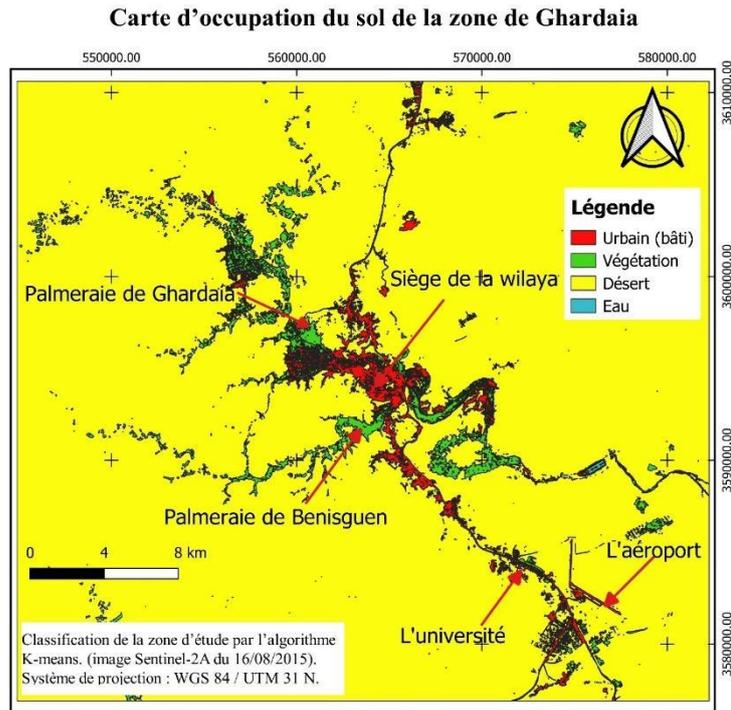


Figure 7.3 : Carte d'occupation du sol de la zone de Ghardaïa. (Image Sentinel-2A du 16/08/2015).

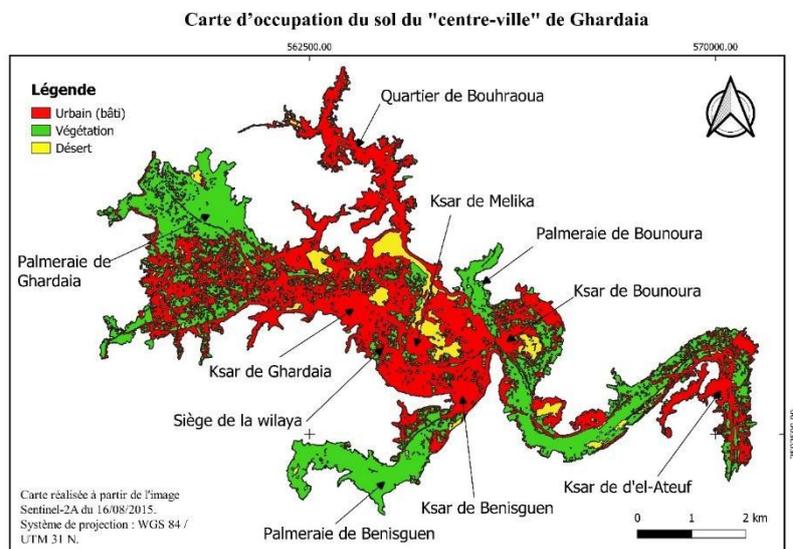


Figure 7.4 : Carte d'occupation du sol du « centre-ville » de Ghardaïa.

### 7.2.2.1. L'évaluation de la précision de la classification

La post-classification est primordiale pour valider les résultats de la classification. La validation de la classification a été effectuée par la sélection d'échantillons de vérité-terrain et des points de vérification extraits d'images à très hautes résolution issues de «

Google Earth ». Des dizaines de points de contrôle ont été tirés par classe. Les données de vérité-terrain sont comparées aux données de la classification dans un tableau de contingence. Les résultats de la matrice de confusion sont présentés dans le tableau 7.1. La précision totale de la classification est de 95.6 %. Le coefficient de Kappa est de 0,83. Ces valeurs reflètent une bonne précision de la classification (tableau 3.1).

A partir de la carte d'occupation du sol, la surface de chaque classe a été calculée (tableau 7.2). Les proportions des classes d'occupation du sol sont inégales. La surface de la classe "Eau" est très faible. La végétation occupe une surface de 36412800 m<sup>2</sup>.

Tableau 7.1: La matrice de confusion de la classification (tableau de contingence).

Classification	Vérité terrain				Total général	Erreur de commission
	1	2	3	4		
1	88	1			89	0,011
2	6	428	3	5	442	0,031
3	1	6	404	7	418	0,033
4		11	17	319	347	0,080
Total général	95	446	424	331	1296	
Erreur d'omission	0,073	0,040	0,047	0,036		0,956

Tableau 7.2 : Nomenclature et surface des classes.

N°	Classe	Description	Surface (km <sup>2</sup> )
1	Eau	Eau de surface, bassins d'eau	0,31
2	Urbain (bâti)	Surface bâtie (construction, voirie, etc.)	28,29
3	Végétation	Palmeraie, espaces verts, parcelles agricoles, jardins, etc.	36,41
4	Désert	Les collines rocheuses, Sol nu (lit d'oued, sol alluvionnaire, etc.), terrain vacant, dune,	1194,41

### 7.2.3. Cartographie du végétal par les indices de végétation

#### 7.2.3.1. L'indice NDVI

L'indice NDVI est l'indice de végétation le plus utilisé, il se révèle être un outil bien adapté pour visualiser les couverts végétaux. C'est un indice largement utilisé dans les

études d'îlot de chaleur urbain de surface. Les valeurs de l'indice NDVI varient entre -1 et +1 (en théorie). La figure 7.5 montre les valeurs de l'indice NDVI dans la zone d'étude. Elles varient de -0.28 à 0.86. Les valeurs négatives correspondent aux surfaces de l'eau. Les valeurs faibles correspondent aux zones urbanisées et aux sols nus. Quant à la végétation elle a des valeurs NDVI positives, et plus la valeur est importante plus le couvert végétal est dense. Les valeurs importantes de NDVI sont situées dans les palmeraies, les périmètres agricoles et dans la végétation urbaine. La figure 7.6 visualise les valeurs de NDVI dans le centre-ville.

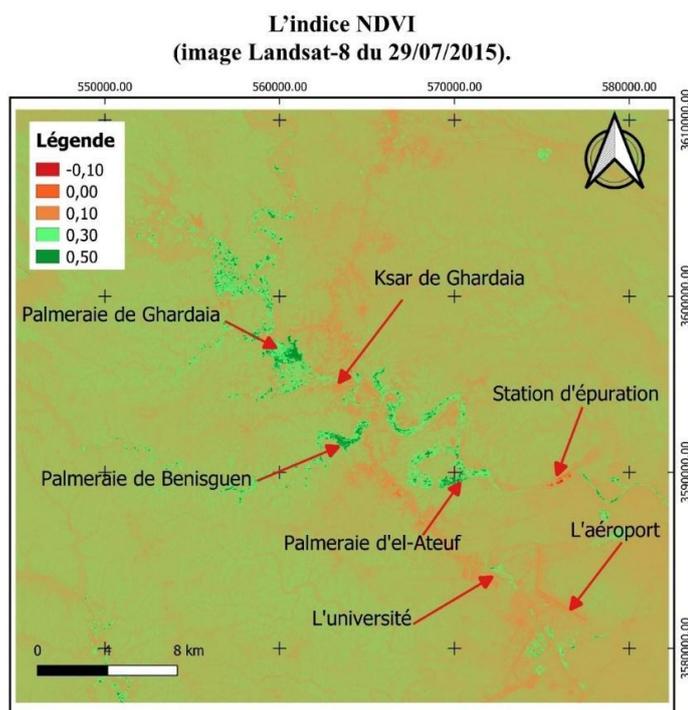


Figure 7.5 : L'indice NDVI de la zone d'étude (Image Landsat-8).

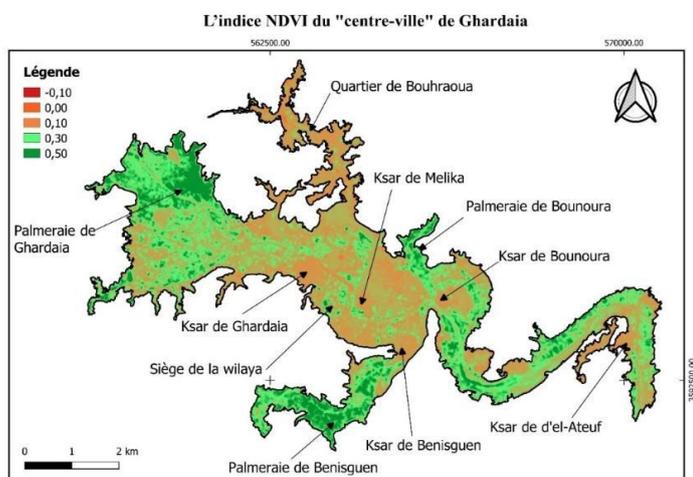


Figure 7.6 : L'indice NDVI du « centre-ville » de Ghardaïa.

### 7.2.3.2. La proportion de la végétation Pv

La figure 7.7 présente les valeurs de la proportion de végétation Pv dans la zone d'étude. Les valeurs de la proportion de végétation varient de  $4.1450512195588e-31$  à 1.

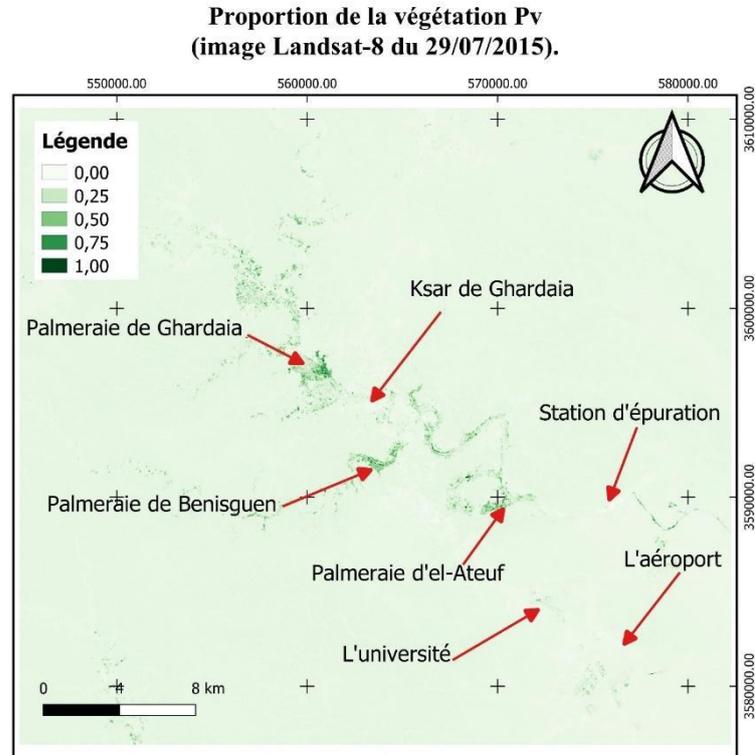


Figure 7.7 : La proportion de la végétation de la zone d'étude. (Image Landsat-8).

### 7.2.3.3. L'indice SAVI

L'indice de végétation SAVI est aussi un bon indicateur de la présence de la végétation. La figure 7.8 présente les valeurs de l'indice SAVI (l'indice de végétation ajusté du sol) dans la zone d'étude. Les valeurs de l'indice SAVI varient de -0.01 à 0.48. Les valeurs faibles correspondent aux surfaces de l'eau, puis aux zones bâties et aux sols désertiques. Les plus importantes valeurs correspondent aux couverts végétaux. Les valeurs de SAVI dans le centre-ville sont extraites dans la figure 7.9.

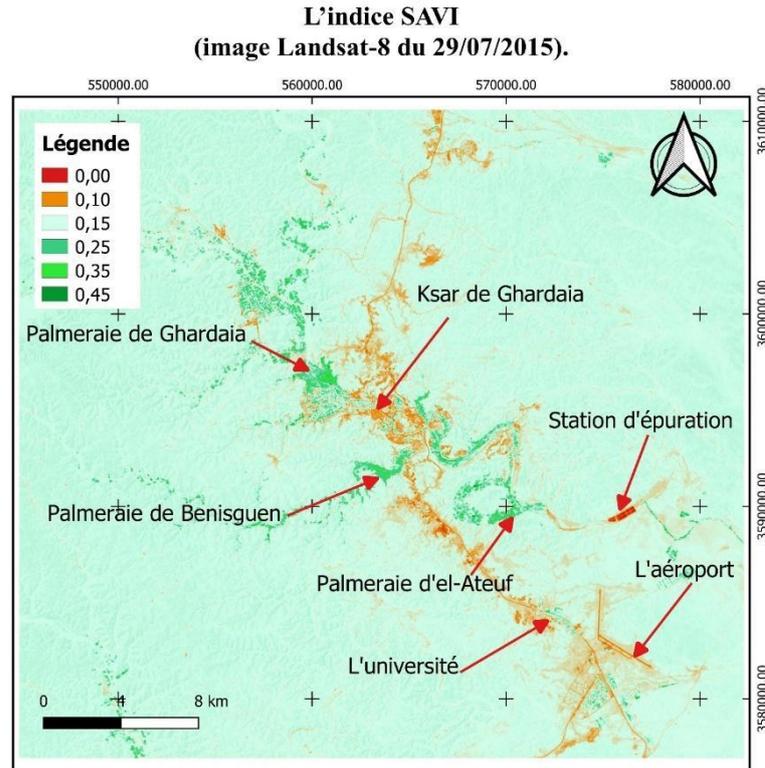


Figure 7.8 : L'indice SAVI de la zone d'étude (Image Landsat-8).

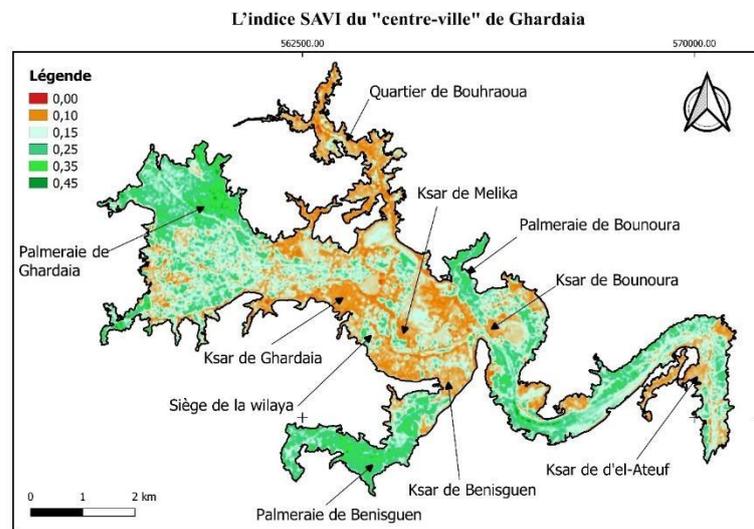


Figure 7.9 : L'indice SAVI du « centre-ville » de Ghardaïa.

## 7.2.4. Cartographie du bâti

### 7.2.4.1. Cartographie du bâti via l'indice NDBI

L'indice NDBI permet d'identifier le bâti dans la zone d'étude. La figure 7.10 présente les valeurs de l'indice NDBI dans la zone d'étude. Elles varient de -0.41 à 0.25. Les valeurs négatives correspondent aux surfaces de l'eau et de la végétation. Les valeurs

faibles correspondent aux zones bâties. Les sols nus et rocheux au désert affichent les valeurs les plus importantes. Dans la figure 7.11, les nuances du NDBI sont plus marquées au niveau du centre-ville.

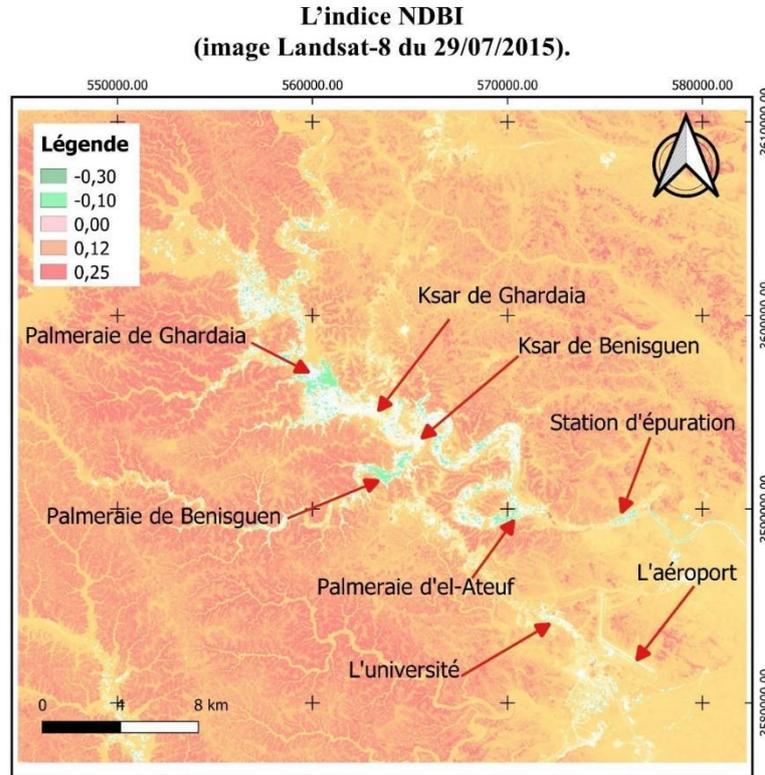


Figure 7.10 : L'indice NDBI de la zone d'étude (image Landsat-8).

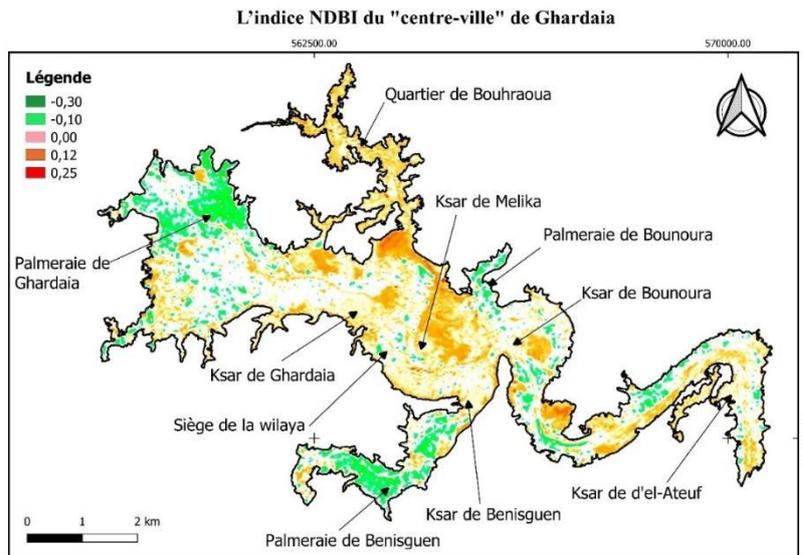


Figure 7.11 : L'indice NDBI du « centre-ville » de Ghardaïa.

### 7.3. Cartographie de l'émissivité de surface

La figure 7.12 ci-après présente l'émissivité des surfaces dans la zone d'étude calculée à partir des images Landsat-8. Les valeurs de l'émissivité varient de 0.986 à 0.990.

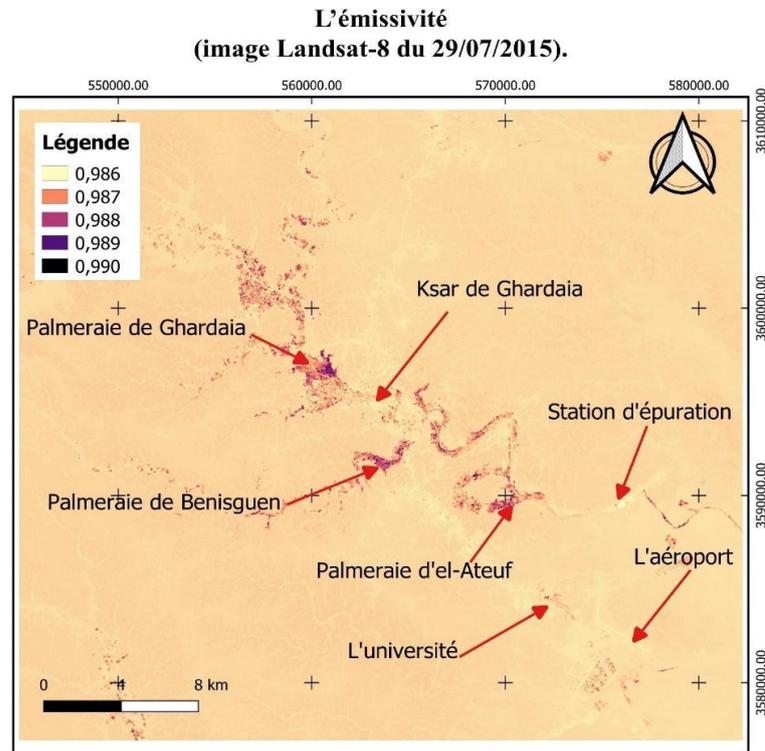
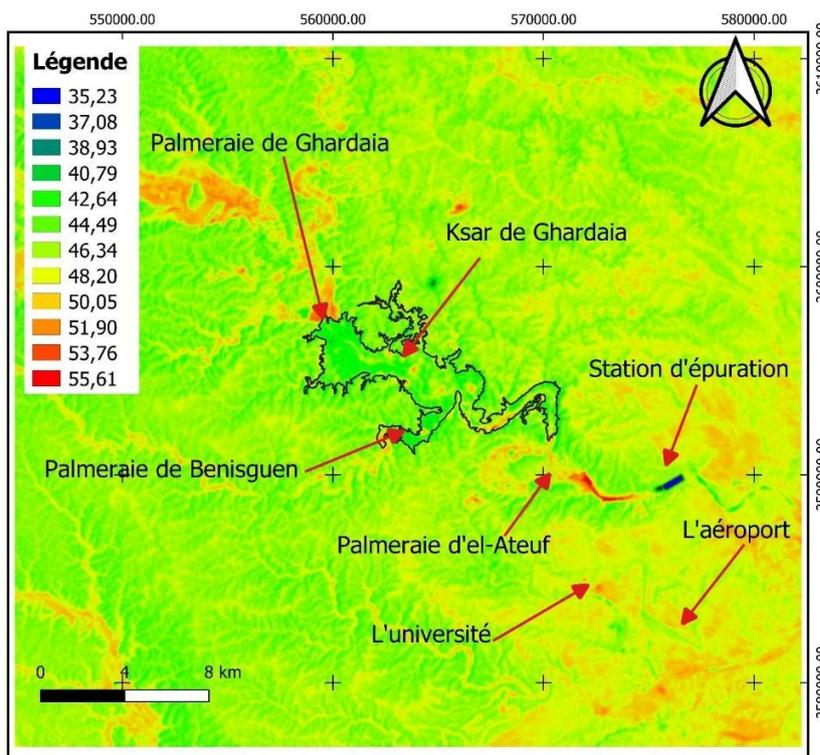


Figure 7.12 : La carte des valeurs de l'émissivité de surface (image Landsat-8).

### 7.4. Cartographie de la température de surface LST

Après un long processus de traitement, la température de surface est enfin extraite du canal infrarouge de l'image satellite Landsat-8. La figure 7.13 ci-dessous montre la carte thermique et la répartition de la température de surface LST pour la ville de Ghardaïa et ses alentours, pour la journée du 27 Juillet 2015 à 10h20. Les zones aux couleurs rouges représentent les surfaces les plus chaudes. Les zones en vert et bleu correspondent plutôt aux surfaces avec des températures beaucoup plus basses. Les nuances de températures de surface présentes sur cette carte seront ensuite analysées et comparées avec la carte d'occupation du sol issue de la classification de l'image Sentinel-2A. Afin de pouvoir bien visualiser la distribution de la température de surface dans le centre-ville, une carte d'une échelle plus fine est créée (figure 7.14). La température maximale mesurée dans toute la zone d'étude est de 55.60 °C tandis-que la température la plus basse est de 35.22 °C.

Carte des températures de surface LST (°C) de la zone de Ghardaia. (image Landsat-8 du 29/07/2015 à 10h20).



Le contour noir définit la zone densément urbanisée et peuplée de la ville de Ghardaia.

Figure 7.13 : Température de surface (LST) de la ville de Ghardaïa et ses alentours, pour la journée de 27 Juillet 2015 à 10h20.

Température de surface LST (°C) du « centre-ville » de Ghardaia.

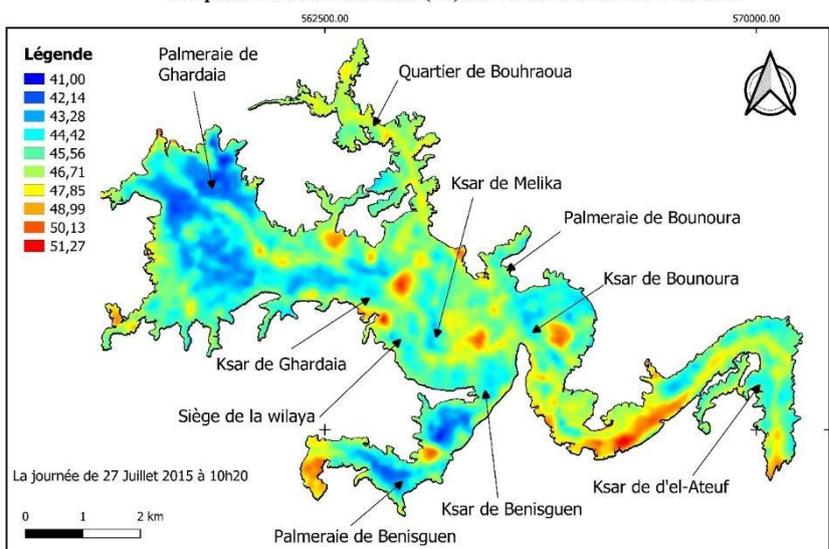


Figure 7.14 : Température de surface (LST) du « centre-ville » de Ghardaïa pour la journée de 27 Juillet 2015 à 10h20.

### 7.4.1. La corrélation entre le LST et les NDVI, SAVI et NDBI

Afin d'analyser les relations entre le LST et les indices spectraux NDVI, SAVI et NDBI, des corrélations statistiques ont été établies dans un premier temps pour la zone d'étude entière, puis uniquement pour le centre-ville de Ghardaïa<sup>1</sup>. Les graphes sont utilisés car ils affichent la densité des pixels et sont donc plus explicites.

#### 7.4.1.1. Corrélation entre le LST et les indices spectraux dans toute la zone d'étude

Les relations entre LST et les indices spectraux (NDVI, SAVI et NDBI) sont mises en évidence dans les figures 7.15a, 7.15b et 7.15c. Le tableau 7.3 récapitule les valeurs des corrélations.

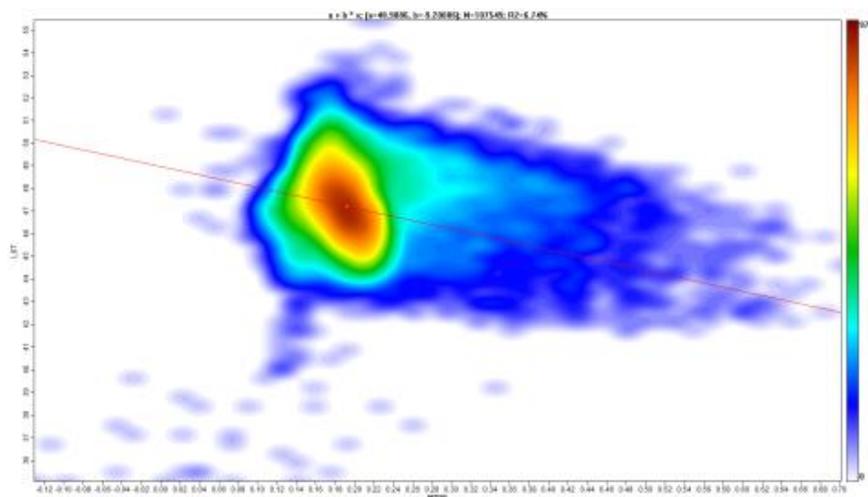


Figure 7.15a : La relation entre le LST et le NDVI (la zone d'étude entière).

<sup>1</sup> La légère différence dans les valeurs entre les graphes et les tableaux est due aux fonctionnalités et manipulations différentes entre le programme R-studio et Saga

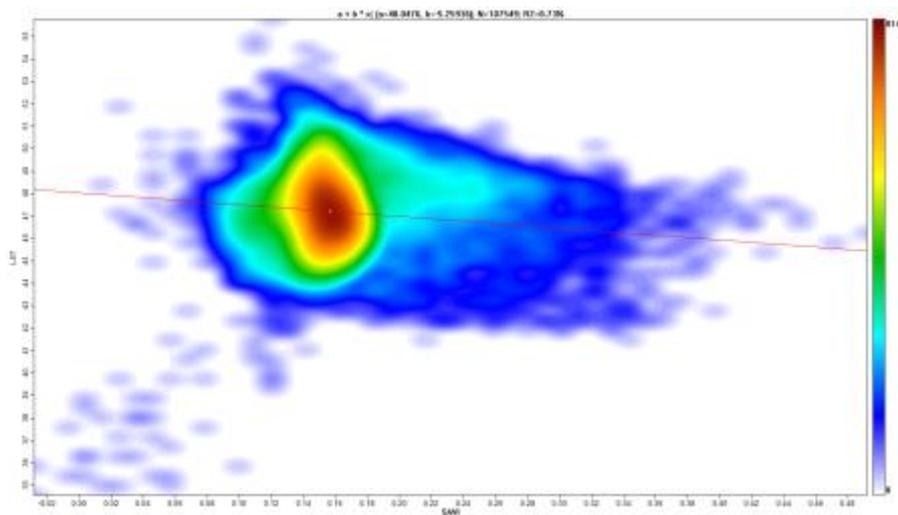


Figure 7.15b : La relation entre le LST et le SAVI (la zone d'étude entière).

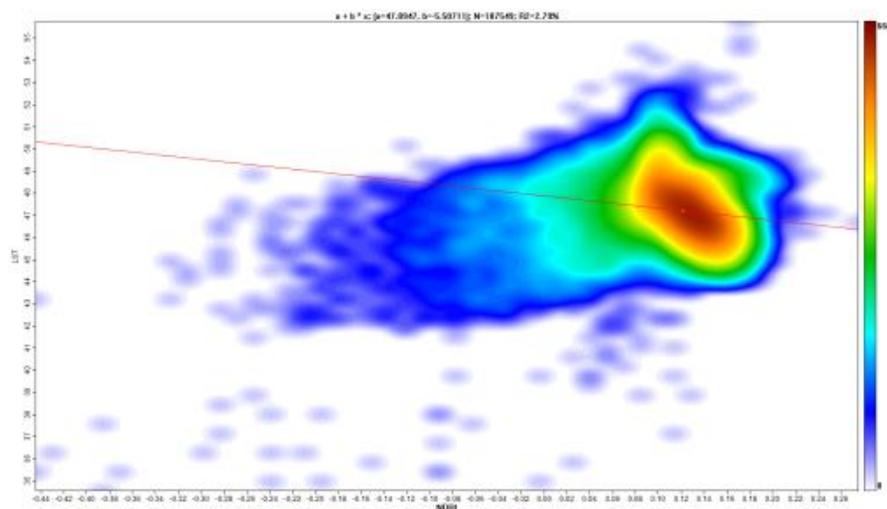


Figure 7.15c : La relation entre le LST et le NDBI (la zone d'étude entière).

Tableau 7.3 : Statistiques des corrélations LST, NDVI, NDBI et SAVI (toute la zone d'étude).

	LST vs NDVI	LST vs NDBI	LST vs SAVI
r	-0.2566239	-0.161984	-0.086647
R-squared	0.06586	0.02624	0.007508
p-value	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16
100*var	6.585581	2.623882	0.7507703
a	48.968235	47.868696	48.05611
b	-9.096596	-5.295644	-5.31473

### 7.4.1.2. Corrélation entre le LST et les indices spectraux dans le centre-ville de Ghardaïa

Les résultats des corrélations entre le LST et les indices spectraux (NDVI, SAVI et NDBI) dans le centre-ville de Ghardaïa sont présentés dans les figures 7.16a, 7.16b et 7.16c. Le tableau 7.4 récapitule les valeurs des corrélations.

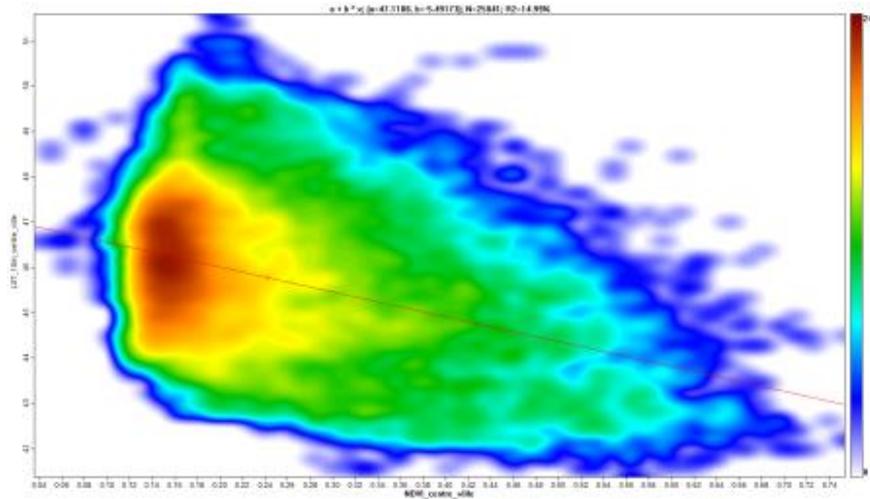


Figure 7.16a : La relation entre le LST et NDVI (dans le centre-ville).

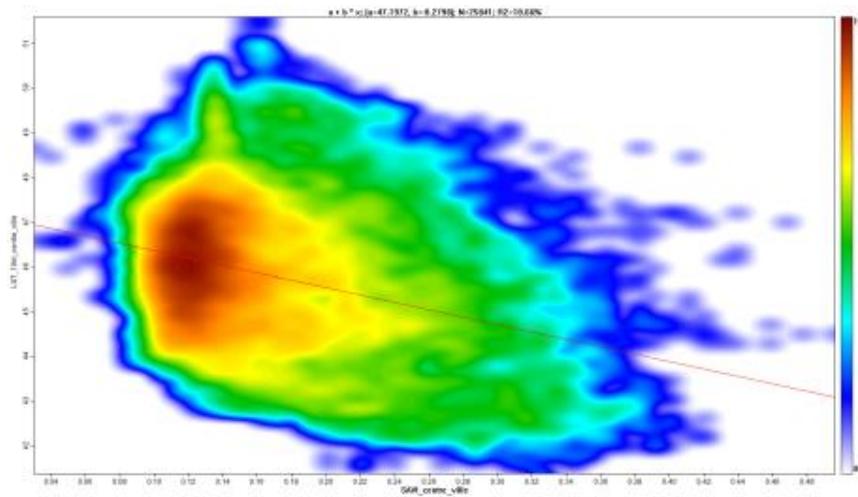


Figure 7.16b : La relation entre le LST et SAVI (dans le centre-ville).

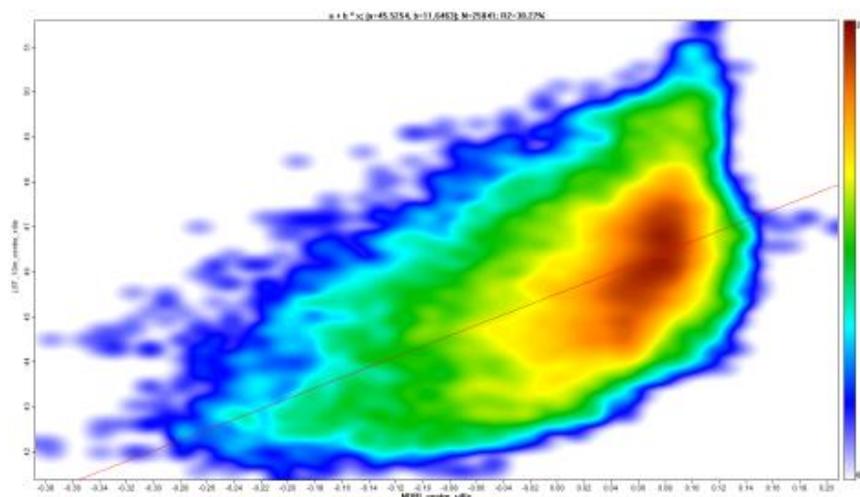


Figure 7.16c : La relation entre le LST et NDBI (dans le centre-ville).

Tableau 7.4 : Statistiques des corrélations LST, NDVI, NDBI et SAVI (pour le centre-ville).

	<b>LST vs NDVI</b>	<b>LST vs NDBI</b>	<b>LST vs SAVI</b>
r	-0.3896051	0.5531127	-0.3283089
R-squared	0.1518	0.3059	0.1078
p-value	< 2.2e-16	< 2.2e-16	< 2.2e-16
100*var	15.17922	30.59336	10.77867
a	47.120809	45.525751	47.205958
b	-5.527321	11.705688	-8.322922

### 7.4.1.3. Statistiques de LST, NDVI, NDBI et SAVI par classe

Le tableau 7.5 présente les statistiques de la température de surface LST, ainsi que les indices spectraux NDVI, NDBI et SAVI par classe sur l'ensemble de la zone d'étude.

Tableau 7.5 : Statistiques de LST, NDVI, NDBI et SAVI par classe (résolution 10m).

<b>Classe</b>	<b>LST_mean</b>
Eau	36.93
Urbain (bâti)	46.50
Végétation	47.34
Désert	47.23

Classe	NDVI_mean
Eau	0.075
Urbain (bâti)	0.154
Végétation	0.329
Désert	0.188

Classe	NDBI_mean
Eau	-0.238
Urbain (bâti)	0.064
Végétation	-0.007
Désert	0.127

Classe	SAVI_mean
Eau	0.017
Urbain (bâti)	0.119
Végétation	0.235
Désert	0.155

La cartographie de l'occupation du sol et la carte thermique sont réalisées après une longue séquence d'opérations. Les résultats obtenus sont analysés et discutés dans la section suivante, ainsi que l'étude statistique des indices spectraux.

## 7.5. Discussion

### 7.5.1. Carte d'occupation du sol de Ghardaïa

Les figures de la carte d'occupation du sol (figure 7.3 et figure 7.4) montrent une très bonne distinction entre les classes. Les zones urbanisées de la ville de Ghardaïa sont éparpillées sur un vaste territoire.

On note une dominance de la classe " Désert " que ce soit autour de la ville et même dans les sols nus et les secteurs non-urbanisés de la ville. La surface de l'eau représente une infime fraction de la surface du périmètre d'étude (0,3123 km<sup>2</sup>). Les pixels de la classe " Eau " représentent les bassins de la station de lagunage dans le sud-est de la ville en aval de l'oued M'zab. L'absence de plans d'eau naturels reflète une fois de plus l'extrême aridité de la région. Les surfaces de la classe " Urbain " et de la classe " Végétation " représentent une emprise de 28,299 km<sup>2</sup> et 36,4128 km<sup>2</sup> respectivement. Avant la colonisation chaque ksar avait une vaste palmeraie (Bensaleh et al., 2018). Depuis, l'urbanisation accélérée n'a cessé de réduire la surface des palmeraies qui étaient

supérieure à la surface des ksour. Une grande partie de la classe "Urbain" dans le centre - ville est en fait une conversion du couvert végétal en zone bâtie. Les ksour se distinguent dans l'image par leur organisation particulière : un tissu compact aux ruelles étroites, et absence de végétation. L'urbanisation actuelle a fait que la ville se développe dans les fonds sinueux des vallées et à l'extérieur de la vallée comme c'est le cas du quartier Bouhraoua, la zone industrielle, le quartier de la zone des sciences, le complexe sportif, l'université, l'aéroport, etc. Ainsi, le relief de la zone a dicté un mode de croissance et de développement qui a fait que la ville se développe en parties qui ne sont pas "soudées " spatialement. Les résultats de la classification sont semblables à ceux issus des travaux de Fan et al. (2017) sur cinq villes désertiques dans différents continents (figure 7.17).

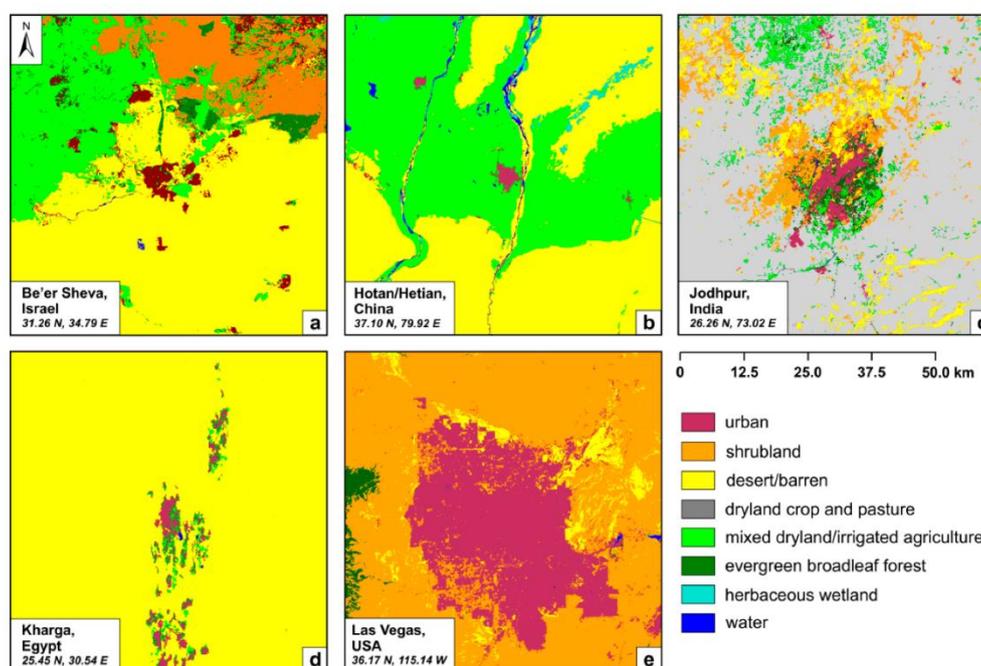


Figure 7.17 : Classification de l'occupation du sol dans cinq villes désertiques différentes (Fan et al., 2017).

La carte d'occupation du sol montre que les polygones de la classe Végétation s'accordent à la morphologie irrégulière des zones bâties à Ghardaïa. La construction sur les sommets aplatis des collines a conduit à des secteurs urbanisés de forme longitudinale, séparés par des ravins abrupts. De plus, la carte illustre bien l'urbanisation qui suit l'axe de la route nationale n°1, du nord (quartier Bouhraoua) au sud de la ville (l'aéroport). Il est à noter qu'un composant important du territoire urbain du M'zab a survécu à l'urbanisation effrénée, il s'agit du cimetière. Occupant de larges surfaces, les cimetières ont gardé leurs emprises au sein de la ville malgré le dysfonctionnement qu'ils entraînent de nos jours. Les

zones vides dans les cimetières sont protégées par leurs enceintes selon des considérations religieuses et spirituelles. L'oasis, par contre, n'a pas été sauvegardée. Son emprise continue de diminuer (Côte, 2002).

### **7.5.2. Répartition du couvert végétal à Ghardaïa**

Si la carte d'occupation du sol illustre la répartition du couvert végétal dans la zone d'étude, les cartes d'indices de végétation (NDVI, Pv, SAVI) donnent une évaluation de l'état et la densité de la végétation. Elles montrent une concentration de la végétation dans les palmeraies des quatre ksour (Ghardaïa, Ben-Isguen, Bounoura et El-Atteuf). Les valeurs de NDVI et SAVI y sont très importantes parce que la végétation est très dense. La carte de NDVI montre une valeur maximale de 0.86 dans les secteurs denses des palmeraies, tandis-que ces mêmes secteurs présentent une valeur maximale de 0.48 sur l'échelle de SAVI. La palmeraie de Melika présente plutôt de faibles valeurs de NDVI. Elle est en voie de disparition. Les espaces verts dans le centre-ville et dans les extensions contemporaines sont souvent de faible taille, ils sont moins bien discriminés que les palmeraies. Ils affichent des valeurs faibles soit pour le NDVI ou le SAVI. Les pixels dans le centre-ville (figure 7.5 et 7.8) reflètent un mélange de signal entre la classe "Urbain" et "Végétation" car les arbres d'alignement ou les jardins ont des dimensions modestes. Les cartes d'indices de végétation montrent aussi que la végétation est quasi absente en-dehors des périmètres urbains et agricoles. Les plans d'eau dans la station de lagunage affichent des valeurs de NDVI négatives (-0.28).

La comparaison entre les résultats de l'indice NDVI et SAVI montre que chacun des deux indices présente une bonne discrimination de la présence et la densité de la végétation. Certains chercheurs estiment que le SAVI est un bon indice pour le contexte aride et semi-aride (Benkouider et al., 2013).

### **7.5.3. Répartition du bâti à Ghardaïa (Analyse de NDBI)**

La carte de l'indice NDBI (figure 7.10) informe sur la tache urbaine et les zones urbanisées. Les valeurs négatives représentent plutôt l'eau ou la végétation (-0.30), les valeurs moyennes représentent le bâti, et les fortes valeurs représentent les collines rocheuses et les fonds de vallées. La carte de NDBI du centre-ville (figure 7.11) montre bien la répartition du bâti dans la ville. Les ksour se démarquent par une valeur NDBI homogène et illustrent la densité et la compacité des noyaux historiques. Les surfaces nues dans le périmètre du centre-ville ont une valeur NDBI supérieure avec une couleur jaunâtre

dans la carte. Ces sols nus représentent en général les cimetières et les pans nonurbanisés des collines rocheuses. La carte de NDBI au centre-ville montre clairement la répartition du couvert végétal caractérisé par une valeur NDBI négative. Cependant, les valeurs de NDBI ne révèlent pas une très forte distinction entre les sols nus (désert, roche, sable, etc.) et les zones bâties. Il est à noter qu'une partie des constructions de la ville de Ghardaïa sont construites avec de la pierre calcaire extraite des collines alentour. Dans la ville historique, les habitations, la mosquée, la muraille et le pavage des ruelles sont construits avec de la pierre, la chaux et le Timchemt (liant à base de pierre locale). L'ensemble des ksour ainsi qu'une partie du bâti dans les extensions sont construits avec ces matériaux locaux. A la lisière de la ville on constate une faible différence entre les valeurs du NDBI dans les pixels de la classe « Urbain » et la classe « Désert ». La classe « Désert » présente la plus forte valeur de NDBI notamment dans les collines sombres. Les fonds de vallées ont des valeurs similaires aux zones bâties au niveau du centre-ville (figure 7.11).

#### **7.5.4. Variation de la température de surface LST à Ghardaïa : spatialisation de l'îlot de chaleur de surface**

La journée de la prise de l'image est caractérisée par une situation anticyclonique estivale typique, avec un ciel clair et un vent très faible. A 10h20, l'heure du passage du capteur, la région était déjà soumise à une intense irradiation solaire depuis plus de quatre (04) heures. Le rayonnement solaire enregistré dans cette journée à 14h30 était de l'ordre de  $958 \text{ W/m}^2$  dans le site de référence PT 01. Cette valeur nous renseigne sur la quantité de chaleur absorbée par la surface.

La carte de LST montre une forte hétérogénéité thermique à travers la zone d'étude. Elle montre aussi une certaine variabilité intra-classe. De nombreuses études font état d'une grande variabilité spatiale de l'ICU de surface, et d'une variabilité intrinsèque au sein d'une même classe (Zhou et al., 2019a ; Ferrelli et al., 2018 ; Ali et al., 2017). Les températures de la carte thermique varient de  $35.09^\circ\text{C}$  à  $54.35^\circ\text{C}$ . Dans une étude sur huit villes chaudes et arides, Abulibdeh (2021) relate que le LST varient de 20 et  $50^\circ\text{C}$ . A Guelma (Algérie) Khallef et al. (2020) relatent dans leur étude que le LST varie entre  $36^\circ\text{C}$  et  $47^\circ\text{C}$  en été. En général, la répartition de la température de surface laisse deviner l'utilisation du sol dans l'agglomération de Ghardaïa.

Le calcul de la moyenne de LST par classe a révélé des données peu utiles en particulier dans les classes Végétation et Urbain car ces zones présentent une juxtaposition de pixels de classes différentes. Ainsi la moyenne de LST dans la classe Eau est de

36,93°C, dans la classe Désert 47,34 °C, dans la classe Urbain 47,23 °C et dans la classe "Végétation" le LST moyen est de 46,50 °C. À titre d'exemple, l'existence des cimetières comme points chauds (hotspots) dans la classe Urbain a élevé sa moyenne de LST. L'étude de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain par le calcul de l'écart de température de surface entre le milieu urbain et rural présente des variations multiples liées à la variabilité des caractéristiques des surfaces urbaine et rurale. La spatialisation des températures de surface permet d'appréhender la répartition des îlots de chaleur au sein de l'agglomération de Ghardaïa.

Les températures les plus élevées sont observées dans les barrages où domine une terre alluvionnaire et argileuse. Elles apparaissent en rouge sur l'image. C'est le cas du barrage de Touzouz, de Bouchene, de Ntissa ou Oued Labiedh (figure 7.13). Le sol dans ces barrages secs dépasse les 50 °C. Les températures les plus faibles sont observées dans les surfaces d'eau au niveau de la station de lagunage avec une température autour de 35°C. Elles ressortent en bleu sur l'image. Les températures moyennes sont enregistrées dans les zones bâties et la végétation. Gourfi et al. (2022) dans la ville aride de Marrakesh rapportent des observations similaires. Ces résultats corroborent aussi ceux obtenus par d'autres chercheurs tels que Gherraz et Alkama (2020), Maskooni et al. (2020), Reisi et al. (2019), Deng et al. (2018), Min et al. (2018), Wu et Zhang, (2018) et Jalan et Sharma, (2014). Sahnoune et al. (2021) dans la ville de Constantine, relatent aussi que le bâti peut atteindre une température de surface de 45°C. Nos résultats rejoignent aussi ceux de Abulibdeh (2021) où les températures de surface les plus élevées sont enregistrées au niveau des sols nus, les températures moyennes dans les zones bâties et les températures les plus faibles sont relevées dans les espaces verts. Les chercheurs insistent sur le rôle des matériaux de construction, de l'albédo et de l'absence de végétation dans l'élévation des températures de surface.

Zhou et al. (2019a) dans leur exhaustive revue indiquent que le gradient thermique de surface est supérieur en été durant le jour. L'écart de température de surface dépasse en général les 10 °C (Ferrelli et al., 2018 ; Peng et al., 2018 ; Zhou et al., 2016 ; Wang et al., 2015 ; Zhou et al., 2014 ; Peng et al., 2012 ; Imhoff et al., 2010).

La superposition de la carte des températures de surface avec celle de l'occupation du sol permet d'identifier et de cartographier les îlots de chaleur ou de fraîcheur (figure 7.18 et 9.19). Zhou et al. (2019a) indiquent que le mode d'occupation/utilisation du sol est

le facteur le plus important dans la formation et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de surface.

Les alentours de la ville de Ghardaïa affichent des températures très élevées avec une dominance de la couleur jaune sur la carte (figure 7.13). L'agglomération est plutôt fraîche avec une dominance de la couleur verte. Durant le jour, l'environnement désertique tend à se réchauffer plus vite du fait d'une exposition totale au rayonnement solaire et de l'importante inertie thermique des matériaux urbains. Les températures de surface du désert sont plus élevées que celles de la ville. Il en résulte un écart de température (ville - désert) négatif, donc la formation d'un îlot de fraîcheur urbain (IFU) diurne. L'intensité de l'IFU de surface au niveau du couvert végétal (la palmeraie) atteint les 15 °C tandis que celui au niveau des zones bâties s'élève à 10 °C. L'effet d'oasis dans les palmeraies de Ghardaïa est considérable en comparaison à d'autres études. Boudjellal et Bourbia (2017) ont étudié le LST dans la ville de Ouargla à 200 km de Ghardaïa. L'image thermique est enregistrée presque à la même heure (10h08) et la même période (July 31, 2015). L'oasis de la ville de Ouargla au nord du Sahara se situe dans un contexte climatique similaire à Ghardaïa, elle présente des températures de surface plus faibles (38 à 41 °C). Le LST dans les zones urbanisées y est supérieur à 46 °C. L'effet de la végétation ou le PCIS (Parc Cool Island de Surface) maximal est de l'ordre de 7.53 °C, mesuré dans les zones les plus denses de la palmeraie. Cette valeur est inférieure à celle trouvée dans la palmeraie de Ghardaïa (15 °C). La différence d'intensité de l'îlot de fraîcheur et de l'effet de la végétation est due au fait que « *chaque ville dispose d'une combinaison unique de facteurs climatiques, morphologiques et géographiques* » (Philipps et al., 2020). Hao et al. (2016) rapportent un effet de rafraîchissement maximal de la végétation de 3.82 °C, en été, au niveau de la surface des oasis dans le désert du Taklamakan (Chine). L'intense évapotranspiration et l'ombre des canopées sont des facteurs déterminants dans la réduction de la température de surface dans la palmeraie. La formation d'un îlot de fraîcheur urbain (IFU) diurne à Ghardaïa corroborent les observations de Buyantuyev et Wu (2010) où ils affirment que la ville de Phoenix constitue un « puits-à-chaleur » durant le jour en été par rapport au désert. Mirzaei et al. (2020) et Reisi et al. (2019) observent aussi, dans deux études différentes la formation d'IFU diurne dans la région chaude et aride d'Ispahan (Iran) en été. Tout comme Ghardaïa, Ispahan est située dans un désert rocailloux.

Les plages de températures élevées se situent en général dans la classe " Désert " autour de l'agglomération où les sols sont très chauds et très secs. Buyantuyev et Wu

(2010) relatent des observations similaires dans la ville de Phoenix par rapport au désert de Sonora. Nos résultats rejoignent aussi ceux de Nassar et al. (2016) en ce qui concerne la formation de puits-à-chaueur urbain diurne dans la ville désertique de Dubaï en été. Les chercheurs ont obtenu un LST moyen dans les secteurs urbanisés de 49°C en juillet. L'environnement désertique de Dubaï était plus chaud que la ville durant la journée. Zhou et al (2020) dans la ville de Beer-Shev'a, rapportent de manière identique un îlot de fraîcheur de surface diurne d'une intensité de 4 à 5°C, à une heure de mesure très proche de notre cas (10h:00). Les chercheurs attribuent ce résultat principalement à la faible capacité thermique du désert autour de Beer-Shev'a (désert du Néguev). L'îlot de fraîcheur de surface diurne est aussi observé dans des villes au climat similaire telles que Baghdâd (Ali et al., 2017) et Al-Ain (UAE) (Blooshi et al., 2020). A Constantine (Algérie), Sahnoune et al. (2021) ont observé un îlot de fraîcheur de surface d'une intensité maximale de 7.06°C (en juillet à 10h08).

Fan et al. (2017) ont étudié l'îlot de chaleur de surface dans cinq villes désertiques : Beer-Shev'a, Hotan, Jodhpur, Kharga et Las Vegas (différents pays du monde). Leurs résultats montrent que dans toutes ces villes on observe un îlot de fraîcheur diurne d'une intensité moyenne de 7.8 °C. L'oasis de Hotan (Chine) enregistrait le plus grand écart thermique. Dialesandro et al. (2019) relatent aussi l'absence d'îlot de chaleur urbain durant le jour dans plusieurs villes arides. Elles se comportent comme un puits-à-chaueur. Des îlots de fraîcheur diurnes sont aussi observés dans d'autres villes arides (Kumar et al., 2017 ; Lazzarini et al., 2015 ; Imhoff et al., 2010). Dans une autre étude, Gago et al. (2020) ont obtenu des résultats similaires à Séville en indiquant que la ville connaît un IFU de surface diurne. Encore une fois, les chercheurs attribuent ces résultats à l'environnement rural de Séville caractérisé par des sols nus et secs tandis que la ville est plus végétalisée. Mohammad et Goswami (2021) ont étudié l'ICU de surface dans 150 villes en Inde. Leurs résultats rejoignent ceux de notre étude en précisant que les villes chaudes et arides en Inde manifestent un îlot de fraîcheur diurne.

A Casablanca (Maroc), Hassani et al. (2021) rapportent un IFU d'une intensité de 2.5 °C. Dans des climats méditerranéens par exemple, Aslan et Koc-San (2016) rapportent que la surface des couverts végétaux était plus fraîche de 6.8 °C à Antalya (Turquie). Dans la ville d'Istanbul, Zaeemdar et Baycan (2017) ont constaté un îlot de chaleur de surface diurne d'une intensité de 11°C. Dans d'autres contextes climatiques, Feng et al. (2019) et

Nguyen et al. (2019) ont constaté un îlot de chaleur de surface diurne à Suzhou (Chine) et à Hanoi (Viêt Nam) respectivement.

Dans la classe "Désert " deux parties se distinguent dans la carte thermique. La moitié ouest de la zone d'étude est formée essentiellement de ravins rocheux abrupts. Les températures de surface de ces paysages sont plus faibles de la moitié Est de la zone d'étude où domine des terres plates de sable et d'argile. Ainsi la Chebka à l'ouest, vaste plateau fortement disséqué par un réseau d'oueds et de ravins, est de couleur plutôt verte à jaune ( $\approx 45$  °C), tandis que les sols à l'Est sont de couleur jaune à rouge ( $\approx 50$  °C). Les fonds de vallées sont en général sableux ou argileux donc ils ont un comportement thermique similaire aux sols à l'est de la zone d'étude.

L'analyse de la distribution de la température de surface dans l'agglomération de Ghardaïa permet de dévoiler la répartition des îlots de chaleur et sa relation avec le mode d'occupation du sol. La figure 7.14 permet d'afficher les nuances de températures de surface au sein de la ville. Les températures les plus basses sont enregistrées au niveau de la palmeraie de Ghardaïa et la palmeraie de Beni-Isguen. Les secteurs bâtis manifestent les températures moyennes, alors que les valeurs élevées sont relevées dans les zones ouvertes et dégagées telles que les cimetières. Les ensembles bâtis apparaissent comme des taches vertes (donc plus frais) dans un milieu désertique en jaune et rouge (plus chaud). C'est le cas des secteurs urbanisés dans la zone industrielle, la zone des sciences, etc. L'aéroport aussi, se démarque des sols nus environnants. Les pistes apparaissent plus fraîches par rapport au désert.

L'image thermique fait ressortir un net contraste entre la végétation et le bâti. Les températures de ce dernier sont de l'ordre de 45°C alors que la température de végétation est de l'ordre de 40°C. Les espaces verts sont systématiquement plus frais que leur environnement. Les températures de surface identifiées les plus élevées correspondent aux cimetières. Les quartiers présentant des espaces verts éparpillés même de petite taille enregistrent des îlots de chaleur de surface de faibles amplitudes. L'écart thermique est amoindri dans le centre-ville entre les différents quartiers.

L'agglomération de Ghardaïa présente un tissu urbain discontinu, cela induit une forte hétérogénéité thermique en raison de la diversité dans le mode d'occupation du sol. Les ksour et les quartiers urbains denses ont des températures similaires. Par exemple, le quartier de Theniet-Elmakhzen, Sidi-Abaz ou Bouhraoua ont un comportement thermique semblable à celui du ksar de Ghardaïa ou Beni-Isguen avec des températures autour de 44

et 45 °C. La carte thermique dans la figure 7.18 met aussi en évidence que les températures faibles correspondent aux espaces verts denses. Il a été démontré que l'effet de rafraîchissement de la végétation est plus important dans les couverts végétaux les plus denses (Gherraz et al., 2020). Le végétal urbain participe ainsi à l'amélioration de la qualité des ambiances thermiques urbaines. Plus le couvert végétal est dense et large, plus la température a tendance à baisser. Ainsi les palmeraies correspondent aux endroits les plus frais. A contrario, les zones dégagées et les cimetières sont systématiquement les endroits les plus chauds dans la ville. La morphologie du bâti fait que la température de surface des zones bâties est plus faible que le désert. Le bâti étant composé d'une multitude de surfaces horizontales et verticales avec des gabarits et un réseau viaire de géométrie différente, présente des surfaces ombragées, soient des toitures soient des rues et passages. Les pixels des zones bâties manifestent une température de surface plus faible que la température des pixels des sols nus totalement exposés au soleil.

L'analyse de la carte de LST montre donc une variabilité spatiale de l'îlot de chaleur. D'après la figure 7.13, l'agglomération de Ghardaïa présente un îlot de fraîcheur d'une intensité de 5 °C en moyenne. L'environnement rocheux et sableux du désert est caractérisé par un fort dégagement de chaleur. Le désert dans la zone Est (étendue de sable et d'argile) étant plus chaud que dans la zone ouest (la Chebka : plateau rocheux raviné), l'intensité de l'îlot de fraîcheur urbain varie selon la nature de la surface dans le désert environnant. A la différence de Ghardaïa, qui est entouré par un paysage rocailleux, les villes désertiques dans l'étude de Abulibdeh (2021) sont caractérisées par un environnement dominé par le sable. L'effet d'absorption de chaleur des collines rocheuses est aussi observé par Sahnoune et al. (2021) dans le rocher de la ville de Constantine (Algérie).

La carte thermique dans la figure 7.14 illustre l'existence d'un archipel de chaleur et de fraîcheur d'intensités variées. Abulibdeh (2021) a aussi constaté la formation d'un îlot de fraîcheur diurne dans huit villes chaudes et arides. Ainsi Abu Dhabi connaît l'îlot de fraîcheur très intense de 6 °C (entre la végétation et le désert). Au sein de cette agglomération, on constate un effet de rafraîchissement de la végétation de 7 °C.

En dépit de la formation d'un îlot de fraîcheur urbain par rapport au milieu rural, la valeur de température de surface de 45°C enregistrée à 10h20 (l'heure du passage du capteur) indique que l'agglomération de Ghardaïa souffre d'un stress thermique aigu.

La cartographie de l'îlot de chaleur reflète beaucoup de centres de chaleur intense avec une forte disparité en raison de l'hétérogénéité et la complexité du milieu urbain. La répartition spatiale des températures de surface reflète une grande variation de l'intensité de l'îlot de chaleur. De multiples « cool spots » et « hotspots » apparaissent dans l'agglomération formant des micro-îlots de chaleur ou de fraîcheur. Un tel constat peut s'illustrer par l'apparition d'isothermes autour des cimetières dans la figure 7.18. Les cimetières qui sont au fond de la vallée sont plus chauds que les cimetières aménagés sur des terrains rocheux. Ces points chauds constituent un archipel de chaleur au sein de la ville. L'intensité de l'îlot de chaleur dans les cimetières est de 10 °C. Les cimetières représentent de véritables « sources de chaleur ». Ils contribuent en fait à dégrader la qualité des ambiances thermiques en ville. Ces résultats corroborent ceux de Zhou et al. (2020) dans la ville de Beer-Shev'a, où ils signalent des points chauds (hotspot) correspondant à des cimetières. Il serait judicieux de relocaliser les cimetières et de les aménager en dehors de la ville ou d'entreprendre une campagne de végétalisation afin d'éviter qu'ils continuent d'agir comme des sources de chaleur.

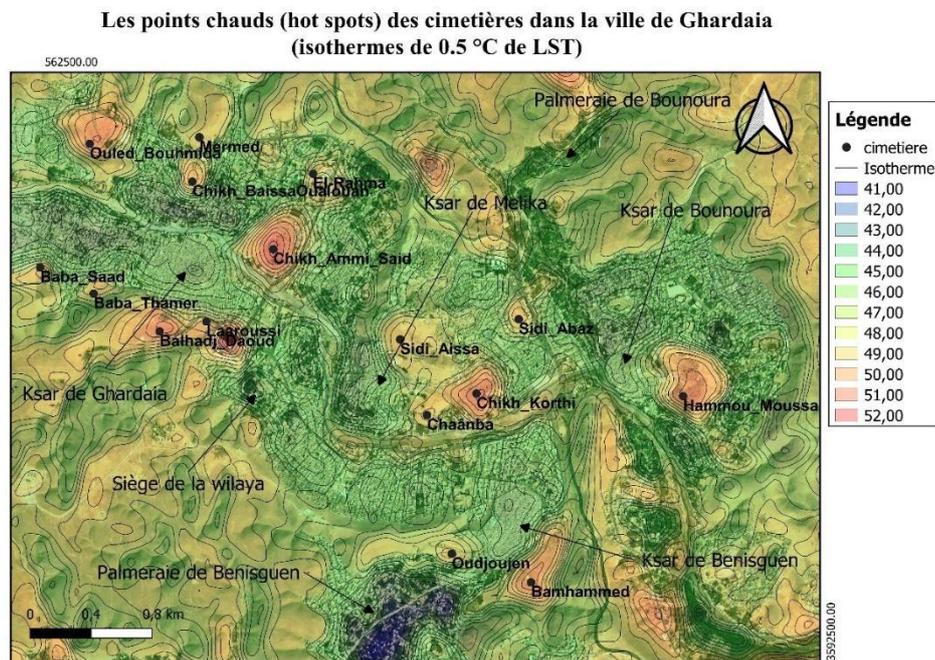


Figure 7.18 : Les points chauds (hot spots) des cimetières dans la ville de Ghardaïa. L'image LST (en transparence de 50 %) est superposée à l'image de couleurs réelles.

### 7.5.5. Relation du couvert végétal avec la température de surface

De nombreuses recherches stipulent que la végétation manifeste des températures de surface faibles et agit comme puits-à-chaleur (Farid et al., 2022 ; Khan et Javed, 2022 ;

Reis et Lopes, 2019). Les données du Pv montrent que la proportion de végétation dans l'agglomération de Ghardaïa est faible. Dans une étude sur des oasis, Liu et al. (2020) indiquent que la fraction de la végétation dans l'oasis doit être élevée afin de tirer un effet microclimatique maximal. La végétation affiche un îlot de fraîcheur maximal de 10 °C. C'est l'écart thermique entre la palmeraie de Ghardaïa et le stade Okhoua dans le centre-ville. L'oasis constitue un véritable puits-à-chaueur avec des températures de surface autour de 42 °C. Si l'on considère les températures de surface maximales enregistrées dans la zone d'étude, l'effet rafraichissant de la végétation (PCI surface) s'élève à 15 °C. Zhou et al. (2020) dans la ville chaude et aride de Beer-Shev'a constatent aussi la formation de poches fraîches (cool spot) dans les espaces verts. D'autres études ont aussi mentionné la formation de poches fraîches (cool spots) au niveau des sites boisés (Krtalić et al., 2020 ; Yuvaraj, 2020 ; Trotter et al., 2017). Le NDVI et le SAVI présentent une bonne performance dans la distinction de la végétation (Hidayati et Suharyadi, 2019). Benkouider et al. (2013) estiment que l'indice SAVI donne de bons résultats dans les régions semi-arides en comparaison au NDVI. Les résultats de cette étude indiquent que le NDVI et le SAVI informent d'une façon similaire sur la répartition de la végétation, de ce fait, l'accent sera mis sur l'analyse du NDVI. Les valeurs de NDVI pour les quatre classes sont similaires aux valeurs trouvées par Maskooni et al. (2020) dans la ville semi-aride de Shiraz.

L'analyse de la corrélation entre les indices de végétation NDVI et SAVI et la température LST montre une relation négative avec la température de surface LST. Si la corrélation est statistiquement significative, les résultats de la corrélation pour l'ensemble de la zone d'étude sont faibles en comparaison avec ceux pour l'agglomération de Ghardaïa. Ainsi le NDVI et le SAVI présentent un  $R^2$  de 0.065 et 0.007 respectivement pour toute la zone d'étude et un  $R^2$  de 0.151 et 0.107 respectivement au sein de l'agglomération. Ces valeurs de corrélation rejoignent celles de Trotter et al. (2017) où ils relatent une corrélation de  $r=-0.15$  entre le LST et le NDVI. Buyantuyev et Wu (2010) indiquent qu'il existe toujours une corrélation négative entre la température de surface et la végétation dans les villes chaudes et arides de comme Phoenix par exemple. La corrélation entre le LST et le NDVI y est de  $R^2=0.48$  en été. Ali et al. (2017) ont observé aussi une corrélation faible entre le LST et le NDVI ( $R^2= 0.079$ ) dans la ville de Baghdâd.

Abulibdeh (2021) fait état lui aussi d'une corrélation négative entre le LST et la végétation. Ainsi la corrélation entre le LST et le NDVI est de  $R^2 =0.401$  à Abu Dhabi,

0.351 à Kuwait et 0.551 à Riyadh. Gherraz et al. (2020) et Saini et Tiwari (2017) ont trouvé aussi dans leurs études une forte corrélation négative entre le LST et le NDVI. De même, Krtalić et al. (2020) à Zagreb, Croatie. Une corrélation négative entre le LST et le NDVI de -0.09 est aussi donnée par Khallef et al. (2020). A titre de comparaison avec un autre contexte climatique, le NDVI dans les villes de Florence et Naples est de 0.25 et 0.20 respectivement (Guha et al., 2018). Sa corrélation avec le LST est de -0.71 pour Florence et -0.57 pour Naples. Dans la ville aride de Jaipur en Inde, Jalan et Sharma (2014) rapportent aussi une corrélation négative entre le NDVI et le LST. Naserikia et al. (2019) rapportent dans leur étude sur la ville chaude de Mashhad (Iran), que la corrélation en été entre le LST et le NDVI varie de  $R^2 = 0,48$  à 0.18 alors que la corrélation avec le NDBI varie de  $R^2 = 0.19$  à 0.43. Zhang et al. (2016) ont trouvé aussi une corrélation négative de  $R^2 = 0.51$  et  $R^2 = 0.76$  entre le LST et le NDVI dans des oasis à Xinjiang, (Chine, BWk climate). Hassan et al. (2021) ont aussi trouvé une corrélation négative entre le LST et le NDVI dans différentes villes de différents climats. Ainsi, Hassan et al. (2021) rapportent des valeurs de  $R^2$  de -0.51, -0.35, -0.30, -0.15, -0.23, -0.67, -0.57 à Colombo, Delhi, Dhaka, Kabul, Karachi, Kathmandu, et Thimphu, respectivement. Karachi, en particulier, qui est caractérisée par un climat désertique chaud similaire à Ghardaïa, présente un  $R^2 = -0.23$ . Yang et al. (2020) dans leur recherche à Zhengzhou (Chine) montrent qu'il existe une corrélation négative entre la température de surface et le NDVI ( $R^2 = 0.425$  et  $R^2 = 0.549$ ). Concernant le bâti, les chercheurs rapportent une corrélation positive entre la température de surface et le NDBI de  $R^2 = 0.601$  et  $R^2 = 0.609$ . Yang et al. (2020) confirment que la relation de LST avec le NDBI est plus forte que sa relation avec le NDVI. D'autres chercheurs relatent de fortes corrélations négatives entre le LST et le NDVI et positives entre le LST et le NDBI (Moisa et al., 2022 ; Sahnoune et al., 2021 ; Gourfi et al., 2022 ; Gherraz et Alkama, 2020 ; Lu et al., 2020 ; Maskooni et al., 2020). Wheeler et al. (2019) indiquent que la végétation est un élément clé dans la stratégie de lutte contre l'ICU dans les régions chaudes et arides. Il est à noter aussi que la configuration spatiale de l'espace vert a un effet direct sur son effet de rafraîchissement (Yin et al., 2019 ; Kong et al., 2014a).

### **7.5.6. Relation du bâti avec la température de surface**

L'analyse de la corrélation entre l'indice du bâti NDBI et la température LST montre une relation positive avec la température de surface LST au sein de l'agglomération mais négative si l'on considère la totalité de la zone d'étude. Ce résultat semble cohérent

du fait que les matériaux de construction et les revêtements de sol en ville absorbent énormément de chaleur et sont donc plus chauds que la végétation. Les résultats de la corrélation pour l'ensemble de la zone d'étude sont faibles en comparaison avec ceux pour l'agglomération de Ghardaïa. Ainsi le NDBI présente un  $R^2$  de 0.026 pour toute la zone d'étude et un  $R^2$  de 0.305 de au sein de l'agglomération. Ces résultats montrent que la distribution de LST est corrélée avec le type d'occupation du sol au sein de l'agglomération. Il est à noter que certaines études ont aussi trouvé une corrélation positive entre les sols nus et le LST (Guha et al., 2018 ; Pal et Ziaul, 2017 ; Peng et al., 2016) alors que d'autres ont trouvé une corrélation plutôt négative (Zhou et al., 2019 ; Chen et al., 2006). Abulibdeh (2021) rapportent aussi une corrélation positive entre le LST d'un côté et les sols nus et le bâti de l'autre. Les valeurs de NDBI se situent entre 0.01 et 0.2 dans plusieurs cités arides. Dans la ville de Guelma, la corrélation positive de 0.38 entre le LST et le NDBI dévoile le rôle du bâti dans l'élévation de température en ville (Khallef et al., 2020). A Baghdâd, Ali et al. (2017) rapportent une corrélation positive entre le LST et le NDBI ( $R^2= 0.537$ ). A Tshwane en Afrique du Sud, Adeyemi et al. (2015) indiquent que le bâti et les surfaces imperméables absorbent énormément de chaleur. Ils rapportent une corrélation positive entre le LST et le NDBI d'un coefficient de  $R^2 = 0.461$  et  $R^2 = 0.081$  à des dates différentes. Li et al. (2018) insistent sur le rôle des surfaces imperméables dans l'élévation de la température de surface en ville. Sahnoune et al. (2021) mentionnent aussi que les hotspots correspondent aux endroits à grande valeur de NDBI. Naserikia et al. (2019) ont trouvé que les températures de surface élevées correspondent aux faibles valeurs de NDVI et aux grandes valeurs de NDBI.

### **7.5.7. Impact du type des tissus urbains sur la LST**

Les zones bâties présentent des anomalies de température qui diffèrent selon la morphologie et la densité du tissu. Le ksar (la ville historique) avec son tissu compact présente des températures de surface plus faibles que celles des quartiers excentrés qui sont caractérisés par des rues beaucoup plus larges. Les ksour de Ghardaïa, Ben-Isguen, Bounoura, El-Atteuf et Melika ont un comportement thermique identique alors que les quartiers de Mermed, Theniet-Elmakhzen, Sidi-Abaz, Bouhraoua, le complexe universitaire ou la cité 500 logement AADL ont des températures de surfaces plus élevées (figure 7.14 et 7.18). Cependant, le gradient de température entre le tissu compact et le tissu lâche n'est pas important du fait de l'existence d'arbres dans les cours d'habitations

privées et dans le domaine public. Yang et al. (2021) montrent aussi que les caractéristiques morphologiques du bâti ont une influence directe sur le LST.

## 7.6. Relation entre l'ICU et le l'ICUS

Il est admis que la température de surface et la température de l'air sont étroitement liées. Les surfaces réchauffées suite à l'ensoleillement intense dégagent des flux thermiques qui réchauffent l'air. L'étude de l'îlot de chaleur urbain de surface en journée vient compléter celle effectuée sur l'îlot de chaleur de l'air. Les résultats montrent que l'îlot de chaleur urbain de surface (ICUS) est lié à celui de l'air. Néanmoins, l'intensité de l'ICUS est beaucoup plus importante que celle de l'ICU de l'air. Les résultats montrent une concordance entre la variabilité spatiale de l'ICUS et la variabilité spatiale de l'ICU de l'air dans la ville de Ghardaïa. Zhou et al. (2019) indiquent que chacun de l'ICUS et l'ICU de l'air dépendent des caractéristiques des surfaces du milieu urbain et rural. Dans la ville aride de Marrakech, Gourfi et al. (2022) montrent qu'il existe une relation directe entre la température de l'air et celle de surface. Les zones les plus fraîches à Marrakech sont les sites boisés et les tissus urbains denses. Reis et Lopes (2019) montrent que la végétation manifeste des températures de surface faibles. Leurs résultats indiquent que pour diminuer la température de l'air de 1 °C il faut une surface de 50 m<sup>2</sup> de végétation. Reis et Lopes (2019) ont obtenu une forte relation entre la température de surface et la température d'air.

Les gradients thermiques dans la carte de LST de Ghardaïa sont plus importants par rapport aux mesures du parcours urbain à cause en partie à la complexité du bâti et des types de surfaces en ville. Si l'intensité de l'ICU de l'air est de l'ordre de 2.9 °C, celle de l'ICUS avoisine les 10 °C. L'effet rafraîchissant de la végétation (PCI de l'air) est de 5.6°C tandis-que celui de la surface du couvert végétal (Surface PCI ou PCIs) est de 15 °C.

L'étude du confort thermique a montré aussi que les sites les plus inconfortables correspondent aux îlots de chaleur à Ghardaïa. Rusdayanti et al. (2021) et Tursilowati (2007) démontrent que les niveaux du confort thermique THI sont tributaires des caractéristiques des surfaces de la ville. L'étude de Humaida et al. (2016) illustre bien que les valeurs élevées de NDVI (indice de végétation) soient enregistrées dans les secteurs à hauts niveaux de THI. En d'autres termes, les sites densément végétalisés offrent plus de confort thermique. En fait, la température de surface influence directement celle de l'air qui la recouvre. En raison de la capacité thermique, les surfaces urbaines manifestent une grande fluctuation de température par rapport à l'air (Charfi et Dahech, 2018)

## 7.7. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, l'étude de l'ICU de surface dans la ville de Ghardaïa a été développée. En somme, la ville de Ghardaïa présente un îlot de fraîcheur urbain diurne par rapport au désert. L'intensité maximale de l'IFU est de 15 °C dans la palmeraie, et de 10 °C dans les zones bâties. La formation d'un puits à chaleur en journée est due à plusieurs facteurs : la grande capacité thermique des matériaux de construction qui permet un fort stockage d'énergie, et l'ombrage des surfaces en raison de la morphologie du bâti et de la végétation. L'effet de rafraîchissement de la végétation (Surface Park Cool Island) s'élève à 15 °C ce qui est très important dans le contexte chaud et aride de Ghardaïa. Des poches de fraîcheur se distinguent nettement au niveau des espaces verts au sein de l'agglomération. Le potentiel de mitigation des espaces verts apparaît clairement dans les larges couverts végétaux tels que l'oasis de Ghardaïa et l'oasis de Ben-Isguen. Les résultats illustrent que la répartition de la température de surface est corrélée avec les types d'occupation du sol dans l'agglomération de Ghardaïa. Dans les quartiers contemporains où le tissu urbain est plus aéré et lâche, les températures de surface sont plus élevées. Les points chauds tels que les cimetières produisent une chaleur accablante pour les habitants ; ils dégradent fortement la qualité des ambiances thermiques urbaines. Les températures de surface élevées enregistrées à 10h20 indiquent qu'elles seraient encore plus intenses dans l'après-midi. L'étude montre l'existence d'une corrélation négative entre le LST et la végétation et une corrélation positive entre le LST et le bâti et les sols nus. Le rôle de la végétation et de la géométrie urbaine sont ainsi mis en évidence dans l'atténuation de l'îlot de chaleur au sein de l'agglomération de Ghardaïa.

## Conclusion de la partie 2

La deuxième partie a présenté les méthodes de mesure et d'acquisition des données, le processus de traitement, de calcul et d'extraction des valeurs ainsi que de l'analyse et la discussion des résultats. L'étude de la variation et de l'intensité de l'îlot de chaleur de l'air (atmosphérique) a été réalisée à partir de l'analyse des données de la campagne de mesure in situ. La période de mesure a été représentative des conditions climatiques estivales à Ghardaïa. De nombreux îlots de chaleur ont été constatés le long du parcours urbain, ce qui conduit à les qualifier plutôt d'« archipel » de chaleur. L'évaluation du niveau du confort thermique extérieur à travers l'indice THI a complété la caractérisation de l'îlot de chaleur atmosphérique. Les ambiances urbaines ne sont pas confortables même pendant la nuit, et le microclimat urbain n'a pas de temps pour se refroidir. L'intensité de l'effet de rafraîchissement de la végétation « Parc Cool Island » (PCI) a révélé l'impact de la végétation urbaine sur l'îlot de chaleur en été dans les zones chaudes et arides. L'ombre de la canopée de la végétation réduit significativement la température durant le jour, mais elle entrave le refroidissement nocturne. En raison du manque d'irrigation, l'évapotranspiration ne participe réellement pas au rafraîchissement de l'air. Le traitement des images satellitaires dans le dernier chapitre a permis la réalisation de la carte d'occupation du sol selon le type de classification choisi. L'étude de caractérisation de l'îlot de chaleur de surface ainsi que l'effet des espaces verts urbains sur la température de surface est réalisée à travers la superposition de la carte de l'occupation du sol à Ghardaïa avec la carte thermique. L'étude de l'ICU de surface dans la ville de Ghardaïa présente un îlot de fraîcheur urbain diurne par rapport au désert. L'effet de rafraîchissement de la végétation est très important dans le contexte chaud et aride de Ghardaïa. Les espaces verts au sein de l'agglomération se distinguent nettement comme poches de fraîcheur. Le potentiel de mitigation des espaces verts apparaît clairement dans les larges couverts végétaux tels que l'oasis de Ghardaïa et l'oasis de Ben-Isguen.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

La présente recherche a traité la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et la quantification de l'impact du végétal urbain sur la qualité des ambiances thermiques extérieures dans la ville de Ghardaïa. L'îlot de chaleur urbain ICU se développe à travers l'interaction de multiples facteurs d'ordre naturels (climat, géographie) et humains (morphologie urbaine, réduction de l'évapotranspiration par l'imperméabilisation et la diminution du végétal ; pollution et l'émission de chaleur anthropique). L'îlot de chaleur urbain est exacerbé par le réchauffement climatique global. Les citoyens sont de plus en plus vulnérables aux vagues de chaleur qui s'intensifient et qui ont des conséquences sur la santé. Le bien-être des habitants pendant la saison chaude continue de décliner. La canicule de 2003 en est un exemple où il a été enregistré plus de 70 000 décès à travers l'Europe. De nombreux pays situés dans les zones à climat chaud et aride sont des pays en voie de développement. En raison de leur faiblesse institutionnelle et du manque de ressources financières, ces pays ne sont pas en mesure de protéger leurs populations contre les épisodes de chaleur extrêmes. La qualité de vie dans les villes est fortement liée aux conditions thermiques extérieures. L'usage et la fréquentation des espaces extérieurs urbains dépendent du niveau de confort thermique. L'urbanisme vernaculaire ancestral dans les régions désertiques est un modèle de durabilité et d'adaptabilité climatique. Les oasis jouent un rôle climatique primordial pour les habitants des ksour. L'urbanisation contemporaine a provoqué la diminution du couvert végétal dans les palmeraies, ce qui a provoqué une détérioration de l'ambiance thermique extérieure. Actuellement, on assiste à un intérêt croissant chez les professionnels de l'aménagement urbain pour la prise en compte de la qualité des ambiances thermiques extérieures et l'intégration de la dimension climatique dans les opérations d'aménagement urbain, en plus de la dimension esthétique qui prévalait.

La ville de Ghardaïa constituait notre cas d'étude. Ainsi, le sujet abordé dans cette thèse était de mettre en évidence l'effet de l'îlot de chaleur urbain dans la détérioration de la qualité du microclimat dans la ville de Ghardaïa ainsi que l'impact des espaces verts dans l'amélioration des ambiances thermiques extérieures.

L'effet combiné de l'ICU et du réchauffement global mondial est responsable de la dégradation de la qualité des ambiances thermiques extérieures. Partant de cette situation, la présente recherche traite de la surchauffe urbaine estivale et l'impact de la végétation sur les ambiances thermiques urbaines dans la ville chaude et aride de Ghardaïa. La problématique de l'îlot de chaleur urbain dans les zones chaudes et arides s'inscrit dans le

sujet général de l'adaptabilité des villes au réchauffement climatique global. Ce travail interroge donc l'impact de l'environnement physique (le bâti et la végétation) sur la qualité du microclimat urbain, et notamment le confort thermique des usagers des espaces extérieurs à Ghardaïa. Parmi les buts de l'urbanisme durable et bioclimatique, la conception d'espaces urbains pratiques et fonctionnels et la création d'ambiances thermiques confortables. Il est nécessaire alors de caractériser cette surchauffe urbaine à Ghardaïa et d'en quantifier l'impact de la végétation sur l'air ambiant. Ceci, dans une vision d'intégration des préoccupations climatiques dans les opérations d'aménagement urbain.

La recherche avait ainsi plusieurs objectifs : la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique et de l'îlot de chaleur surface dans la ville de Ghardaïa ; l'évaluation du confort thermique dans les espaces extérieurs ; l'étude de l'effet rafraichissant des espaces verts et l'impact de cette végétation sur l'îlot de chaleur urbain.

Le travail a été divisé en deux parties : une partie théorique et une partie pratique. La première porte sur l'état de l'art sur les différents concepts et la deuxième partie s'attache plus précisément aux données collectées et aux méthodes employées et à l'analyse des résultats. Notre étude s'appuie sur des mesures sur terrain et sur l'exploitation de l'imagerie spatiale infrarouge. Afin de répondre aux objectifs de l'étude et de vérifier les hypothèses énoncées, la démarche d'investigation s'est déclinée en trois volets :

-(a) Une campagne de mesure *in-situ* a été réalisée par une traversée automobile. Les paramètres micrométéorologiques mesurés sont : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Cette campagne a permis l'étude de caractérisation de l'îlot de chaleur urbain à Ghardaïa, l'évaluation de l'impact de la végétation et (b) la qualification du confort thermique dans les espaces extérieurs par l'indice du confort « Temperature-Humidity Index » (THI). En outre, (c) la campagne de mesure *in-situ* a été couplée à des acquisitions de télédétection spatiale. Les images thermiques satellitaires ont permis l'étude de la répartition de la température de surface (LST, capteur Landsat-8). L'étude de la répartition du couvert végétal et la cartographie de l'occupation du sol à Ghardaïa ont été réalisées à partir des images satellitaires multispectrales (capteur Sentinel-A2).

## **Synthèse des résultats**

Les travaux réalisés dans cette thèse ont permis d'appréhender le phénomène de l'îlot de chaleur urbain et l'impact de la végétation urbaine sur les ambiances thermiques

extérieures. Les résultats ont permis de mettre en évidence les variations intra-urbaines de la température d'air et de surface dans la ville de Ghardaïa. Une synthèse des principaux résultats peut être présentée :

La période choisie pour la campagne de mesures de terrain (paramètres microclimatologiques) était représentative du climat de Ghardaïa en été. L'étude de la variation microclimatique intra-urbaine révèle que l'amplitude thermique quotidienne s'élève à 15°C. La variation maximale de la température d'air entre les sites s'élève à 6 °C. Les sites de mesure manifestent soit un îlot de chaleur ou un îlot de fraîcheur. De nombreux îlots de chaleur ont été identifiés à travers le parcours urbain. La ville présente plutôt un « archipel d'îlots de chaleur ». Cependant comme dans d'autres villes de milieux arides, Ghardaïa présente « îlot de fraîcheur urbain diurne » en comparaison avec le désert environnant.

Parmi les éléments importants dans la genèse et la répartition de cet archipel figure le rôle de la végétation, du vent, des caractéristiques de configuration du bâti (organisation, orientation, matériaux, etc.).

Les espaces urbains sont caractérisés par des hétérogénéités physiques en raison des différences dans les caractéristiques des bâtiments, des revêtements de sol, des végétaux, etc. L'écart de température de l'air se ressent dans les espaces verts. La végétation apporte un effet rafraîchissant maximal de 5.61°C. Les résultats montrent que l'effet de végétation est attribué principalement à l'ombre de la canopée. Ceci peut s'expliquer par la protection contre le rayonnement solaire direct par la couronne foliaire des arbres. Les résultats prouvent que plus le feuillage de l'arbre est dense, plus la réduction du rayonnement solaire est importante.

Le désert autour de la ville enregistre des vitesses de vent plus importantes au cours de la nuit. Les faibles vitesses du vent dans les sites urbains ne favorisent pas l'évacuation rapide de la chaleur du fait de l'importante rugosité aérodynamique. Les émissions de chaleur produites par les climatiseurs et le trafic automobile, contribuent au réchauffement intense durant la nuit. Le milieu désertique autour de la ville manifeste un refroidissement plus rapide par rapport aux espaces urbains. Ces résultats confirment en grande partie l'hypothèse qui stipule que la ville chaude et aride de Ghardaïa manifeste un îlot de fraîcheur urbain diurne. Durant la nuit, les sites caractérisés par une grande ouverture au ciel affichent un rythme de refroidissement rapide. La couleur sombre des voies goudronnées participe à l'élévation des températures d'air.

La canopée de la végétation contribue à baisser la température d'air le jour, mais elle entrave fortement le refroidissement nocturne. Le feuillage et la ramification des arbres piègent la chaleur du jour au sein de la couronne foliaire et contribuent, par conséquent, au réchauffement de l'air sous la canopée. À l'aube, l'effet rafraîchissant de la végétation maximal enregistré est de 2.08°C. L'évapotranspiration -étant faible- n'a pas d'effet notable sur le rafraîchissement. Les espaces verts n'enregistrent pas de différences significatives d'humidité relative au milieu du jour à cause du phénomène de « la résistance stomatique », et du caractère xérophytique des arbres.

Les indices de confort thermiques permettent de qualifier les ambiances urbaines dans les différents sites de la ville. L'étude des conditions de confort thermique extérieur (THI) a révélé que durant le jour, les valeurs de THI vont de la catégorie « Très chaud » à « Torride ». La nuit, tous les sites sont dans la catégorie « Chaud ». Les résultats indiquent que les ambiances thermiques urbaines à Ghardaïa ne sont pas confortables même la nuit. Les flux d'air chaud n'ont pas de temps pour se refroidir. L'indice THI révèle que les habitants de Ghardaïa subissent un stress thermique extrême. Les températures nocturnes sont supérieures à 30 °C. Ces températures ne laissent plus de temps aux citoyens de récupérer après l'épuisement dû à la chaleur intense durant le jour. Les sites ayant un SVF plus important présentent un indice de confort légèrement plus faible. Les espaces verts présentent une légère amélioration du confort thermique le jour (5,25 %). L'effet d'ombrage des bâtiments et des arbres valide l'hypothèse du rôle de la végétation. Les résultats montrent que la variation de THI suit la variation de l'ICU. En fait, le degré du stress thermique dans les espaces extérieurs à Ghardaïa est lié aux caractéristiques physiques de l'environnement urbain (morphologie du bâti, présence de la végétation, etc.).

L'étude de la température de surface (LST) obtenue par télédétection a permis la spatialisation de l'îlot de chaleur urbain de surface à Ghardaïa. La ville manifeste un îlot de fraîcheur diurne d'une intensité maximale de 10 °C. L'effet de rafraîchissement de la végétation (Surface Park Cool Island) s'élève à 15 °C, enregistrée dans la palmeraie du ksar de Ghardaïa. Cette valeur est très importante dans le contexte chaud et aride de Ghardaïa. Ces résultats corroborent les résultats des études réalisées dans plusieurs villes désertiques et confirment le rôle de l'ombre des bâtiments et du végétal qui réduit considérablement les températures de surface (LST) et entraîne la création d'un îlot de fraîcheur urbain. La carte thermique a montré que le type des tissus urbains ainsi que la

nature des matériaux et des revêtements influencent directement la LST. Les tissus compacts et les surfaces claires présentent des températures de surface plus faibles. Les résultats ont également dévoilé que la répartition de LST est corrélée avec l'occupation du sol dans l'agglomération de Ghardaïa.

Des poches de fraîcheur « cool-spot » se distinguent nettement au niveau des espaces verts au sein de l'agglomération. L'impact des espaces verts apparaît clairement dans les couverts végétaux de grande taille tels que l'oasis de Ghardaïa et l'oasis de Ben-Isguen. En effet, l'étude dans son ensemble, a permis de montrer l'intérêt de l'intégration de la végétation dans l'aménagement des espaces extérieurs. Les points chauds « hot spot » tels que les cimetières manifestent une grande surchauffe. Ils contribuent à la dégradation de la qualité des ambiances thermiques urbaines. L'étude a montré l'existence d'une corrélation négative entre la LST et la végétation (NDVI et SAVI) et une corrélation positive entre la LST, et le bâti et les sols nus (NDBI).

La télédétection spatiale infrarouge apparaît donc comme un outil incontournable dans l'étude de la surchauffe urbaine et de l'impact microclimatique de la végétation. La spatialisation de la température de surface a permis de localiser les points chauds et les pôles de fraîcheur. La cartographie qui en résulte permet une spatialisation de la vulnérabilité des populations à risque en vue de la mise en place de mesures de prévention contre les vagues de chaleurs. Le rôle du végétal et de la géométrie urbaine dans l'atténuation de l'îlot de chaleur est ainsi mis en évidence au sein de l'agglomération de Ghardaïa. L'étude de l'îlot de chaleur urbain de surface en journée complète l'étude l'îlot de chaleur de l'air obtenue par mesure de terrain. Les résultats ont montré que l'îlot de chaleur urbain de surface à Ghardaïa est lié à celui de l'air. Les types de surface urbaine et les infrastructures influencent directement l'air ambiant. Cependant, le gradient thermique dans la température de surface est beaucoup plus important que celui dans la température de l'air. Toutes ces conclusions contribuent à la construction de connaissances microclimatiques permettant la création d'ambiances thermiques confortables.

### **Limites de la recherche**

La présente recherche présente toutefois certaines limites qui peuvent être présentées comme suit :

-Les données issues de la campagne de mesure n'ont pas pu être comparées aux mesures d'une station météorologique fixe proche. La station météorologique de l'office national de météorologie ONM étant située à 15 km de la ville de Ghardaïa.

-L'évaluation de la sensation thermique dans les ambiances urbaines au travers des questionnaires n'a pas été possible en raison du contexte sécuritaire de la ville durant la période 2014-2015.

-Les images thermiques disponibles pour l'étude de l'îlot de chaleur de surface sont des images prises le jour. Ceci n'a pas permis la spatialisation de LST pendant la nuit.

## **Recommandations**

Ce travail de thèse propose certaines recommandations :

-Planifier et appliquer des mesures de verdissement au sein et autour de l'agglomération de Ghardaïa afin de lutter contre l'effet de l'îlot de chaleur urbain et créer des ambiances thermiques extérieures confortables. Ceci peut être atteint par la végétalisation de la trame viaire et la multiplication des espaces verts urbains. La densification de la végétation notamment dans les espaces interstitiels de la vallée permettrait de créer une « ville-oasis ».

-Préférer les espèces d'arbres à canopée large et haute afin d'ombrager les voies de circulation (chaussée et trottoirs). La création de voûte végétale aérée au-dessus de la rue, permet d'améliorer le confort thermique notamment la nuit.

-Opter pour des essences d'arbres « xérophytiques » pour une meilleure efficacité d'eau d'irrigation telles que le palmier dattier, l'eucalyptus, le tamaris et le casuarina.

-Se protéger du rayonnement solaire en adaptant la forme du cadre bâti afin d'offrir de l'ombre aux piétons dans les espaces extérieurs. La réalisation des galeries couvertes et les plantations d'arbres sont parmi les moyens les plus recommandés.

-Diminuer le stockage de l'énergie solaire en milieu urbain par le choix de matériaux de construction et de revêtement à albédo élevé et à faible capacité thermique. Le recours aux toitures vertes et aux façades végétalisées atténuerait les températures de surface en milieu urbain et améliorerait les conditions thermiques extérieures et intérieures. Favoriser l'autoprotection des bâtiments contre le soleil afin de maximiser les surfaces ombragées.

-Relocaliser les cimetières et les aménager en dehors de la ville ou d'y entreprendre une campagne de végétalisation afin d'éviter qu'ils continuent d'agir comme des sources de chaleur.

-Procéder à la sensibilisation des politiques, des décideurs et du simple citoyen sur l'enjeu de la surchauffe urbaine et les moyens de lutte, en particulier la plantation d'arbres.

-Préférer les tissus compacts dans les futurs projets urbains.

-Promouvoir la mobilité douce et verte (transports en communs et circulation verte en vélo) pour diminuer l'impact du trafic.

## **Perspectives et recherches futures**

Notre thèse ouvre plusieurs pistes pour des recherches futures. Parmi les axes de recherche qui méritent d'être explorés :

-Il serait intéressant de procéder à une densification des points de mesure sur plusieurs transects à travers une campagne bien planifiée. La multiplication des mesures mobiles et fixes pourrait mailler toute la ville par de longues séries de monitoring.

-La perception et la sensation thermique sont des composantes importantes des ambiances urbaines. L'évaluation subjective du confort thermique et la détermination de la température ressentie est primordiale pour la création d'un environnement extérieur confortable pour les usagers. Des questionnaires pourraient permettre de caractériser le confort thermique.

-Il pourrait être intéressant aussi de procéder au calcul de la température moyenne radiante  $T_{mrt}$  dans les espaces extérieurs. Cette grandeur affine l'évaluation du confort thermique extérieur. Si elle est difficilement mesurable en milieu urbain, elle pourrait être estimée via des outils numériques tels qu'ENVI-met.

-Bien que la résolution de l'image thermique du capteur Landsat-8 soit adéquate pour les études urbaines, une résolution plus fine serait encore plus intéressante et plus précise. Une très haute résolution permettrait de mieux cartographier la végétation urbaine.

-L'identification des essences d'arbres propices au climat chaud et aride permettrait de bien rationaliser les projets de plantation dans les espaces verts urbains. L'évaluation de l'effet de rafraîchissement des différentes espèces rendrait la végétalisation plus efficace contre l'îlot de chaleur urbain.

-Il serait judicieux de procéder à une monétisation du stress thermique en vue d'estimer le coût de l'inconfort dans les espaces extérieurs. Les répercussions sur le secteur

économique touristique, sur la vie sociale, sur la consommation d'énergie de climatisation  
sont d'une grande importance.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abaas Z. R. (2020): Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal* (2020) 59, 275–290
- Abdel-Aziz D. M., Al-Shboul A. and Al-Ku N. Y. (2015): Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption - The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate. *American Journal of Environmental Engineering* 2015, 5(5): 131-140. DOI: 10.5923/j.ajee.20150505.01
- Abdel-Ghany A.M., Al-Helal I.M., Shady M.R. (2013): Human Thermal Comfort and Heat Stress in an Outdoor Urban Arid Environment: A Case Study. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology* Volume 2013, Article ID 693541.
- AboElata A. A. A. (2017): Study the Vegetation as Urban Strategy to Mitigate Urban Heat Island in Mega City Cairo. *Procedia Environmental Sciences* 37 :386 – 395
- Abulibdeh A. (2021): Analysis of urban heat island characteristics and mitigation strategies for eight arid and semi-arid gulf region cities. *Environmental Earth Sciences*, 80:259. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09540->
- Achoura A. (2013) : Contribution à la connaissance des effets des paramètres écologiques oasiens sur les fluctuations des effectifs chez les populations de la cochenille blanche du palmier dattier *Parlatoria blanchardi* Targ.1868, (Homoptera, Diaspididae) dans la région de Biskra. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. Université Mohamed Kheider – Biskra.
- Ackerman S. (2007): Urban Heat Island, University of Wisconsin, Space Science and Engineering Center [visité en mai 2008]. Disponible sur Internet : [http://icecap.us/images/uploads/URBAN\\_HEAT\\_ISLAND.pdf](http://icecap.us/images/uploads/URBAN_HEAT_ISLAND.pdf)
- Adad M. C. et Mazouz M. T. (2013) : Les anciens et nouveaux ksour: étude comparative, cas du m'zab. *Courrier du Savoir* – N°16, Octobre 2013, pp.77-87
- Addas A. and Alserayhi G. (2020) : Quantitative Evaluation of Public Open Space per Inhabitant in the Kingdom of Saudi Arabia: A Case Study of the City of Jeddah. *SAGE Open* 2020, 10, 1–18.
- Adderley C., Christen A., and Voogt J. A. (2015): The effect of radiometer placement and view on inferred directional and hemispheric radiometric temperatures of an urban canopy. *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2699–2714, 2015.
- Adeyemi A., Botai J., Ramoelo A., Merwe F. and Tsela P. (2015): Effect of impervious surface area and vegetation changes on mean surface temperature over Tshwane metropolis, Gauteng Province, South Africa. *South African Journal of Geomatics*, Vol. 4, No. 4, 351- 368.
- Aflaki A., Mirnezhad M., Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Omrany H., Wang, Z.-H. and Akbari H. (2017): Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131-145.

Aghamolaei R, Azizi MM, Aminzadeh B, O'Donnell J. (2022): A comprehensive review of outdoor thermal comfort in urban areas: Effective parameters and approaches. *Energy & Environment*. 1–24. doi:[10.1177/0958305X221116176](https://doi.org/10.1177/0958305X221116176)

Ahriz A. (2018) : Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra  
أحريز عاطف, المجال الأخضر كعنصر مناخي للتصميم العمراني بواحات الصحاري الحارة-  
المحاكاة الرقمية كنظرة جديدة لظاهرة قديمة –جامعة محمد خيضر بسكرة

Aina Y. A., Adam E. M., Ahmed F. (2017): Spatiotemporal variations in the impacts of urban land use types on urban heat island effects: the case of Riyadh, Saudi Arabia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W2, 2017. 37th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 8–12 May 2017, Tshwane, South Africa

Aka K. S. R., Dibi H. N., Koffi J. N. et Bohoussou C. N. (2022) : Étude comparative de Sentinel-2 et Landsat-8 Oli à l'évaluation de l'occupation du sol du site Ramsar d'Azagny, Sud de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE* 20(5) 48 – 63.

Akagawa H., Sugimoto H., Terai M., Makino M. and Okazaki Y. (2014): Operation and Management of a Large Rooftop Garden on a Commercial Building in an Urban Area and Multicomponent Evaluation of Environmental Performance of the Garden. *World SB14 Barcelona*. October 28/30 2014. [wsb14barcelona.org/programme/pdf\\_poster/P-129.pdf](http://wsb14barcelona.org/programme/pdf_poster/P-129.pdf)

Akbari H., Davis S., Dorsano S., Huang J. and Winnett S. (1992): *Cooling Our Communities: A Guide-book on Tree Planting and Light-Colored Surfacing*, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division.

Akbari H., Bretz S., Kurn and D. M. and Hanford J., (1997): Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs, *Energy Build.*, 25 (2) 117–126.

Akbari H., Pomerantz M. and Taha H. (2001): Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70 (3), 295-310.

Akbari H., Shea Rose L. and Taha, H. (2003): Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape and Urban Planning*, 63, 1-14.

Akbari H., Menon S. and Rosenfeld A. (2008): Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO<sub>2</sub>. Report LBNL-47075. Berkley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Akbari H., Cartalis C., Kolokotsa D., Muscio A., Pisello A. L., Rossi F., Santamouris M., Synnefa A., Wong N. H. and Zinzi, M. (2016): Local climate change and urban heat island mitigation techniques—the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(1), 1-16.

Al-Abadla Z., Schlink U., Abdel Wahab M.M. and Robaa S.M. (2020) : Urban Heat Island and Thermal Human Comfort in Tulkarm, West Bank, Palestine. *J. Mater. Environ. Sci.*, Volume 11, Issue 8, Page 1361-1373

Al-Bouwarthan M., Quinn M. M., Kriebel D. and Wegman D. H. (2019). Assessment of heat stress exposure among construction workers in the hot desert climate of Saudi Arabia. *Annals Work Exposures and Health.*, 63(5), 505–520. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxz033>

Alcaras E., Amoroso P.P., Figliomeni F.G., Parente C. and Vallario A. (2022a): Machine Learning Approaches for Coastline Extraction from Sentinel-2 Images: K-Means and K-Nearest Neighbour Algorithms in Comparison. In: Borgogno-Mondino, E., Zamperlin, P. (eds) *Geomatics for Green and Digital Transition. ASITA 2022. Communications in Computer and Information Science*, vol 1651. Springer, Cham.

Alcaras E., Amoroso P. P., Figliomeni F. G., Parente C., Prezioso G. (2022b): Accuracy evaluation of coastline extraction methods in remote sensing: a smart procedure for Sentinel-2 images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-4/W3-2022. The 7th International Conference on Smart City Applications, 19–21 October 2022, Castelo Branco, Portugal*

Alcoforado M.-J., and Matzarakis A. (2010): Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographicalia* 57, pp. 5–39

Alexandri E. and Jones Ph. (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green-roofs in diverse climates. *BuildEnviron* 2008; 43: 480–93.

Algretawee H., Rayburg S. et Neave M. (2019): Estimating the effect of park proximity to the central of Melbourne city on Urban Heat Island (UHI) relative to Land Surface Temperature (LST). *Ecological Engineering*, 138, 374–390. doi: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.034

Ali A. R. and Mohammed E.S. (2016): Impact of Industrial Activities on Land Surface Temperature Using Remote Sensing and GIS Techniques - A Case Study in Jubail, Saudi Arabia. *J Geogr Nat Disast* S6: 002 doi: 10.4172/2167-0587.S6-002.

Ali J. M., Marsh S. H. et Smith M. J. (2017): A comparison between London and Baghdad surface urban heat islands and possible engineering mitigation solutions. *Sustainable Cities and Society* 29: 159–168.

Aljawabra F. and Nikolopoulou M. (2010): Influence of hot arid climate on the use of outdoor urban spaces and thermal comfort, *Intelligent Buildings International*, 6(7): 1-20.

Alkhatib L. M. S. et Qrunfleh M. M. (2018): Plants as an Element in Microclimate Modification in Jordan Landscape Courtyard Gardens. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, Volume 14, No.1 2018.

Alvarez S., Blanco A. and Sanchez F.J. (2000): Case study X: Ensanche de Vallecas. Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing. *ALTENER – DG XVII* (cité par Vinet, 2000).

Amieur R. (2010) : Effets de la végétation sur les microclimats urbains dans les régions chaudes et arides. Cas d'étude : la vallée du M'Zab Ghardaïa. Mémoire de magister. Université amar telidji, laghouat.

- Amorim R. P. and Leder S. M. (2012) : Analysis of the influence of a green area on its urbanized surroundings in a hot humid climate: a case study in João Pessoa/PB. *Cadernos Proarq* n°. 18.
- Amorim M. C. C.T. and Dubreuil V. (2017): Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate* 2017, 5, 91; doi:10.3390/cli5040091
- Andrade H. et Vieira R. (2007): A climatic study of an urban green space: the Gulbenkian park in Lisbon (Portugal). *Finisterra*, xlii, 84, pp. 27-46
- Anquetil V. (2010) : Typologie et fonctions écosystémiques de la végétation urbaine contributions méthodologiques. Mémoire de fin d'études, Institut National d'Horticulture et du paysage, Angers. France.
- Anquez P. et Herlem A. (2011) : Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions, chaire de responsabilité sociale et de développement durable.  
[https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ARROND\\_RPP\\_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PDF-ÎLOTS.PDF](https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ARROND_RPP_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PDF-ÎLOTS.PDF) consulté le 27/08/2022
- Ao Y., Li J., Li Z., Lyu S., Jiang C. and Wang M. (2017): Relation between the Atmospheric Boundary Layer and Impact Factors under Severe Surface Thermal Conditions, *Advances in Meteorology*, vol. 2017, Article ID 8352461, 12 pages, 2017. doi.org/10.1155/2017/8352461
- APRUE (2019) : L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie ; Consommation énergétique finale de l'Algérie chiffres clés année 2017. Ministère de l'Énergie, Algérie. Édition 2019. <https://mteer.gov.dz/Documents/aprueconsommation.pdf> consulté le 01/09/2022.
- APUR (2012) : Les îlots de chaleurs urbains à Paris, Cahier numéro 1. <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/îlots-chaleur-urbains-paris-cahier-1>
- Aram F., Garcia E.H., Solgi E. and Mansournia S. (2019): Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5(4): e01339.
- Arthus-Bertrand Y. (2014) : Ville de Ghardaïa dans la vallée du M'Zab, Algérie [Online]. Available:[http://www.yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com\\_datagallery&Itemid=27&func=detail&catid=15&id=422&p=9&l=1680](http://www.yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com_datagallery&Itemid=27&func=detail&catid=15&id=422&p=9&l=1680), Page consulté le 24 Novembre 2014.
- ASHRAE (2010): Thermal environment conditions for human occupancy. *ANSI/ASHRAE Standards*, pp. 55–2010.
- Aslan N. and Koc-San D. (2016): Analysis of relationship between urban heat island effect and land use/cover type using landsat 7 etm+ and landsat 8 oli images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B8, 2016XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, CzechRepublic.

ASTERES (2016) : Les espaces verts urbains. Lieux de santé publique, vecteurs d'activité économique. (Direction : Nicolas BOUZOU). Rapport pour le compte de l'union nationale des entreprises du paysage. <https://asteres.fr>

Attia S. and Hensen J.L.M. (2014): Investigating the Impact of Different Thermal Comfort Models for Zero Energy Buildings in Hot Climates. In *Proceedings 1st International Conference on Energy and Indoor Environment for Hot Climates*, ASHRAE, February 24-26, Doha, Qatar.

AUDAB (2021) : L'îlot de chaleur urbain : Observer le phénomène pour mieux intervenir. La surchauffe urbaine à Besançon. <https://www.audab.org/files/missions/icu-observation-publication-8p.pdf>

Auliciems A. and Steven Szokolay V. (2007): Thermal comfort. Design tools and techniques. *Passive and Low Energy Architecture International*, note 3.

Avdan U. and Jovanovska J. (2016): Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016, Article ID: 1480307.

Bacci L., Morabito M., Raschi A. and Ugolini F. (2003): Thermohygrometric conditions of some urban parks of Florence (Italy) and their effect on human wellbeing. *Proceedings of "Fifth International Conference on Urban Climate"*, 1-5 September Lodz, Poland.

Baig M. H. A., Zhang L., Shuai T. and Tong Q. (2014): Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance, *Remote Sensing Letters*, 5:5, 423-431, DOI: 10.1080/2150704X.2014.915434

Baker L. A., A. J. Brazel, N. Selover, C. Martin, N. McIntyre, F. R. Steiner, A. Nelson and Musacchio L. (2002): Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation. *Urban Ecosystems* 6, 183-203.

Bandyopadhyay S. and Saha S. (2013): *Unsupervised Classification Similarity Measures, Classical and Metaheuristic Approaches, and Applications*. Edition Springer Berlin, Heidelberg. 262 pages.

Barradas V. L. (1991): Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City. *International Journal of Biometeorology*, 35, 24-28.

Barsi J.A.; Schott J.R.; Hook S.J.; Raqueno N.G.; Markham B.L. and Radocinski R.G. (2014): Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sens.* 6, 11607–11626.

Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S. and Stansfeld S. (2014): Auditory and Non-Auditory Effects of Noise and Health. *The Lancet*, 383, 1325-1332.

Battista G., Evangelisti L., Guattari C., Vollaro E. L., Vollaro R. L. and Asdrubali F. (2020): Urban Heat Island Mitigation Strategies: *Experimental and Numerical Analysis of a University Campus in Rome (Italy)*. *Sustainability*, 12, 7971; doi:10.3390/su12197971.

Beltrando G. and Briche E. (2010) : Changement climatique et viticulture en Champagne : du constat actuel aux prévisions du modèle ARPEGE-Climat sur l'évolution des températures pour le XXI e siècle, EchoGéo [En ligne], 14 |, mis en ligne le 16 décembre 2010, consulté le 31 juillet 2021. URL : <http://journals.openedition.org/echogeo/12216> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/echogeo.12216>

Beltrando G. (2011) : *Les climats. Processus, variabilité et risques*. Edition : Armand Colin, pp 286

BEN (2023). Bilan énergétique national pour l'année 2022, établi par le ministère de l'énergie, Algérie. Consulté le 05/12/2023. [https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan\\_energetique\\_national\\_2019\\_5f7b107553bcd.pdf](https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan_energetique_national_2019_5f7b107553bcd.pdf)

Benyoucef B. (1986) : *Le M'Zab : Les pratiques de l'espace*. Alger : Éditions ENAL. 119 p

Benyoucef B. (2010) : *Le M'Zab parcours millénaire*, Éditions ALPHA, Alger, 253p

Benamouma D. (2018) : L'impact de la géométrie urbaine sur le confort thermique extérieur (Cas de la ville de Batna). Mémoire de Magister. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.

BenChennouf A. (1971) : le palmier dattier. Station expérimentale d'Ain Ben Naoui. Biskra, 22 p.

Bencheikh H. and Amieur R. (2012): The Effects of Green Spaces (Palme Trees) on the Microclimate in Arides Zones, Case Study: Ghardaïa, Algeria. *Energy Procedia*, 18, 10-20.

Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A.T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T., Woth K., (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change* 81, 71–95.

Benkouider F., Abdellaoui A., Hamami L. and Elaihar M. (2013): Spatio Temporal Analysis of Vegetation-by-Vegetation Indices from Multi-dates Satellite Images: Application to a Semi-Arid Area in Algeria. *Energy Procedia* 36 : 667 – 675.

Benmecheta A. (2016) : Estimation de la température de surface à partir de l'imagerie satellitale ; validation sur une zone côtière d'Algérie. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.

Bensayah A., Bencheikh H. and Abdessemed A. (2019): Mzabite Heritage in Southern Algeria: What Bioclimatic Lessons can Be Learned to Optimize Thermal Comfort? MATEC Web of Conferences 278, 04005

- Bensalah I., Yousfi B., Menaâ N. et Bougattoucha Z. (2018) : Urbanisation de la vallée du M'zab et mitage de la palmeraie de Ghardaïa (Algérie) : un patrimoine oasien menacé », *Belgeo* [En ligne], 2 | 2018, mis en ligne le 17 juillet 2018, consulté le 02 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/belgeo/24469> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/belgeo.24469>
- BenShalom H., Potchter O. and Tsoar H. (2009): the effect of the urban heat island and global warming on thermal discomfort in a desert city- the case of Beer-Sheva, Israel. *The seventh International Conference on Urban Climate, 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan*
- Berardi U. (2016) : The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy Build.* 121, 217-229. doi:10.1016/j.enbuild.2016.03.021
- Berger R. and Tiry M. (2012) The enchanting forest and the healing sand-Nature therapy with people coping with psychiatric difficulties. *The Arts in Psychotherapy* 39(5): 412–416.
- Berland A., Shiflett S.A., Shuster W.D., Garmestani A.S., Goddard H.C., Herrmann D.L. and Hopton M.E. (2017): The role of trees in urban stormwater management. *Landsc Urban Plan.* 162:167-177. doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017. PMID: 30220756; PMCID: PMC6134866.
- Bernard J., Musy M., Calmet I., Bocher E. et Kéramec P. (2017): Urban heat island temporal and spatial variations: Empirical modeling from geographical and meteorological data. *Building and Environment, Elsevier*, 2017, 125, pp.423-438. 10.1016/j.buildenv.2017.08.009. hal-01630175v2
- Bigot S., Duché S., Madelin M. and Rome S. (2017): Etude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques. *BSGLg* , 68.
- Blooshi L.S., Abuelgasim A., Nassar A. and Ksiksi T. (2020): Impact of Desert Urbanization on Urban Heat Islands Effect. *Open Journal of Geology*, 10, 760-770. <https://doi.org/10.4236/ojg.2020.107034>
- Bonn F. et Rochon G. (1992) : *Précis de télédétection volume 1: Principes et méthodes*. Sainte-Foy: Presse de l'université du Québec/AUPELF, 485 p.
- Bouchahm Y., Bourbia F., Belhamri A. (2011): Performance analysis and improvement of the use of windtower in hot dry climate. *Renewable Energy* 36; 898-906
- Bouchair A. (2004): Decline of urban ecosystem of M'zab valley, *Building and environment*, Elsevier, pp. 719-732.
- Boucherf D. (2004) : *Les changements climatiques en Algérie*, ONM Alger.
- Boudjellal L. and Bourbia F. (2017): An evaluation of the cooling effect efficiency of the oasis structure in a Saharan town through remotely sensed data. *International Journal of Environmental Studies*, 75(2), 309-320.

- Boukhabla M. (2015) : L'influence des facteurs climatiques sur la modification de l'îlot de chaleur urbain dans une rue « canyon, dièdre et dégagée », Cas des lotissements Biskra. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra. Algérie.
- Boulaassal H., Annaki S., Yazidi Alaoui O., Maatouk M., Wahbi M. et El Kharki O. (2020) : Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 2002 et 2016 à partir des images Landsat. Cas de la région Tanger-Tétouan-Al-Hoceima (Maroc). *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences* ISSN:2657-2664, Vol.3, No.2 (May 2020)
- Bouyer J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains. Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. France.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. and Pullin, A. S. (2010): Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence. *Landscape and Urban Planning*. 97(3): 147e155.
- Bozonnet E., Allard F., Musy M., Chazelas M. et Guarracino G. (2006) : URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions. Plan Urbanisme Construction Architecture.
- Bozonnet E., Doya M. and Allard F. (2011): Cool roofs impact on building thermal response: A French case study, *Energy Build.*, 43 (11) 3006–3012.
- Bréda N. (1999) : L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. Revue forestière française, *AgroParisTech*, 51 (2), pp.135-150.
- Brophy V., O'Dowd C., Bannon R., Goulding J. and Lewis J. (2000): Sustainable urban design. Energy Research Group, with the support of the European Commission, Directorate-General Energy and Transport.
- Brown M.J. and Grimmond C.S.B. (2001): Sky view factor measurements in downtown Salt Lake City - Data report for the DOE CBNP URBAN Experiment, Oct. 2000. *Internal Report, March, 2001*. Los Alamos National Laboratory, New Mexico. LA-UR-01- 1424, 44p.
- Brown DK., Barton JL., Gladwell VF. (2013): Viewing Nature Scenes Positively Affects Recovery of Autonomic Function Following Acute-Mental Stress. *Environmental Science & Technology*. 47(11): 5562–5569.
- Brunet Y. (2016) : Impact de la végétation sur le microclimat urbain et la qualité de l'air. Centre INRA UMR 1391 ISPA. Colloque Chimie et Grandes Villes. <https://actions.maisondelachimie.com/wpcontent/uploads/sites/2/2018/05/BRUNET-Yves.pdf>

- Buyantuyev A. and Wu J. (2010): Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecol* 25:17–33. DOI 10.1007/s10980-009-9402-4
- Cadot E. et Spira A. (2006) : Canicule et surmortalité à Paris en août 2003, Le poids des facteurs socio-économiques. 2006/2-3 *Espace urbain et santé*; p. 239-249
- Cameron R. W. F., Taylor J. E. and Emmett M. R. (2014): What’s ‘cool’ in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment*, 73, 198-207.
- Candas V. (1998) : Confort thermique [En ligne]. Strasbourg : Centre national de la recherche Scientifique (UPS 858), (Technique de l’ingénieur, Traité de génie énergétique, BE 9 085) [http://moodle.insatoulouse.fr/pluginfile.php/32017/mod\\_resource/content/0/42207210-be9085\\_Toperative.pdf](http://moodle.insatoulouse.fr/pluginfile.php/32017/mod_resource/content/0/42207210-be9085_Toperative.pdf) (Consulté le 11/09 2022).
- Cantat O. (2004) : « L’îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps », *Norois* [En ligne], 191 |2004/2, mis en ligne le 10 septembre 2008, consulté le 14 janvier 2022. URL : <http://journals.openedition.org/norois/1373> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/norois.1373>
- Cao X., Onishi A., Chen J. and Imura H. (2010): Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landsc. Urban Plan.* 96, 224–231.
- Carpentier F. L. (20 2) : *Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la chaleur dans l’agglomération de Montréal*. Université du Québec à Montréal. Mémoire de maîtrise.
- CCT (2019) : Centre Canadien de Télédétection : Notions fondamentales de télédétection. Ressources naturelles Canada. Consulté le 12/02/2021.
- CDC (2005): Heat-related mortality: Arizona, 1993–2002, and the United States, 1979–2002. Centers for Disease Control and Prevention. *Morbidity and Mortality Weekly Report* 54 (25) : 628–30.
- Chaïb J. (1997) : *Les eaux pluviales, gestion intégrée*, Ed. Sang de la Terre. 175 pages.
- Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C. and Latifovic R. (2006) : Cartographie de l’occupation et de l’utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*, vol. 6, n° 1, p. 9-17.
- Charfi S. et Dahech S. (2018) : “Cartographie des températures à Tunis par modélisation statistique et télédétection”, *Mappemonde* [Online], 123 | 2018, Online since 14 February 2018, connection on 16 August 2023. URL: <http://journals.openedition.org/mappemonde/442>; DOI: <https://doi.org/10.4000/mappemonde.442>
- Chea K., Manomaiphiboon K., Aman N., Thepa S., Junpen A. and Devkota B. (2021): Ambient thermal comfort analysis for four major cities in Thailand, Cambodia, and Laos:

Variability, trend, factor attribution, and large-scale climatic influence. *ScienceAsia* 47. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2021.067

Chebli M., Charfi S. et Dahech S. (2020): Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019. *Climatologie*, 17, 4.

Chémery L. (2006) : *Petit atlas des climats*. Edition Larousse . p 128.

Chen X., Zhao H., Li P. and Yin Z. (2006): Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sens. Environ.* 104, 133–146.

Chen Z., Chen F., Zhu F., Cao L., Shen X. and Li J. (2011): Effects of park size and plant community structure on urban park air temperature. *Chin. J. Ecol.* 30(11), 2590–2596. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2011.0377> (2011).

Chen D. and Chen H.W. (2013): Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environmental Development* 6, pp. 69–79

Cho S., Poudyal N. and Roberts R. (2008): Spatial analysis of the amenity value of green open space. *Ecological Economics* 66, 403-416.

Chow W. T. L., Pope R. L., Martin C. A. and Brazel A. J. (2010): Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. *Theoretical and Applied Climatology*, 103 (1–2), pp. 197–211.

Chow W. T. L. and Brazel A. J. (2012): Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city. *Building and Environment*, 47 (1), pp. 170–181.

Chow W. T. L., Chuang W. and Gober P. (2012): Vulnerability to Extreme Heat in Metropolitan Phoenix: Spatial, Temporal, and Demographic Dimensions. *The Professional Geographer*, 64(2) 2012, pages 286–302

Chow W.T.L., Ali Akbar S.N.A. B., Heng S. L. and Roth M. (2016): Assessment of measured and perceived microclimates within a tropical urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* 16 (2016) 62–75

Chudnovsky A., Ben-Dor E. and Saaroni H. (2004): Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements. *Energy Build.*, 36, 1063–1074.

Clergeau P. (2007) : *Une écologie du paysage urbain*, Ed. Apogée. 137 pages.

Coccolo S., Kampf J., Scartezzini J.L. and Pearlmutter D. (2016): Outdoor human comfort and thermal stress: A comprehensive review on models and standards. *Urban Climate* vol. 18, p. 33–57, <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>

Cohen P., Potchter O. and Matzarakis A. (2012): Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. *Building and Environment* 51:285–295.

Cohen P., Shashua-Bar L., Keller R., Gil-Ad R., Yaakov Y., Lukyanov V., Kutiel P.B., Tanny J., Cohen S. and Potchter O. (2019): Urban outdoor thermal perception in hot arid Beer Sheva, Israel: Methodological and gender aspects. *Build. Environ.*, 160, 106169.

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, France.

Colombert M., Salagnac J.-L., Morand D. et Diab Y. (2012) : « Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines », *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Hors-série 12 | mai 2012, mis en ligne le 04 mai 2012, consulté le 09 août 2022. URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/11811> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.11811>

Congalton R.G. (1991): A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-46.

Cormier L., de Lajarte A. and Carcaud N. (2010) : La planification des trames vertes, du global au local : réalités et limites, *Cybergeog: European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 504, mis en ligne le 06 juillet 2010, consulté le 03 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeog/23187> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeog.23187>

Correa E.N., Rosa C. and Lesino G. (2006): Impact of urban design strategies on the urban climate in arid regions. The case of Mendoza's Metropolitan Area, in Argentina. *Proceedings "Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in arid and hot regions?"* Ghardaïa, Algeria, 9-12 December.

Côte M. (2002) : Une ville remplit sa vallée : Ghardaïa, *Méditerranée*, 99, 3-4, Le Sahara, cette « autre Méditerranée, Persée, pp. 107-110.

Côte M. (2005) : *La ville et le désert le bas-Sahara algérien*. Iremam, Karthala Paris. 306 p

Coutts A. and Harris R. (2013): A Multi-scale Assessment of Urban Heating in Melbourne During an Extreme Heat Event: Policy Approaches for Adaptation. Monash University, Clayton, Australia.

Coutts A. M., Harris R. J., Phan T., Livesley S. J., Williams N. et Tapper N. J. (2016): Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sensing of Environment*, 186, 637–651.

Crompton J. (2001): The impact of parks on property values: a review of the empirical evidence. *Journal of Leisure Research* 33(1), 1-31.

CRSTRA (2008) : *Impact des changements climatiques sur les régions arides et semi arides*. Université Mohamed Kheider (Biskra), Actes des journées internationales (Biskra,

Algérie 15-17 Décembre 2007). Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA). Edition : Dar el Houda, 2008, 448 p.

Cui Y. Y. et Foy B. D. (2012): Seasonal Variations of the Urban Heat Island at the Surface and the Near-Surface and Reductions due to Urban Vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 855–868. doi: 10.1175/jamc-d-11-0104.1

da Cunha E. G., Correa C. M. B., Peil R., Ritter V. M., Hohn D., Maieves H., Gonzalez J.N., Silva M. E. and Leitzke R.K. (2021): Characterizing leaf area index of rooftop farm to assess thermal-energy performance by simulation. *Energy Build* 241:110960.

Dahech S. (2012) : Évolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax entre 1987 et 2010. Impact sur la consommation d'énergie en été. *Climatologie*, numéro spécial 'Climats et changement climatique dans les villes' (2012)

Dahech S. (2014) : Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude, *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 695, mis en ligne le 02 décembre 2014, consulté le 11 septembre 2017. DOI : 10.4000/cybergeo.26555

Dahech S. et Charfi S. (2017) : Aspects topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : Îlot de chaleur et brises thermiques. *Les Impromptus*, 138-158.

Dalman M., Elias Salleh E., Sopian A.R. and Saadatian O. (2013): Thermal Comfort Investigation in Traditional and Modern Urban Canyons in Bandar Abbas, Iran. *Pertanika J. Soc. Sci. & Hum.* 21 (4): 1491 - 1515

Das N., Mondal P., Sutradhar S. and Ghosh R. (2021): Assessment of variation of land use/land cover and its impact on land surface temperature of Asansol subdivision. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Volume 24, Issue 1, p. 131-149.

Dasari H. P., Desamsetti S., Langodan S., Viswanadhapalli Y. and Hoteit I. (2021): Analysis of Outdoor Thermal Discomfort Over the Kingdom of Saudi Arabia. *GeoHealth*. Volume5, Issue6, e2020GH000370. <https://doi.org/10.1029/2020GH000370>

Davis Z.G., Edmondson J.L., Heinemeyer A., Leake J.R. and Gaston K.J. (2011): Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale, *Journal of Applied Ecology* 48(5): 1125-1134

De Abreu-Harbich L.V., Labaki L.C. and Matzarakis A. (2015): Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics. *Landsc. Urban Plan.* 138, 99–109.

Deilami K., Kamruzzaman M. and Liu Y. (2018): Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 67, 30–42.

- De La Torre J. M. O. and Serra R. (1998) : Microclimatic analysis of some urban scenarios. In proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal, June 1998. *London: James & James*, pp. 159-162.
- deMunck C., Pigeon G., Masson V., Meunier F., Bousquet P., Tréméac B., Merchat M., Poeuf P. and Marchadier C. (2013): How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology* 33: 210-227.
- Deng Y., Wang S., Bai X., Tian Y., Wu L., Xiao J., Chen F. and Qian Q. (2018): Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area. *SCientifiCREPOrTS* 8:641 | DOI:10.1038/s41598-017-19088-x
- Depecker P., Izard J. and Traisnel J. (1989) : Qualité thermique des ambiances. Paris : AFME, 67 p. *Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture*.
- Desjardins R., Dubois J.-M. et Lemieux G. (2000). La télédétection : Perspective analytique. Éditions ESTEM. 232 pages.
- Dewan A., Kiselev G., Botje D., Mahmud G.I., Bhuiyan M.H. and Hassan Q.K. (2021): Surface urban heat island intensity in five major cities of Bangladesh: Patterns, drivers and trends. *Sustainable Cities and Society* 71: 102926
- Dialesandro J. M., Wheeler S. M. and Abunnasr Y. (2019): Urban heat island behaviors in dryland regions. *Environ. Res. Commun.* 1 :081005. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab37d0>
- Di Sabatino S., Hedquist BC., Carter W., Leo LS. and Fernando HJS. (2009): Phoenix urban heat island experiment: effects of built elements. Proceedings of the Eighth Symposium on the Urban Environment, Phoenix, Arizona.
- Djouima A., Bouchahm Y., Bourbia F. and Torkia A. (2018): Realization and experimentation of a wind tower for passive evaporative cooling in hot dry area: Hassi-Messaoud, Algeria [online]. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. Disponible sur: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v10i1.25>
- Doick K. and Hutchings T. (2013): Air Temperature Regulation by Urban Trees and Green Infrastructure. (Research Note). The Forestry Commission, Farnham.
- Doick K. J., Peace A. and Hutchings T. R. (2014): The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island. *Science of the Total Environment*, 493: 662–671. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.06.048
- Doulos L., Santamouris M. and Livada I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. the role of materials. *Solar Energy*, 77(2):231 – 249.
- Drapeau L.-M., Beaudoin M., Vandycke L. et Brunstein M. (2022) : Mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains : mise à jour 2021. Synthèse des connaissances. Institut national de santé publique du Québec, Canada. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2839> consulté le 22/08/2022.

- Du H., Zhou F., Cai W., Cai Y. and Xu Y. (2021): Thermal and Humidity Effect of Urban Green Spaces with Different Shapes: A Case Study of Shanghai, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 18, 5941. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115941>
- Dubois C. (2014) : *Adapter les quartiers et les bâtiments au réchauffement climatique ; une feuille de route pour accompagner les architectes et les designers urbains québécois*. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France.
- Dubost D. (2002) : *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*. Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides. 423 p.
- Dutta K., Basu D. et Agrawal S. (2018): Temporal and spatial analysis of urban heat island using landsat satellite data: two indian case studies. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, RemoteSensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-5, 2018 ISPRS TC V Mid-term Symposium “GeospatialTechnology – Pixel to People”, 20–23 November 2018, Dehradun, India. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-71-2018>
- Eliasson I. and Svensson M. K. (2003): Spatial air temperature variations and urban land use—a statistical approach, *Meteorol. Appl.*, 10, 135–149.
- El Kharki O., Mechboub J., Ducrot D., Rouchdi M. and Ngono j. M. (2015) : Panorama sur les methodes de classification des images satellites et techniques d’amélioration de la precision de la classification. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* n°210.
- Elmarakby E., Khalifa M., Elshater A. and Afifi S. (2022): Tailored methods for mapping urbanheatlands in Greater Cairo Region. *Ain Shams Engineering Journal* 13, 101545.
- Emmanuel R., Lin, T.P., Ng E., Duarte D.H.S., Johansson E., Perera N., Giridharan R., Drach P. and Mills G. (2016): *Urban Climate Challenges in the Tropics: Rethinking Planning and design opportunities*. Imperial College Press. 384 pages.
- Envcal (2008) : EnvCAL - Suivi de l'environnement par télédétection. <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvéd/envcal/html/>. Consulté le 02/03/2021.
- Epstein Y. and Moran D. S. (2006): Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. Review Article. *Industrial Health* 2006, 44, 388–398
- Erell E., Pearlmutter D. and Williamson T. (2011): *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*. Earthscan.
- ESA (2015): European Space Agency: Sentinel-2 User Handbook, 64 pages. [https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook.pdf/](https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.pdf/) (consulté le 01/02/2023).
- Escourrou G. (1991). *Le climat et la ville*. Paris: Nathan, coll. Géographie d’aujourd’hui, 192p.

- Fan H. and Sailor D.J. (2005): Modeling the Impacts of Anthropogenic Heating on the Urban Climate of Philadelphia: A Comparison of Implementations in Two PBL Schemes. *Atmospheric Environment*, 39, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.031>
- Fan C., Myint S.W., Kaplan S., Middel A., Zheng B., Rahman A., Huang H.P., Brazel A. and Blumberg D.G. (2017): Understanding the Impact of Urbanization on Surface Urban Heat Islands—A Longitudinal Analysis of the Oasis Effect in Subtropical Desert Cities. *Remote Sens.* 9, 672.
- Fanger P. O. (1970) : Thermal comfort. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 244 p.
- Farhadi H., Faizi M. and Sanaieian H. (2019): Mitigating the urban heat island in a residential area in Tehran: Investigating the role of vegetation, materials, and orientation of buildings. *Sustain. Cities Soc.* 2019, 46, 101448.
- Farid N., Moazzam M.F.U., Ahmad S.R., Coluzzi R. and Lanfredi M. (2022): Monitoring the Impact of Rapid Urbanization on Land Surface Temperature and Assessment of Surface Urban Heat Island Using Landsat in Megacity (Lahore) of Pakistan. *Front. Remote Sens.* 3:897397. doi: 10.3389/frsen.2022.897397
- Fatima N., Alamgir A., Ali Khan M., Fatima S. U. and Malik E. (2022): Monitoring of environmental resources using normalized difference vegetation index (NDVI) and normalized difference water index (NDWI) in the coastal areas of Sindh, Pakistan. *Int. J. Biol. Biotech.*, 19 (3): 379-393, 2022.
- Feddema J. J. (2005): A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*, 26, 6, pp. 442–466.
- Feng Y., Gao C., Tong X., Chen S., Lei Z. and Wang J. (2019): Spatial Patterns of Land Surface Temperature and Their Influencing Factors: A Case Study in Suzhou, China. *Remote Sens.* 11, 182. <https://doi.org/10.3390/rs11020182>
- Ferrelli F., Huamantincó M. A., Delgado A. L. and Piccolo M. C. (2018): Spatial and temporal analysis of the LST-NDVI relationship for the study of land cover changes and their contribution to urban planning in Monte Hermoso, Argentina. *Documents d'Analisi Geografica*, vol. 64/1 25-47. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.355>
- 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.
- Filiatreault Y. (2015) : Changements climatiques et îlots de chaleur : indicateurs de performance pour les mesures d'adaptation. Mémoire (M. Env.), Centre universitaire de formation en environnement et développement durable. [https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais\\_2015/Filiatreault\\_Ysabelle\\_MEnv\\_2015.pdf](https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2015/Filiatreault_Ysabelle_MEnv_2015.pdf). Consulté le 07/08/2022.
- Foissard X. (2015) : L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. Thèse de doctorat en Géographie. Université Rennes 2, France.

- Fung C. and Jim C.Y. (2017) : Assessing the cooling effects of different vegetation settings in a Hong Kong golf course. *Procedia Environmental Sciences* 37, 626-636
- Gago E.J., Roldan J., Pacheco-Torres R. and Ordóñez J. (2013): The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25: 749–758.
- Gago E.J., Berrizbeitia S. E., Torres R. P. and Muneer T. (2020): Effect of Land Use/Cover Changes on Urban Cool Island Phenomenon in Seville, Spain. *Energies*, 13, 3040; doi:10.3390/en13123040
- Gal C. (2014): The influence of built form and vegetation on the canopy layer microclimate within urban blocks. *Acta climatologica et chorologica*. Universitatis Szegediensis, Tomus 47-48, 43-52
- Gandemer J. et Guyot A. (1976) : *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*. Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris.
- Gartland L. (2008): *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. UK and USA: Earthscan. 192 pages.
- Gašparović M. and Singh S. K. (2022): Urban surface water bodies mapping using the automatic k-means based approach and sentinel-2 imagery, *Geocarto International*, DOI: [10.1080/10106049.2022.2148757](https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2148757)
- Gelder J. (2018): Design with climate in ancient Rome: Vitruvius meets Olgyay. In P. Rajagopalan and M.M Andamon (eds.), *Engaging Architectural Science: Meeting the Challenges of Higher Density: 52nd International Conference of the Architectural Science Association 2018*, pp.745–752. ©2018, The Architectural Science Association and RMIT University, Australia.
- Georgi N.J. and Zafiriadis K. (2006): The impact of park trees on microclimate in urban areas. *Urban Ecosystems* 9, 195–209.
- Ghani S., Bialy E. M., Bakochristou F., Ahmad Gamaledin S.M., Rashwan M.M., and Hughes B. (2017): Thermal comfort investigation of an outdoor air-conditioned area in a hot and arid environment, *Science and Technology for the Built Environment*, 1–19.
- Ghani S., Mahgoub A. O., Bakochristou F. and ElBialy E. A. (2021): Assessment of thermal comfort indices in an open air-conditioned stadium in hot and arid environment. *Journal of Building Engineering* 40 (2021) 102378
- Ghezloun A. (2021) : Les engagements de l'Algérie dans sa lutte contre les changements climatiques. *Bulletin des Energies Renouvelables* N° 51 – 2021. [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber51\\_08\\_10.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber51_08_10.pdf) , consulté le 16/08/2022

- Gherras H. et Alkama D. (2020) : L'estimation de l'impact des espaces verts et des surfaces d'eau sur le climat urbain et la température de surface du sol (Mila, Algérie). *Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr.*, 64, (2), p. 155–174, 2020, București
- Gherras H., Guechi I. and Alkama D. (2020): Quantifying the effects of spatial patterns of green spaces on urbanclimate and urbanheat island in a semi-arid climate. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, Vol. 89, articles, 2020, p. 164 - 185
- Gherras H. (2021) : L'impact de l'espace vert sur le microclimat urbain et l'utilisation des espaces extérieurs (Cas de la ville de Constantine). Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- Ghribi M., Euchy H. et Dahech S. (2019): Inconfort thermique et olfactif dans l'agglomération de Sfax : perception dans les quartiers populaires de Sfax-Ouest (Tunisie). *Publications de l'AIC*, 359-364.
- Ghribi M. et Dahech, S. (2020) : Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain à Sfax durant la saison chaude (centre-est de la Tunisie). *Climatologie*, 17, 7.
- Giannakis E., Bruggeman A., Poulou D., Zoumides C. and Eliades M. (2016): Linear Parks along Urban Rivers: Perceptions of Thermal Comfort and Climate Change Adaptation in Cyprus. *Sustainability*, 8, 1023; doi:10.3390/su8101023
- GIEC (2022) : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat : IPCC Sixth Assessment Report : Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> consulté le 18/08/2022.
- Giguère M. (2009) : Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Revue de littérature. Institut National de Santé Publique, Gouvernement du Québec, 2009.95p. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2007095>
- Gillig C.M., Bourgery C. et Amann N. (2008) : *L'arbre en milieu urbain : conception et réalisation de plantations*. Edition Infolio. 216 pages.
- Girard M.C. et Girard C.M. (2010) : *Traitement des données de télédétection Environnement et Ressources naturelles*. 2ème Edition, Parution, Dunod, 553 p.
- Givoni B. (1978) : *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris : édition du Moniteur, 460 p.
- Givoni B., Noguchi M., Saaroni H., Pochter O., Yaacov Y., Feller N. and Becker S. (2003): Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35: 77-86.
- Givoni B. and Saaroni H. (2003): Predicted sun exposed irrigated lawn temperatures. *Fifth International Conference on Urban Climate*, 15 September 2003, Lodz, Poland.
- Gorenflot R. et de Foucault B. (2005): *Biologie végétale, Les Cormophytes*, 7 ème édition, Dunod, Paris, 594 pp.
- Goret M. (2019) : Etude des interactions entre le climat urbain et le CO2 : modélisation des flux de CO2 et application à l'échelle d'une ville. Thèse de doctorat, de l'université de Toulouse. France.

Gourfi A., Taïbi A.N., Salhi S., Hannani M.E. and Boujrouf S. (2022): The Surface Urban Heat Island and Key Mitigation Factors in Arid Climate Cities, Case of Marrakesh, Morocco. *Remote Sens.* 14, 3935. <https://doi.org/10.3390/rs14163935>

Govil H., Guha S., Dey A. and Gill N. (2019): Seasonal evaluation of downscaled land surface temperature: A case study in a humid tropical city. *Heliyon* 5 : e01923

Gratia E. et UCL - Architecture et Climat (2000) : « Cours AMCO 2361 - Climat et microclimats ». Site web. <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/>. Consulté le : 05/12/2018.

Grignon-Massé L. (2010) : Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

Grimmond, C., Roth, M., Oke, T., Au, Y., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L., Liu, C., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D. and Voogt, J. (2010): Climate and more sustainable cities: climate information for improved planning and management of cities. *Procedia Environmental Sciences*, 1:247–274.

Grosdemouge V. (2020) : Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2020.

Guay F. et Baudouin Y. (2003) : Les îlots de chaleur urbains, Collectivités viables - *Le bulletin d'information de Vivre en Ville* 2 (3), pp. 8-9.

Guha S., Govil H., Dey A. and Gill N. (2018): Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51, 1, 667-678.

Guha S., Govil H., and Diwan P. (2020): Monitoring LST-NDVI Relationship Using Pre-monsoon Landsat Datasets. *Advances in Meteorology*, Article ID 4539684, 15 pages

Guhathakurta S. and Gober P. (2007): The Impact of the Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use, *Journal of the American Planning Association*, Vol.73, 3, 317-329.  
Gunawardena K.R., Wells M.J. and Kershawa T. (2017): Utilizing green and blue-space to mitigate urban heat island intensity. *Science of the Total Environment* 584–585, 1040–1055.

Hallé F. (2008) : Les arbres. In : Aux origines des plantes : des plantes anciennes à la botanique du XXI<sup>e</sup> siècle. Hallé F., *Fayard*, pp. 240-253.

Hamada M. A., Kanat Y. and Abiche A. E. (2019): Multi-Spectral Image Segmentation Based on the K-means Clustering. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, Volume-9 Issue-2. 1016- 1019. DOI: 10.35940/ijitee.K1596.129219

- Hamada S., Tanaka T. and Ohta T. (2013): Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas. *Urban forestry & urban greening*, 12(4), 426-434.
- Hankey S. and Marshall J.D. (2017): Urban Form, Air Pollution, and Health. *Curr Envir Health Rpt4*, 491–503
- Hao X., Li W. and Deng H. (2016): The oasis effect and summer temperature rise in arid regions - case study in Tarim Basin. *Sci Rep* 6, 35418. <https://doi.org/10.1038/srep35418>
- Harlan S.L., Brazel A.J., Prashad L., Stefanov W.L. and Larsen L. (2006): Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, *Social Science & Medicine* 63 (11), pp. 2847–2863.
- Hassan T., Zhang J., Prodhan F.A., Pangali Sharma T.P. and Bashir B. (2021): Surface Urban Heat Islands Dynamics in Response to LULC and Vegetation across South Asia (2000–2019). *Remote Sens.* 2021, 13, 3177. <https://doi.org/10.3390/rs13163177>
- Hassani N., Lebaut S., Drogue G. and Sghir S. (2021) : Dynamique d’urbanisation et thermographies satellitaires en milieu méditerranéen : le cas du grand Casablanca (Maroc). *BSGLg*, 77, 5-22
- He Y., Yu H., Ozaki A., Dong N. and Zheng S. (2017): An investigation on the thermal and energy performance of living wall system in Shanghai area. *Energy Build.* 140, 324–335.
- Heaviside C., Macintyre H. and Vardoulakis S. (2017): The urban heat island: implications for health in a changing environment. *Curr. Environ. Health Rep.*4, 296–305
- Heidari H., Golbabaei F., Shamsipour A., Forushani A.R. and Gaeini A. (2014): Evaluation of Thermal Discomfort in Outdoor Environments: A Cross Sectional Study throughout IRAN. *Advances in Environmental Biology*, 8(13) Pages: 1008-1015
- Heisler G. M. and Brazel A. J. (2010) : The urban physical environment: temperature and urban heat islands Chapter 2. In: Aitkenhead-Peterson, Jacqueline; Volder, Astrid, eds. *Urban Ecosystem Ecology*. Agronomy Monograph 55. Madison, WI: *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America*: 29-56.
- Hémon D., Jouglu E., Clavel J., Laurent F., Bellec S. et Pavillon G. (2003): Surmortalité liée à la canicule d’août 2003 en France. République Française. Ministère de la santé de la famille et des personnes handicapées. Institut de veille sanitaire. Numéro spécial: *BEH* n° 45-46/2003.
- Hendel M., Gutierrez P., Colombert M., Diab Y. and Royon L. (2016): Measuring the Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques in the Field: Application to the Case of Pavement-Watering in Paris. *Urban Climate*, Elsevier, 10.1016/j.uclim.2016.02.003. hal- 01113917v

- Herbei M. V. and Sala F. (2020): Evaluation of urban areas by remote sensing methods in relation to climatic conditions: case study city of Timisoara. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, Vol. 15, No. 2, p. 327 – 337; Doi:10.26471/cjees/2020/015/133
- Hidayati I. N. and Suharyadi R. (2019): A Comparative Study of Various Indices for Extraction Urban Impervious Surface of Landsat 8 OLI. *Forum Geografi*, Vol 33 (2): 162-172. DOI: 10.23917/forgeo.v33i2.9179
- Hodul M., Knudby A. and Ho H.C. (2016): Estimation of Continuous Urban Sky View Factor from Landsat Data Using Shadow Detection. *Remote Sensing* 8, 568.
- Hoshino T. and Kuriyama K. (2010): Measuring the benefits of neighborhood park amenities: Application and comparison of spatial hedonic approaches. *Environmental & Resource Economics* 45 (3), 429-444.
- 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
- Houghton F.C. and Yaglou C.P. (1923): Determining Equal Comfort Lines. *Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers* 29, 165–176.
- Howard L. (1818): *The Climate of London: deduced from Meteorological observations, made at different places in the neighborhood of the metropolis* (Vol. 1): W. Phillips, sold also by J. and A. Arch. 285p
- Howard L. (1833): *The Climate of London*. Reprinted 2007, IAUC edition, 284 p.
- Hoyano A. (1988): Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. Tokyo Institute of Technology, Japan. *Energy and Buildings*, 11, pp. 181 - 199.
- Hufty A. (2001) : *Introduction à la climatologie : le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine*. Presses Université Laval. 542 pages.
- Humaida N., Prasetyo L. B. and Rushayati S. B. (2016): Priority assessment method of green open space (case study: Banjarbaru City). *Procedia Environmental Sciences* 33, 354 – 364. The 2nd International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental Monitoring 2015, LISAT-FSEM 2015
- Ibsen P. C., Borowy D., Dell T., Greydanus H., Gupta N., Hondula D. M., Meixner T., Santelmann M. V., Shiflett S. A., Sukop M. C., Swan C. M., Talal M. L., Valencia M., Wright M. K. and Jenerette G. D. (2021): Greater aridity increases the magnitude of urban nighttime vegetation-derived air cooling. *Environ. Res. Lett.* 16, 034011. doi.org/10.1088/1748-9326/abdf8a
- Ichim P. and Sfîca L. (2020): The Influence of Urban Climate on Bioclimatic Conditions in the City of Iasi Romania. *Sustainability*, 12, 9652; doi:10.3390/su12229652

ICU (2017): Les îlots de chaleur urbains (ICU), Etude réalisée par l'Agence de développement et d'urbanisme de Lille Métropole. Etude 2017. Consulté le : 22/01/2021 [https://www.adu-lille-metropole.org/wp-content/uploads/2021/05/1828-ICU\\_web.pdf](https://www.adu-lille-metropole.org/wp-content/uploads/2021/05/1828-ICU_web.pdf)

IFRC (2003): India : Heat wave. International Federation of Red Cross. Information Bulletin 1/2003. Available at /www.ifrc.org. file:///C:/Users/Rachid/Downloads/indiaheatwave03a1.pdf consulté le 18/08/2022.

Imhoff M.L., Zhang P., Wolfe R.E. and Bounoua L. (2010): Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sens. Environ.* 114, 504–513.

Imran H.M., Kalab J., Nga A.W.M. and Muthukumaran S. (2019): Effectiveness of vegetated patches as GreenInfrastructure in mitigating Urban Heat Island effects during a heatwave event in the city of Melbourne. *Weather Clim. Extrem.* 2019, 25, 100217.

Indraganti M. and Boussaa D. (2017): An adaptive relationship of thermal comfort for the Gulf Cooperation Council (GCC) Countries: The case of offices in Qatar Madhavi. *Energy and Buildings*, 159, 201-212.

INSERM (2004) : Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 - Suivi de la mortalité (2 1 août- 31 décembre 2003). Institut national de la santé et de la recherche médicale. 42 p.

Irie T. (2022): The cooling effect of green infrastructure in mitigating nocturnal urban heat islands: a case study of Yoyogi Park and Meiji Jingu Shrine in Tokyo, *Landscape Research*, 47:5, 559-583, DOI: [10.1080/01426397.2022.2050195](https://doi.org/10.1080/01426397.2022.2050195)

Irmak MA., Yilmaz S., Yilmaz H., Ozer S. and Toy S. (2013): Evaluation of different thermal conditions based on THI under different kind of tree types – as a specific case in a Ata botanic garden in eastern Turkey. *Global NEST Journal* 15(1):131–139.

Islam M. B., Becker M., Bargiel D., Ahmed K. R., Duzak P. and N. Eman (2017): Sentinel-2 Satellite Imagery based Population Estimation Strategies at FabSpace 2.0 Lab Darmstadt.

*Conference and Labs of the Evaluation Forum 2017*. Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-4/W3-2022. The 7th International Conference on Smart City Applications, Castelo Branco, Portugal. [https://ceur-ws.org/Vol-1866/paper\\_140.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-1866/paper_140.pdf) consulté le 01/02/2023

Isioye O. A., Ikwueze H. U. and Akomolafe E. A. (2020): Urban Heat Island Effects and Thermal Comfort in Abuja Municipal Area Council of Nigeria. *FUTY Journal of the Environment* Vol. 14 No. 2.

Jacquemoud S. (2007) : Physique de l'atmosphère, télédétection et géophysique spatiale. Cours de télédétection L3 géosciences fondamentales. Université Paris 7.

Jalan S. et Sharma K. (2014): Spatio-temporal assessment of land use/ land cover dynamics and urban heat island of Jaipur city using satellite data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-8, 2014. ISPRS Technical Commission VIII Symposium, 09 – 12 December, Hyderabad, India. doi:10.5194/isprsarchives-XL-8-767-2014

- Jassim J. A.W., Hassan S. A. and Maula B. H. (2020): Design of Wind Catcher for Earth Air Heat Exchangers to Rationalize Energy Consumption. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 65, Issue 2 (2020) 286-294.
- Jauregui E. (1991): Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and buildings*, 15(3), 457-463.
- Jim C. Y. (2015): Assessing climate-adaptation effect of extensive tropical green roofs in cities. *Landscape and Urban Planning*, 138, 54-70.
- Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skoković D., Mattar C. and Cristóbal J. (2014): Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 10, pp. 1840-1843.
- Johnston J. and Newton J. (2004): Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements. Ecology Unit. London, 95 p.
- José da Silva V., da Silva C. R., Almeida L. S., da Silva C. R., Carvalho H. P. and de Camargo R. (2018): Mobile transect for identification of intra-urban heat islands in Uberlandia, Brazil. doi:10.4136/ambi-agua.2187. en ligne : <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/66Vvxy8LYHTxK3DhDJpNmNw/?lang=en>
- Kaczynski A. and Henderson K. (2007): Environmental Correlates of Physical Activity: A Review of Evidence about Parks and Recreation. *Leisure Sciences* 29, 315-354.
- Kaiser E.A., Linn R.M., Rolim S.B.A., Käfer P.S., Rocha N.S., Diaz L.R., Grondona A., Costa S.T.L. and Hallal G.P. (2020): The urban heat island of Porto Alegre, RS, southern Brazil: an analysis between 1985 and 2019 through the radiative transfer in the infrared thermal. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W12-2020, IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference, Santiago, Chile.
- Kaplan G., Avdan U. and Avdan Z. (2018): Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite. Data: A Case Study in Skopje, Macedonia. *Proceedings*. 2, 358; doi:10.3390/ecrs-2-05171.
- Kergomard C. (2016) : La télédétection aérospatiale : une introduction. Support de cours. Ecole Normale Supérieure Paris. Consulté le: 12/06/2020.
- Khan S., Gul S. and Li W. (2021): Remote sensing evaluation of land surface temperature and urban area expansion in Zhengzhou city during 2013-2015. *Natural & Applied Sciences International Journal*, 2(1), 39-55. <https://doi.org/10.47264/idea.nasij/2.1.4>
- Khan Z. and Javed A. (2022): Correlation between land surface temperature (LST) and normalized difference vegetation index (NDVI) in Wardha Valley Coalfield, Maharashtra, Central India. *Nova Geodesia*, 2(3), 53. <https://doi.org/10.55779/ng2353>
- Kitous S. (2012) : Forme urbaine et environnement thermos-aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Alger, Algérie.

- Kleerekoper L., van Esch M. and Salcedo T. B. (2012): How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30-38.
- Klemm W., Heusinkveld B. G., Lenzholzer S. and Hove B. (2015): « Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort ». In: *Landscape and Urban Planning* 138, p. 87–98.
- Klinenberg E. (2022) : Canicule. Chicago, été 1995. Autopsie sociale d'une catastrophe, Edition : Deux-cent-cinq/Ecole urbaine de Lyon, 304 p.
- Khallef B., Biskri Y., Mouchara N. and Brahamia K. (2020): Analysis of Urban Heat Islands Using Landsat 8 OLI/ TIR Data: Case of the City of Guelma (Algeria). *AJEE*, 12(4): 42-51; Article no. AJEE.57316
- Khatami R., Mountrakis G. and Stehman S.V. (2016): A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. *Remote Sensing of Environment* 177: 89–100
- Knight T., Price S., Bowler D., Hookway A., King S., Konno K. and Richter R. L. (2021) : How effective is 'greening' of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the 'urban heat island effect'? An updated systematic review. *Environ Evid* (2021) 10:12. <https://doi.org/10.1186/s13750-021-00226-y>
- Konijnendijk C., Annerstedt M., Nielsen A. and Maruthaveeran S. (2013): Benefits of Urban Parks: A Systematic Review. *IFPRA. Copenhagen & Alnarp*, January 2013.
- Kong F., Yin H., James P., Hutyrá L.R., and He H.S. (2014a): Effects of spatial pattern of greenspace on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China. *Landscape and Urban Planning*, 128, 35-47.
- Kong F., Yin H., Wang C., Cavan G. and James P.(2014b): A Satellite Image-based Analysis of Factors Contributing to the Green-Space Cool Island Intensity on a City Scale. *Urban Forestry & Urban Greening*. Volume 13, Issue 4, 2014, Pages 846-853
- Kotharkar R. and Surawar M. (2016): Land Use, Land Cover, and Population Density Impact on the Formation of Canopy Urban Heat Islands through Traverse Survey in the Nagpur Urban Area, India. *Journal of Urban Planning and Development.*, 2016. - 1: Vol. 142.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. and Rubel F. (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 3, 259-263
- Kotzen B. (2003): An investigation of shade under six different tree species of the Negev desert towards their potential use for enhancing micro-climatic conditions in landscape architectural development. *Journal of Arid Environments* 55, 231-274.

- Kousis I., Pigliatile I. and Pisello A.L. (2021): Intra-urban microclimate investigation in urban heat island through a novel mobile monitoring system. *Sci Rep.* 2021 May 6;11(1):9732. doi: 10.1038/s41598-021-88344-y.
- Kraemer R. and Kabisch N. (2022): Parks Under Stress: Air Temperature Regulation of Urban Green Spaces Under Conditions of Drought and Summer Heat. *Front. Environ. Sci.* 0:849965. doi: 10.3389/fenvs.2022.849965
- Krtalić A., Divjak A. K. and Čmrlec K. (2020): Satellite-driven assessment of surface urban heat islands in the city of Zagreb, Croatia. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume V-3-2020, XXIV ISPRS Congress.
- Kuang W. (2020): Seasonal Variation in Air Temperature and Relative Humidity on Building Areas and in Green Spaces in Beijing, China. *Chinese Geographical Science*, 30(1): 75–88. <https://doi.org/10.1007/s11769-020-1097-0>
- Kumar D., Soni A. and Kumar M. (2022): Retrieval of Land Surface Temperature from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *Journal of Human, Earth, and Future* Vol. 3, No. 2.
- Kumar R., Mishra V., Buzan J., Kumar R., Shindell D. and Huber M. (2017): Dominant control of agriculture and irrigation on urban heat island in India. *Sci. Rep.* 2017, 7, 14054.
- Kuttler W. (2012): Climate change on the urban scale-Effects and counter-measures in Central Europe. In *Human and Social Dimensions of Climate Change; InTech: Garching bei München, Germany, 2012.*
- LaDochy S., Torres T. and Hsu Y. F. (2021): Los Angeles' urban heat island continues to grow: urbanization, land use change influences. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.15, n.2, p.103-116
- Lai D., Liu W., Gan T., Liu K. and Chen Q. (2019): A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Sci. Total Environ.* 2019, 661, 337–353.
- Lai D., Lian Z., Liu W., Guo C., Liu W., Liu K. and Chen Q. (2020): A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces. *Science of the Total Environment*, 742:140092.
- Laille P., Provendier D. et Colson F. et Salanié J. (2014). Les bienfaits du végétal en ville : étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse. *Plante & Cité*. 32 pages. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-20857-bienfaits-vegetal.pdf> consulté le : 13/07/2020.
- Landis J. R. and Koch G. G. (1977): The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, Vol. 33, No. 1, pp. 159-174
- Larue D. (1996) : L'arbre dans la ville, *Ecologie urbaine*, Éditeur Sang de la terre , 168 Pages.

- Lazzarini M., Marpu P.R., and Ghedira H. (2013): Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136–152. doi: 10.1016/j.rse.2012.11.007
- Lazzarini M., Molini A., Marpu P.R., Ouarda T.B. and Ghedira H. (2015): Urban climate modifications in hot desert cities: The role of land cover, local climate, and seasonality. *Geophys. Res. Lett.* 42, 9980–9989.
- Leconte F. (2014) : Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy. Thèse de doctorat. Université de Lorraine. France.
- Leconte F., Bouyer J., Claverie R. and Pétrissans M. (2015). Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment* 83, 39–49
- Lee A.C.K. and Maheswaran R. (2011): The health benefits of urban green spaces: a review of the evidence. *J. Public Health.* 33: 212–222.
- Le Gourrierec S. (2012) : L'arbre en ville : le paysagiste concepteur face aux contraintes du projet urbain ; 8 Oct 2012 ; mémoire fin d'études ; SCE Nantes ; aménagement et environnement. France
- Leroux L., Congedo L., Bellón B., Gaetano R. et Bégué A. (2018) : Cartographie de l'occupation du sol à partir d'images Sentinel-2 et du plugin Semi Automatic Classification : l'exemple du Nord du Burkina-Faso. Chapitre 4 in Baghdadi N., Mallet C., Zribi M. (2018) : QGIS et applications en agriculture et forêt. Volume 2 de Utilisation de QGIS en télédétection. ISTE Group ; 374 pages.
- Leroyer S. (2006): Simulations numériques de l'atmosphère urbaine avec le modèle SUBMESO : application a la campagne CLU- Escompte sur l'agglomération de Marseille. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.
- Lesnes C. (2021) : Article du journal Le Monde, par Corine Lesnes (San Francisco, correspondante). Publié le 02 juillet 2021 à 05h13 - Mis à jour le 02 juillet 2021 à 14h11. [https://www.lemonde.fr/climat/article/2021/07/02/canicule-historique-au-canada-le-village-aux-49-6-c-detruit-par-un-incendie\\_6086626\\_1652612.html](https://www.lemonde.fr/climat/article/2021/07/02/canicule-historique-au-canada-le-village-aux-49-6-c-detruit-par-un-incendie_6086626_1652612.html) consulté le 18/08/2022.
- Lessard G. et Boulfroy E. (2008) : Les rôles de l'arbre en ville. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Québec, 21 p
- Li H., Zhou Y., Li X., Meng L., Wang X., Wu S. and Sodoudi S. (2018): A new method to quantify surface urban heat island intensity. *Science of the Total Environment* 624 :262–272
- Li J., Song C., Cao L., Zhu F., Meng X. and Wu J. (2011): Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3249-3263.

- Li Y., Liu Y., Ranagalage M., Zhang H. and Zhou R. (2020a): Examining Land Use/Land Cover Change and the Summertime Surface Urban Heat Island Effect in Fast-Growing Greater Hefei, China: Implications for Sustainable Land Development. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 568; doi:10.3390/ijgi9100568
- Li L., Zhou X., Chen L., Chen L., Zhang Y. and Liu Y. (2020b): Estimating Urban Vegetation Biomass from Sentinel-2A Image Data. *Forests* 2020, 11, 125; doi:10.3390/f11020125
- Liebard A. et De Herde A. (2006): *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Editions du moniteur-décembre. 768 pages.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. and Chipman J.W. (2008) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 6th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken. 756 pages.
- Liu R., Sogachev A., Yang X., Liu S., Xu T. and Zhang J. (2020): Investigating microclimate effects in an oasis-desert interaction zone. *Agricultural and Forest Meteorology* 290 :107992.
- Louafi S. (2013) : Impact de la végétation sur la qualité des ambiances thermiques et visuelles dans les espaces publics urbains, thèse de doctorat, université frères Mentouri Constantine. Algérie.
- Louafi S., Abdou S. and Reiter S. (2017): Effect of vegetation cover on thermal and visual comfort of pedestrians in urban spaces in hot and dry climate, *Nature & Technology Journal. Vol. C : Environnemental Sciences*, 17 (2017) 30
- Lu L., Weng Q., Xiao D., Guo H., Li Q. et Hui W. (2020): Spatiotemporal Variation of Surface Urban Heat Islands in Relation to Land Cover Composition and Configuration: A Multi-Scale Case Study of Xi'an, China. *Remote Sens.* 12, 2713; doi:10.3390/rs12172713
- Luttik J. (2000): The Value of Trees, Water and Open Space as Reflected by House Prices in the Netherlands. *Landscape and Urban Planning* 48, 3-4, 161-167.
- Ma L., Wang Y., Liang Z., Ding J., Shen J., Wei F. and Li S. (2021): Changing Effect of Urban Form on the Seasonal and Diurnal Variations of Surface Urban Heat Island Intensities (SUHIIs) in More Than 3000 Cities in China. *Sustainability*, 13, 2877.
- Maaoui M. (2014) : Atlas plantes ornementales des Ziban ; station de bio-ressources el-outaya / Biskra ; Centre de Recherche scientifique et technique sur les régions arides ; Edition : CRSTRA, 2014 ; ISBN : 978-9931-438-02-1.
- Maas J., Verheij RA., Groenewegen PP., Vries S. and Spreeuwenberg P. (2006): Green space, urbanity, and health: how strong is the relation? *J Epidemiol Community Health.* 2006. 60(7) :587-92. doi: 10.1136/jech.2005.043125.
- Madelin M. et Dupuis V. (2020) : Intensité et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives. *Climatologie* 2020, 17, 9

- Maghrabi A., Alyamani A. and Addas A. (2021): Exploring Pattern of Green Spaces (GSs) and Their Impact on Climatic Change Mitigation and Adaptation Strategies: Evidence from a Saudi Arabian City. *Forests* 2021, 12, 629. <https://doi.org/10.3390/f12050629>
- Mahmoud A. H. A. (2011): Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Build. Environ.* 46 (12), 2641-2656.
- Malik M. S., Shukla J. P. and Mishra S. (2019): Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat-8 data in Kandaihimmat Watershed, Hoshangabad, India. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*. Vol. 48 (01), pp. 25-31.
- Manso M. and Castro-Gomes J. (2015): Greenwall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 :863–871
- Marando F., Salvatori E., Sebastiani A., Fusaro L. and Manes F. (2019): Regulating ecosystem services and green infrastructure: Assessment of Urban Heat Island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecological Modelling*, 392, pp. 92–102.
- Marando F., Heris M. P., Zulian G., Udías A., Mentaschi L., Chrysoulakis N., Parastatidis D. et Maes J. (2022): Urban Heat Island Mitigation by green Infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sust. Cities Soc.* 77, 103564. doi:10.1016/j.scs.2021.103564
- Maskooni E. K., Hashemi H., Berndtsson R., Arasteh P. D. and Kazemi M. (2020): Impact of spatiotemporal land-use and landcover changes on surface urban heat islands in a semi-arid region using Landsat data, *International Journal of Digital Earth*, DOI: 10.1080/17538947.2020.1813210
- Matallah M. E., Alkama D., Ahriz A. and Attia, S. (2020): Assessment of the Outdoor Thermal Comfort in Oases Settlements, *Atmosphere*, 11, 185
- Matallah M. E., Ahriz A., Zitouni D. C., Arrar H.F., Ratmia M.A. and Attia S (2023): methodological the passive cooling effect of Oasis palm groves. *Sustainable Cities and Society*, Volume 99, , 104887.
- Mathew M. and Siddhartha (2016): Analysis of Outdoor Thermal Comfort in Warm and Humid Tropical Climate. 2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS). DOI: 10.1109/ICETETS.2016.7603077
- Matzarakis A., Martinelli L. and Ketterer, C. (2016): Relevance of Thermal Indices for the Assessment of the Urban Heat Island. In: Musco, F. (eds) Counteracting Urban Heat Island Effects in a Global Climate Change Scenario. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10425-6_4)
- McDonald R. I., Colbert M., Hamann M., Simkin R. D. and Walsh, B. J. (2018): Nature in the Urban century: A Global Assessment of where and How to Conserve Nature for Biodiversity and Human Wellbeing. [https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/TNC\\_NatureintheUrbanCentury\\_FullReport.pdf](https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/TNC_NatureintheUrbanCentury_FullReport.pdf) consulté le: 10/08/2018.

- Mebarki B., Draoui B., Abdessemed S., Keboucha A., Drici S. et Sahli A. (2012) : Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°3, 465 – 478
- Meerow A.W. and Black R.J. (1993): A Guide to Micro Climate Modification: Enviroscaping to Conserve Energy. (CIR EES43) <http://edis.ifas.ufl.edu/EH143>. Environmental Horticulture Department, University of Florida.
- Meehl G.A. and Tebaldi C. (2004): More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305, 994-997. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1098704>
- Meier F. and Scherer D. (2012): Spatial and temporal variability of urban tree canopy temperature during summer 2010 in Berlin, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(3), 373–384.
- Meili N., Manoli G., Burlando P., Carmeliet J., Chow W. T. L. and Coutts A. M. (2021): Tree Effects on Urban Microclimate : Diurnal, Seasonal, and Climatic Temperature Differences Explained by Separating Radiation, Evapotranspiration, and Roughness Effects. *Urban For. Urban Green.* 58, 126970. doi:10.1016/j.ufug.2020.126970
- Mestayer P.G. and Anquetin S. (1995): Climatology of cities. *Third International Conférence on Air pollution-Air pollution 95- Actes du colloque*: 1-35.
- Mestayer P.G. et Brunet Y. (2015) : Impact de la végétation urbaine sur la qualité de l'air. *Innovations Agronomiques* 45, pp. 35-45.
- Middel A., Brazel A. J., Kaplan S. and Myint S. W. (2012): Daytime cooling efficiency and diurnal energy balance in Phoenix, Arizona, USA. *Clim Res*, 54, 21–34, doi: 10.3354/cr01103
- Middel A., Chhetri N. and Quay R. (2015): Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forestry & Urban Greening* 14 (2015) 178–186
- Mills G. (2006): Progress toward sustainable settlements: A role for urban climatology. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 69-76.
- Mills G. (2008): Luke Howard and the climate of London. *Weather*, 63 (6), 153-157.
- Min M., Zhao H. and Miao C. (2018): Spatio-Temporal Evolution Analysis of the Urban Heat Island: A Case Study of Zhengzhou City, China. *Sustainability*, 10, 1992; doi:10.3390/su10061992
- Miralles D. G., Brutsaert W., Dolman A. J. and Gash J. H. (2020): On the Use of the Term “Evapotranspiration”, *Water Resour. Res.*, 56, e2020WR028055, <https://doi.org/10.1029/2020WR028055>.
- Mirzaei M., Verrelst J., Arbabi M., Shaklabadi Z. and Lotfizadeh M. (2020): Urban Heat Island Monitoring and Impacts on Citizen's General Health Status in Isfahan Metropolis: A

- Remote Sensing and Field Survey Approach. *Remote Sens.*12, 1350; doi:10.3390/rs12081350
- Mohammed A., Pignatta G., Topriska E. and Santamouris M. (2020): Canopy Urban Heat Island and Its Association with Climate Conditions in Dubai, UAE. *Climate*, 8, 81; doi:10.3390/cli8060081
- Mohammed A., Khan A. and Santamouris M. (2021): On the mitigation potential and climatic impact of modified urban albedo on a subtropical desert city. *Building and Environment* 206 :108276
- Mohammad P. and Goswami A. (2021): Quantifying diurnal and seasonal variation of surface urban heat island intensity and its associated determinants across different climatic zones over Indian cities, *GIScience & Remote Sensing*, 58:7, 955-981, DOI:10.1080/15481603.2021.1940739
- Mohan M., Gupta A. and Bhati S. (2014): A Modified Approach to Analyze Thermal Comfort Classification, *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol. 4 No. 1, pp. 7-19. doi: [10.4236/acs.2014.41002](https://doi.org/10.4236/acs.2014.41002).
- Moisa M. B., Gabissa B. T., Hinkosa L. B., Dejene I. N. and Gemedo D. O. (2022): Analysis of land surface temperature using Geospatial technologies in Gida Kiremu, Limu, and Amuru District, Western Ethiopia. *Artificial Intelligence in Agriculture*, Volume 6, Pages 90-99.
- Montanaro M., Gerace A., Lunsford A. and Reuter D. (2014): Stray light artifacts in imagery from the Landsat 8 thermal infrared sensor. *Remote Sens.* 6, 10435–10456.
- Monty J. L. (2006) : Fondation canadienne de l'arbre, Communication à la 7e Conférence canadienne sur la forêt urbaine, les 11-12-13 octobre 2006 à Québec.
- Morakinyo T.E., Lam Y.F. and Hao S. (2016): Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal: Modelling and measurement. *J Environ Manage.* 1;182:595-605. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.077.
- Morakinyo T. E., Ouyang W., Lau K. K. L., Ren C. and Ng E. (2020): Right Tree, Right Place (Urban Canyon): Tree Species Selection Approach for Optimum Urban Heat Mitigation-development and evaluation. *Science of the Total Environment* 719: 137461.
- Mostefa-Kara K., (2008) : *La menace climatique en Algérie et en Afrique*. Hydra (Algérie), Editions Dahlab, 384 pages.
- Moujalled B. (2007) : Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat. Institut des Sciences Appliquées de Lyon. France.
- Munier P. (1973) : *Le palmier dattier. Techniques Agricoles et Productions Tropicales*. Paris Seme, Maisonneuve et Larose, 217.

- Murtagh N., Badi S., Shi Y., Wei S., and Yu W. (2022): Living with air-conditioning: experiences in Dubai, Chongqing and London. *Buildings and Cities*, 3(1), 10–27.
- Musy M. (2008) : Approches physiques des ambiances urbaines caractérisation et conception. Centre de ressources « ENVIROBOITE ». [www.envirobat-med.net](http://www.envirobat-med.net) – [www.ville-amenagement-durable.org](http://www.ville-amenagement-durable.org)
- Musy M. (2014) : *Une ville verte : Les rôles du végétal en ville*. Editions Quae. 200 pages
- Myint S. W., Brazel A., Okin G. and Buyantuyev A. (2010): Combined Effects of Impervious Surface and Vegetation Cover on Air Temperature Variations in a Rapidly Expanding Desert City, *GIScience & Remote Sensing*, 47:3, 301-320.
- Najjar G., Kastendeuch P. et Grussenmeyer P. (2010) : Topographie et climatologie urbaine. *Revue XYZ* • N° 123 – 2e trimestre 2010.
- Nakamura Y. and Oke T.R. (1988): Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon, *Atmospheric Environment*, vol. 22, n°12, pp. 2691-2700.
- Naserikia M., Shamsabadi E. A., Rafieian M. and Filho W. L. (2019): The Urban Heat Island in an Urban Context: A Case Study of Mashhad, Iran. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16, no. 3: 313. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030313>
- Nassar A.K., Blackburn G.A. and Whyatt J.D. (2016): Dynamics and controls of urban heat sink and island phenomena in a desert city: Development of a local climate zone scheme using remotely-sensed inputs. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2016, 51, 76–90.
- Neves Silva Y., Silva H., Silva R. A., Marques E. and Gomes O. O. (2021): Identification of the urban heat islands phenomenon in a small city: the study case of Três Rios/RJ, Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 57(1), 93-104. <https://doi.org/10.5327/Z217694781001>
- Nguyen T. M., Lin T.H. and Chan H.P. (2019): The Environmental Effects of Urban Development in Hanoi, Vietnam from Satellite and Meteorological Observations from 1999–2016. *Sustainability*, 11, 1768; doi:10.3390/su11061768
- Nikolopoulou M. (2004) : Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique. Résultats du projet RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces), Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S).
- Norton B.A., Coutts A.M., Livesley S.J., Harris R.J., Hunter A.M. and Williams N.S. (2015) : Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, pp. 127–138.
- Noui N., Saffeddine D. R. & Harizi, K. (2023): Detecting changes in land occupation and use (between 1984-2021) using "GEE" and GIS tools: focus on the green structure of the future metropolis of Annaba (north-east Algeria). *Indonesian Journal of Social Science Research*, 4(1), 155 – 170. doi: 10.11594/ijssr.04.02.08

- Nouibat B. et Tacherift A. (2007) : L'occupation optimale du sol urbain à l'habitation individuelle dans les régions arides " villes maghrébines et orientales, cas d'étude : Bou-Saada ". *Sciences & Technologie D* – N°25, 50-64
- Nouri H., Borujeni S.C. and Hoekstra A.Y. (2019): The blue water footprint of urban green spaces: An example for Adelaide, Australia, *Landsc. Urban Plan.*, 190, 103613, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103613>.
- Nowak D.J. and Crane D.E. (2002): Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA, *Environmental pollution* 116, pp. 381-389.
- Nowak D.J., Wang J. and Endreny T. (2007): Environmental and Economic Benefits of Preserving Forests within Urban Areas: Air and Water Quality, in: The economic benefits of land conservation. *The Trust for Public Land, de Brun, C.T.F*, pp. 28-47.
- Nuruzzaman Md. (2015): Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*; 3(2): 67-73. doi: 10.11648/j.ijema.20150302.15
- Oke T.R. (1973) City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment*, 17, 769-779
- Oke T. R. (1981): Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology* 1 (3):237–254.
- Oke T. R. (1987): *Boundary Layer Climates*. Routledge, 435 pp.
- Oke T. R. (1988): The Urban Energy Balance. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 12, 471-508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oke T. R. (1997). Urban Climates and Global Environmental Change. In A. Perry, & R. D. Thompson (Eds.), *Applied Climatology: Principles and Practice* (pp. 273-287). Routledge.
- Oke T. R. (2006): Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Instruments and Observing Methods*, Report No. 81, WMO/TDNo. 1250.
- Oke T. R., Mills G., Christen A., and Voogt J. A. (2017): *Urban Climates*. Cambridge University Press, 546 pages.
- Oliveira S., Andrade H., and Vaz T. (2011): The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, 46 (11), 2186-2194.
- Olmos-Trujillo E., Trinidad J. G., Ferreira H. J., Guerrero A. P., Capetillo C. B., Sandoval C. A. and Tejada E. G. (2020): Spatio-Temporal Response of Vegetation Indices to Rainfall and Temperature in A Semiarid Region. *Sustainability*2020, 12, 1939; doi:10.3390/su12051939

- O'Malley C., Piroozfar P., Farr E. R. and Pomponi F. (2015): Urban Heat Island (UHI) mitigating strategies: A case-based comparative analysis. *Sustainable Cities and Society*, 19, 222-235.
- OMM (2018) : Guide des pratiques climatologiques », Organisation météorologique mondiale OMM-N°100 : 174 pages.
- OMS (2018): Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe. 181 pages. Organisation Mondiale de la Santé, [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0008/383921/noiseguidelines-eng.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0008/383921/noiseguidelines-eng.pdf?ua=1) consulté le : 12/01/2021.
- Onishi A., Caob X., Ito T., Shi F. and Imura H. (2010): Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry & Urban Greening* 9 : 323–332
- ONM (2016) : Office national de météorologie, station de Ghardaïa. (Données consultées).
- OPVM (2012) : Guide des sites et monuments historiques de la wilaya de Ghardaïa, (Office de Protection et de Promotion de la Vallée du M'Zab), Ministère de la Culture, Algérie. [http://www.opvm.dz/19\\_Brochures/i\\_p-1](http://www.opvm.dz/19_Brochures/i_p-1)
- Oshio H., Kiyono T. and Asawa T. (2021): Numerical simulation of the nocturnal cooling effect of urban trees considering the leaf area density distribution. *Urban Forestry & Urban Greening*. Volume 66, 127391.
- Oyekola M. A. and Adewuyi G. K. (2018): Unsupervised Classification in Land Cover Types Using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, Volume 7, Issue 72.
- Pacifico F., Harrison SP., Jones SD. and Sitch S. (2009): Isoprene emissions and climate. *Atmos. Environ.* 43 (39): 6121–6135.
- PAG (2020) : Plan d'action du gouvernement pour la mise en œuvre du programme du président de la république. République Algérienne Démocratique et Populaire. <https://www.algerie-eco.com/wp-content/uploads/2020/02/plan-actiongouvernement-fr-6-fev-2020.pdf> consulté le 16 août 2022
- Paradis E. (2022): Probabilistic unsupervised classification for large-scale analysis of spectral imaging data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume 107, 102675.
- Park M., Hagishima A., Tanimoto J. and Narita K. I. (2012): Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: field measurement at a scale model site. *Building and Environment*, 56, 38-46.
- Park J., Kim J.-H., Lee D. K., Park C. Y. and Jeong S. G. (2017). The Influence of Small Green Space Type and Structure at the Street Level on Urban Heat Island Mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 203-212

- Parlow E. (2011): Urban Climate. In *Urban ecology: patterns, processes, and applications*, JariNiemiela, sous la dir. de Jurgen H. Breuste et Thomas Elmqvist, Oxford Biology, 31 44; 374. Great Britain: Oxford University Press.
- Pal S. and Ziaul S. (2017): Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 20 :125–145.
- Parmentier A. (2010) : Élaboration d'un outil d'aide à la décision pour atténuer le phénomène d'îlots de chaleur en milieu urbain. Mémoire en génie de l'environnement. École de technologie supérieure université du Québec. Canada.
- Pascal M., Laaidi K. and Beaudeau P. (2018) : Intérêt des espaces verts et ombragés dans la prévention des impacts sanitaires de la chaleur et de la pollution de l'air en zones urbaines. *Revue forestière française*. Numéro 2-3-4 Spécial forêts et santé publique : 353-364
- Peel M., Finlayson B. and McMahon T. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11:1633–1644.
- Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Otle C., Breon F.-M., Nan H., Zhou L. and Myneni R.B. (2012): Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environ. Sci. Technol.* 46, 696–703.
- Peng L.L. and Jim C.Y. (2013): Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6, 598–618.
- Peng J., Xie P., Liu Y. and Ma J. (2016): Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sens. Environ.* 173, 145–155.
- Peng J., Ma J., Liu Q., Liu Y., Hu Y.n., Li Y. and Yue Y. (2018): Spatial-temporal change of land surface temperature across 285 cities in China: An urban-rural contrast perspective. *Sci. Total Environ.* 635, 487–497.
- Peng X., Wu W., Zheng Y. Sun J., Hu T. and Wang P. (2020): Correlation analysis of land surface temperature and topographic elements in Hangzhou, China. *Sci Rep* 10, 10451. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67423-6>.
- Pérez G., Coma J., Martorell I. and Cabeza L. F. (2014): Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39. 139–165
- Perini K. and Magliocco A. (2014): Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening* 13 (2014) 495–506

- Perreault S. (2014) : Processus d'acquisition de nouvelles connaissances en urbanisme. Le cas de l'îlot de chaleur urbain. Mémoire à l'institut d'urbanisme, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal. Canada.
- Perrineau H. (2013) : Développement d'un outil, basé sur le logiciel de simulations thermiques dynamiques TRNSYS, permettant de réaliser des études paramétriques pour évaluer le confort extérieur avec la température perçue. (Cité dans Benamouma, 2018).
- Petitti D. B., Hondula D. M., Yang S., Harlan S. L. and Chowell G. (2016): Multiple trigger points for quantifying heat-health impacts: New evidence from a hot climate. *Environmental Health Perspectives*, 124(2), 176–183. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409119>
- Petralli M., Massetti L., Brandani G. and Orlandini S. (2014): Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. In: *International Journal of Climatology* 34.4, p. 1236–1244.
- Philipps N., Kastendeuch P. P. et Najjar G. (2020) : Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, 17, 10.
- Phiri D. and Morgenroth J. (2017): Developments in Landsat Land Cover Classification Methods: A Review. *Remote Sensing*, 9, Article No. 967. <https://doi.org/10.3390/rs9090967>
- Pigeon P. (2007) : L'environnement au défi de l'urbanisation, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 189 p.
- Pigeon G., Lemonsu A., Masson V. et Hidalgo J. (2008) : De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville. *La Météorologie - n°62*, pp. 39-47.
- Piragnolo M., Lusiani G. and Pirotti F. (2018) : Comparison of vegetation indices from rps and sentinel-2 imagery for detecting permanent pastures. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3, ISPRS TC III Mid-term Symposium "Developments, Technologies and Applications in Remote Sensing", 7–10 May, Beijing, China
- Piringer M., Grimmond C. S. B., Joffre S. M., Mestayer P., Middleton D. R., Rotach M. W., Baklanov A., De Ridder K., Ferreira J., Guilloteau E., Karppinen A., Martilli A., Masson V., Oke T.R., Tombrou M. (2002): Investigating the surface energy balance in urban areas – recent advances and future needs, *Water, Air and Soil Poll. Focus*, 2, 1–16.
- Piringer M. and Joffre S. (2005): The urban surface energy budget and mixing height in European cities: data, models and challenges for urban meteorology and air quality. (éds.). Final Report of Working Group 2 of Cost-715 Action, 2005, 239 pp.
- PNC (2019) : Plan National Climat, Ministère de l'Environnement, Algérie. <https://www.me.gov.dz/telechargement/plan-national-climat/> consulté le 16 août 2022
- Poitou J. (2013) : Composition atmosphérique et bilan radiatif. *Reflets de la Physique* n° 33, 28-33. Article disponible sur le site <http://www.refletsdelaphysique.fr> ou <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/201333028>

- Potchter O., Yaakov Y., Shashua-Bar L., Cohen S., Tanny J. and Bar-Kutiel P. (2010): The use of urban vegetation as a tool for heat stress mitigation in hot and arid regions, case study: Beer Sheva Israel. *City Weather: Meteorology and Urban Design* 2010, pp. 1-13
- Potchter O. and Ben-Shalom I. H. (2013): Urban warming and global warming: combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel. *J. Arid Environ.* 98, pp. 113–122.
- Poulin P., Levasseur M.-E. and Huppe V. (2016) : Mesures d’adaptation pour une saine qualité de l’air intérieur dans un contexte de changements climatiques : revue de littérature. Institut national de sante publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/publications/2194>
- Pramanik S. and Punia M. (2019): Assessment of green space cooling effects in dense urban landscape: a case study of Delhi, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3), 867-884. doi:10.1007/s40808-019-00573-3
- PreparedBC (2021) : Guide de préparation en cas de chaleur extrême. Document de la province de la Colombie-Britannique. [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/public-safety-and-emergency-services/emergency-preparedness-response-recovery/embc/preparedbc/preparedbc-guides/translations/preparedbc\\_extreme\\_heat\\_guide\\_fr.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/public-safety-and-emergency-services/emergency-preparedness-response-recovery/embc/preparedbc/preparedbc-guides/translations/preparedbc_extreme_heat_guide_fr.pdf). consulté le 18/08/2022
- 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*, 2013, 3, 372-384
- Qiao Z., Liu L., Qin Y., Xu X., Wang B. and Liu Z. (2020): The Impact of Urban Renewal on Land Surface Temperature Changes: A Case Study in the Main City of Guangzhou, China. *Remote Sens.* 12, 794; doi:10.3390/rs12050794
- Qin Y. (2015): A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445-459.
- Qin Z. and Li Z. D. (2019): A review on the driving mechanisms of cooling and humidifying effects of urban green space. *For. Ecol. Sci.* 34(02), 121–126. <https://doi.org/10.13320/j.cnki.hjfor.2019.0020>.
- Radhi H., Sharples S. (2013): Quantifying the domestic electricity consumption for air-conditioning due to urban heat islands in hot arid regions. *Applied energy*, 112, 371-380
- Rahman M.A., Stratopoulos L.M.F., Moser-Reischl A., Zölch T., Häberle K.H. and Rötzer T. (2020): Traits of Trees for Cooling Urban Heat Islands: A Meta-Analysis. *Building Environ.* 170, 106606. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106606
- Raiyani K., Gonçalves T., Rato L., Salgueiro P., Silva J.R. M. (2021): Sentinel-2 Image Scene Classification: A Comparison between Sen2Cor and a Machine Learning Approach. *Remote Sens.* 13, 300. <https://doi.org/10.3390/rs13020300>

- Rajeshwari A. and Mani N.D. (2014): Estimation of Land Surface Temperature of Dindigul District Using Landsat 8 Data. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3, 2319-1163.
- Rasul A., Balzter H. and Smith C. (2015): Spatial variation of the daytime surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. *Urban Climate*, 14 (Part 2), 176–186.
- Rasul A., Balzter H. and Smith C. (2016): Diurnal and seasonal variation of surface urban cool and heat islands in the semi-arid city of Erbil, Iraq. *Climate*, 4, 42.
- Rasul A., Balzter H., Smith C., Remedios J., Adamu B., Sobrino J.A., Srivani M. and Weng Q. A (2017): Review on Remote Sensing of Urban Heat and Cool Islands. *Land*, 6, 38. <https://doi.org/10.3390/land6020038>
- Ravereau A. (1981) : *Le Mzab, une leçon d'architecture*. Paris, Sindbad. 282 p.
- Ravereau A., Baudouï R., Potié P., Cussey Y. and Perraudin R. L. (2003) *L'atelier du désert*. Parenthèses. ed. Marseille, France. 192 p.
- Raymond C., Matthews T. and Horton R.M. (2020): The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances* 6, eaaw1838.
- Razzaghmanesh M., Beecham S. and Salemi T. (2016): The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 15, 89–102. doi:10.1016/j.ufug.2015.11.013
- Redon E. (2017) : Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique. Climatologie. Thèse de DOCTORAT, Université Paul Sabatier - Toulouse III. France.
- Reiter S. (2007) : Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception d'ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes, thèse de doctorat, UCL Université catholique de Louvain. Belgique.
- Reis C. and Lopes A. (2019): Evaluating the Cooling Potential of Urban Green Spaces to Tackle Urban Climate Change in Lisbon. *Sustainability*, 11, 2480; doi:10.3390/su11092480
- Reisi M., Nadoushan M. A. and Aye L. (2019): Remote sensing for urban heat and cool islands evaluation in semi-arid areas. *Global J. Environ. Sci. Manage.* 5(3): 319-330. DOI: 10.22034/gjesm.2019.03.05
- Remini B. (2018) : Les foggaras de l'oasis de Ghardaïa (Algérie) : le partage des eaux de crues. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°36, Dec 2018, pp. 157-178
- Ren Z., He X., Zheng H., Zhang D., Yu X., Shen G. and Guo R. (2013): Estimation of the Relationship between Urban Park Characteristics and Park Cool Island Intensity by Remote Sensing Data and Field Measurement. *Forests*, 4, 868-886; doi:10.3390/f4040868

- Renard F., Soto D. and Alonso L. (2015) : Identification et répartition spatiale des personnes vulnérables à la chaleur dans la Métropole de Lyon. SFSE Congress "Climate change and health: what risks? What remedies ? Novembre, 2015, Hôtel de ville de Paris.
- Richards D. R., Fung T. K., Belcher R. N. and Edwards P. J. (2020): Differential Air Temperature Cooling Performance of Urban Vegetation Types in the tropics. *Urban Forestry & Urban Greening* 50: 126651. doi:10.1016/j.ufug.2020.126651.
- Ringenbach N. (2004) : Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg. Thèse: climatologie et temps, Strasbourg I, France. 167 p.
- Rinner C. and Hussain M. (2011): Toronto's Urban Heat Island—Exploring the Relationship between Land Use and Surface Temperature. *Remote Sensing*, 3(6), 1251-1265.
- Riou C. (1990) : Bioclimatologie des oasis. In Dollé V. (ed.), Toutain G. (ed.). Les systèmes agricoles oasiens. Montpellier : CIHEAM, Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens ; n. 11, pages 207-220
- Rizwan A. M., Dennis Y.C. L. and Liu C. (2008): A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of Environment Science*, 20 (1), 120-128. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4).
- Robin M. (1995) : La télédétection. Des satellites aux systèmes d'information géographiques. Nathan Université. Coll. Fac géographie, 320 pages.
- Rosenfeld A H, Akbari H, Bretz S, Fishman B L, Kurn D M, Sailor D and Taha H. (1995): Mitigation of urban heat island materials unity programs, and updates, *Energy and Building*, 22: 255-265.
- Rosheidat A., Bryan H. et Hoffman D. (2008): Visualizing Pedestrian Comfort in a Hot Arid Urban Environment Using ENVI-met, SIMBUILD2008, *International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*. University of California, Berkeley.
- Roth M. (2000): Review of atmospheric turbulence over cities. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 941–990.
- Roth M., (2007): Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *Int. J. Climatol.* 27, 1859-1873.
- Rougier S. (2016) : Apport des images satellites à Très Haute Résolution Spatiale couplées à des données géographiques multi-sources pour l'analyse des espaces urbains. Thèse de doctorat. Université de Strasbourg. France.
- Ruiz M.A. et Correa E.N. (2015a) : Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate. *Building and Environment* 2015; 85: 40-51.

- Ruiz M.A. et Correa E.N. (2015b): Suitability of different comfort indices for the prediction of thermal conditions in tree-covered outdoor spaces in arid cities. *Theor Appl Climatol* 122:69–83 DOI 10.1007/s00704-014-1279-8
- Runnalls K. E. and Oke T. R. (2000). Dynamics and controls of the near-surface heat Island of Vancouver, British Colombia. *Physical Geography*, 21(4), 283-304.
- Rusdayanti N., Karuniasa M. and Nasrullah N. (2021): Thermal comfort assessment over the past two decades in different landscape areas within Palembang City. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 724 (2021) 012010.
- Saaroni H., Bitan A., Dor E.B. and Feller N. (2004): The mixed results concerning the ‘oasis effect’ in a rural settlement in the Negev Desert, Israel. *Journal of Arid Environments* 58, (235–248).
- Saaroni H., Amorim J. H., Hiemstra J. A. and Pearlmutter D. (2018): Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Clim.* 24, 94–110.
- Sadeghian M. M. and Vardanyan Z. (2013): The Benefits of Urban Parks, a Review of Urban Research. *Journal of Novel Applied Sciences*, 2013-2-8/231-237.
- Saha P., Bandopadhyay S., Kumar C. and Mitra C. (2020): Multi-approach synergic investigation between land surface temperature and land-use land-cover. *J. Earth Syst. Sci.* 129 74
- Sahnoune S., Benhassine N., Bourbia F. and Hadbaoui H. (2021): Quantifying the effect of green-roof and urban green infrastructure ratio on urban heat island mitigation-semi-arid climate. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 13(1), 199-224.doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v13i1.12>
- Saher R., Stephen H. and Ahmad S. (2021): Urban evapotranspiration of green spaces in arid regions through two established approaches: a review of key drivers, advancements, limitations, and potential opportunities, *Urban Water Journal*, 18:2, 115-127, DOI: [10.1080/1573062X.2020.1857796](https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1857796)
- Saini V. and Tiwari R. K. (2017): Effect of urbanization on land surface temperature and ndvi: a case study of Dehradun, India. 38th Asian Conference on Remote Sensing, New Delhi.
- Salakkham E. and Piyatadsananon P. (2020): The Optimum Method for Urban Land Surface Temperature Estimation. *Preprints*, 2020090664. [doi.org/10.20944/preprints202009.0664.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202009.0664.v1)
- Samah H.A., Tiwari G. and Noughblega Y. (2020): Cool and green roofs as techniques to overcome heating in building and its surroundings under warm climate. *Int Energy J* 20(3)
- Sanecharoen W., Nakhapakorn K., Mutchimwong A., Jirakajohnkool S. and Onchang R. (2019): Assessment of Urban Heat Island Patterns in Bangkok Metropolitan Area Using Time-Series of LANDSAT Thermal Infrared Data. *Environ. Nat. Resour. J.*, 17, 87–102.

Santamouris M. (2005). *Energy Rating of Residential Buildings*, Earthscan, London. 192 pages.

Santamouris M., Gaitani N., Spanou A., Saliari M., Giannopoulou K., Vasilakopoulou K. and Kardomateas T., (2012). Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas - Design realization and results of the flisvos project. *Building and Environment*, 53,128-136

Santamouris M. (2013). *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. New York, N.Y.: Routledge. 410 Pages.

Santamouris M. (2014): Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. doi:10.1016/j.solener.2012.07.003

Satterthwaite D. (2009): The implications of population growth and urbanization for climate change. *Environ. Urban*. 21, 545–567.

Saudreau M., Kastendeuch P., Ngao J., Najjar G. et Améglio T. (2015) : Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert. *Innovations Agronomiques* 45, 23-34

Säumel I, Kowarik I and Butenschön S. (2010): Green traces from past to future: the interplay of culture and ecological processes in European historical parks. *Acta Horticult.*, 881 : 933-938. DOI : <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.881.156>

Schalau J. (2018): Designing a Windbreak, Agent, Agriculture & Natural Resources University of Arizona Cooperative Extension.  
<https://cales.arizona.edu/yavapai/anr/hort/byg/archive/windbreaks2018.html>

Page vistée le 02/03/2024

Sebti M., Alkama DJ. and Bouchair A. (2013): Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement ‘Ksar’ of Ouargla in southern Algeria. *Frontiers of Architectural Research* 2, pp. 322–337.

Seguin B. (2010) : Le changement climatique : conséquences pour les végétaux », *Quaderni*, 71 | 27-40.

Sekertekin A. and Bonafoni S. (2020): Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation. *Remote Sensing*, 12(2), 294.

Shahmohammad M., Hosseinzadeh M., Dvorak B., Bordbar F., Shahmohammadmirab H. and Aghamohammadi N. (2022): Sustainable green roofs: a comprehensive review of influential factors. *Environmental Science and Pollution Research* 29:78228–78254.

- Sharifi E. and Ali Soltani A. (2017): Patterns of Urban Heat Island Effect in Adelaide: A Mobile Traverse Experiment. *Modern Applied Science*; Vol. 11, No. 4; 2017 ISSN 1913-1844 E-ISSN 1913-1852.
- Shashua-Bar L., Pearlmutter D. and Erell E. (2009): The Cooling Efficiency of Urban Landscape Strategies in a Hot Dry Climate, *Landscape and Urban Planning*, 92, 3-4:179-186.
- Shashua-Bar L. and Hoffman M. (2000): Vegetation as a Climatic Component in the Design of an Urban Street: An Empirical Model for Predicting the Cooling Effect of Urban Green Areas with Trees. *Energy and Buildings*, 31, 221-235.
- Shashua-Bar L., Tsiros I. X. and Hoffman M. (2012): Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a mediterranean climate (Athens) under hot summer conditions. *Building and Environment*, 57, 110-119.
- Shepherd J. M.; Andersen T., Strother C. Horst A., Bounoua L. and Mitra C. (2013): Urban climate archipelagos: a new framework for urban impacts on climate. *Earthzine*. <https://earthzine.org/urban-climate-archipelagos-a-new-framework-for-urban-impacts-on-climate/> Consulté le : 22/05/2020.
- Simpson J.R. and McPherson E.G (1997): The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy and Buildings* 25(2), 127-137, 1997.
- Singh M. H. (2007). Soil Organic Carbon Pools in Turfgrass Systems of Ohio. Rapport de master, Environment Science Graduate Program. The Ohio State University, 141 p.
- Skoulika F., Santamouris M., Kolokotsa D. and Boemi N. (2014): On the thermal characteristics and the mitigation potential of a medium size urban park in Athens, Greece. *Landsc. Urban Plann.* 123, 73-86.
- Soudoudi S., Zhang H., Chi X., Müller F. and Li H. (2018): The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening* 34 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.06.002>
- Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C. and Paolini L. (2004): Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM5. *Remote Sensing of Environment*, 90, 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Sobrino J.A., Oltra-Carrión R., Soria G., Jiménez-Muñoz J. C., Franch B., Hidalgo V., Mattar C., Julien Y., Cuenca J., Romaguera M., Gómez J. A., De Miguel E., Bianchi R., and Paganini M. (2013): Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, Nos. 9–10, 3177–3192, <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
- Sobrino J.A. and Irakulis I. A. (2020): Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. *Remote Sens.* 12, 2052. <https://doi.org/10.3390/rs12122052>

- Sofer M. and Potchter O. (2006): The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 85, pp. 81–88.
- Smith K. R. and Roebber P. J. (2011): Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), 507-522.
- Song C., Woodcock C. E., Seto K. C., Lenney M. P. and Macomber S. A. (2001): Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *REMOTE SENS. ENVIRON.* 75:230–244.
- Souch C, and Grimmond S. (2006): Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, Vol. 30 (2), pp. 270–279.
- Souch C.A. and Souch C. (1993): The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana. *Journal of Arboriculture* 19(5):303–312
- Soudani K. (2005) : Introduction générale à la télédétection. Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux. Université Paris Sud XI. [http://www.ese.u-psud.fr/IMG/pdf/doc\\_cours\\_teledec.pdf](http://www.ese.u-psud.fr/IMG/pdf/doc_cours_teledec.pdf)
- Spagnolo J. and de Dear R. J. (2003): A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical, Sydney Australia. *Build. Environ.* 38, 721-738.
- Spangler K. R., Liang S. and Wellenius G. A. (2022): Wet-Bulb Globe Temperature, Universal Thermal Climate Index, and Other Heat Metrics for US Counties, 2000–2020. *Scientific Data* | 9:326 | <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01405-3>.
- Spronken-Smith R. A. and Oke T. R. (1998): The Thermal Regime of Urban Parks in Two Cities With Different Summer Climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2085-2104.
- Stewart I. et Mills G. (2021): *The Urban Heat Island*. Elsevier 1st Edition, 182 pages.
- Streiling S. and Matzarakis A. (2003): Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study. *J. Arboriculture* 29, 309-316.
- Sugawara H, Shimizu S, Takahashi H., Hagiwara S., Narita K., Mikami T. and Hirano T. (2016) : Thermal influence of a large green space on a hot urban environment. *Journal of Environmental Quality*, 45(1): 125–133. doi: 10.2134/jeq2015.01.0049
- Sulaiman F. C., Hasan R. and Jamaluddin E. R. (2016): The Mature Trees in Recreation Areas and Its Role in Enhancing Quality of Life. In: *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 234, p. 289–298.
- Sung C. Y. (2013): Mitigating surface urban heat island by a tree protection policy: A case study of the woodland, Texas, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4), 474-480.
- Susca T., Gaffin S. and Dell'Osso G. (2011): Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2119–2126. doi: 10.1016/j.envpol.2011.03.007

Suszanowicz D. and Wiecek A. K. (2019): The Impact of Green Roofs on the Parameters of the Environment in Urban Areas-Review. *Atmosphere*, 10, 792; doi:10.3390/atmos10120792

Synnefa A., Santamouris M. and Akbari H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Journal of Energy and Buildings* 39, 1167–1174.

Tabet-Aoul M., (2008) : Impacts du changement climatique sur les agricultures et les ressources hydriques au Maghreb. Les notes d’alerte du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes. *Option Méditerranéennes* (CIHEAM), N° 48, pp.6.

Tadeu A., Škerget L., Almeida J. and Simoes N. (2021): Canopy contribution to the energy balance of a building’s roof. *Energy Build* 244:111000.

Taha H., Akbari H., Rosenfeld A. and Huang J. (1988): Residential cooling loads and the urban heat island: the effects of albedo, *Build. Environ.*, 23 (4) 271–283.

Taha H., Akbari H., Sailor D. and Ritschard R. (1992): Causes and Effects of Heat Islands: Sensitivity to Surface Parameters and Anthropogenic Heating, Lawrence Berkeley Laboratory Report No. 29864.

Taha H. (1994): Analysis of Energy Efficiency of Air Quality in the South Coast Air Basin- Phase II. Lawrence Berkeley National Laboratory Report N°. LBL-35728, Berkeley, CA,,: Ch6:161-218.

Taha H. (1997): Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*. vol.25, n°2, p. 99-103.

Taha H. and Bornstein R. (1999). Urbanization of meteorological models and implications on simulated heat islands and air quality. Proc. Int. Conf. on Urban Climatology (ICB-ICUC '99), Sydney, Australia, Macquarie University, 431–435.

Taha H. (2017): Characterization of Urban Heat and Exacerbation: Development of a Heat Island Index for California. *Climate* 2017, 5, 59; doi:10.3390/cli5030059

Tahbaz M. (2011): Psychrometric Chart as a Basis for Outdoor Thermal Analysis. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, vol. 21, no. 2, pp. 95-109.

Taleb D. and Abu-Hijleh B. (2013): Urban heat islands: potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. *Renewable Energy*, 50, 747-762.

Taleb H. and Taleb D. (2014): Enhancing the thermal comfort on urban level in a desert area: Case study of Dubai, United Arab Emirates. *Urban forestry & urban greening*, 13(2), 253-260.

- Taleghani M., Kleerekoper L., Tenpierik M. and Dobbelsteen A.V. (2015): Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Build Environ* 83:65–78.
- Tan C. L., Wong N. H., Tan P. Y., Jusuf S. K. and Chiam Z. Q. (2015): Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment. *Build. Environ.* 94, 206–217.
- Tan Z., Lau K. K. L. and Ng E. (2016): Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, 114, 265–274.
- Tan X., Liao J., Bedra K. B. and Li J. (2022): Evaluating the 3D cooling performances of different vegetation combinations in the urban area, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21:3, 1124-1136, DOI: 10.1080/13467581.2021.1903905
- Taslim S., Parapari D. M. and Shafaghat A. (2015): Urban Design Guidelines to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects In Hot-Dry Cities. *Jurnal Teknologi*, 74(4).
- Tébourbi R. (2009): SIG – Télédétection. Cours Télédétection. [https://www.academia.edu/3748544/Cours\\_Télédétection](https://www.academia.edu/3748544/Cours_Télédétection). Consulté le: 12/06/2021.
- Tempa K. and Aryal K.R. (2022): Semi-automatic classification for rapid delineation of the geohazard-prone areas using Sentinel-2 satellite imagery. *SN Appl. Sci.* 4, 141. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05028-6>.
- Tewari M., Yang J., Kusaka H., Salamanca F., Watson C. and Treinish L. (2019): Interaction of urban heat islands and heat waves under current and future climate conditions and their mitigation using green and cool roofs in New York City and Phoenix, Arizona. *Environ. Res. Lett.* 14 (2019) 034002 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf431>
- Thenkabail P. (2016): Remote Sensing Handbook Volume 1: Remotely Sensed Data Characterized, Classification and Accuracies. Taylor & Francis Group, London.
- Thom E., (1959): The discomfort index. *Weatherwise*, 12, 57-60.
- Tolba M. (2014): "Wind Catchers" A Perfect Example of Sustainable Architecture in Egypt. *International Journal of Current Engineering and Technology* Vol.4, No.1. E-ISSN 2277 – 4106, P-ISSN 2347 – 5161
- Torkia A. (2021) : Evaluation qualitative de l'impact de la tour à vent pour une ventilation naturelle et un rafraichissement passif dans les régions chaudes arides et semi arides cas des wilayas Oued Souf et Biskra. Doctoral thesis, Université Mohamed Khider, Biskra. Algérie.
- Toy S. and Yilmaz S. (2010): Evaluation of urban-rural bioclimatic comfort differences over a ten-year period in the sample of Erzincan city reconstructed after a heavy earthquake. *Atmósfera* 23(4), 387-402

Tremeac B., Bousquet P., de Munck C., Pigeon G., Masson V., Marchadier C., Merchat M., Poeuf P. and Meunier F. (2012) : Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy* 95, 102–110.

Trotter L., Dewan A. and Robinson T. (2017): Effects of rapid urbanization on the urban thermal environment between 1990 and 2011 in Dhaka Megacity, Bangladesh. *AIMS Environmental Science*, 4(1): 145-167. DOI: 10.3934/environsci.2017.1.145

Tursilowati L. (2007): Use of remote sensing and GIS to compute temperature humidity index as human comfort indicator relate with land use-land cover change (LULC) in Surabaya. *The 73rd International Symposium on Sustainable Humanosphere 2007*.

Twumasi Y. A., Merem E. C., Namwamba J. B et al., (2021): Estimation of Land Surface Temperature from Landsat-8 OLI Thermal Infrared Satellite Data. A Comparative Analysis of Two Cities in Ghana. *Advances in Remote Sensing*, 10, 131-149

Uemoto K. L., Satoand N.M.N., John V.M., Estimating thermal performance of cool colored paints, *Energy Build.*, 42 (1) (2010) 17–22.

Ulpiani G. (2021): On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. Review. *Science of the Total Environment* 751, 141727.

UN-Habitat (2022) : World Cities Report 2022, United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). [https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr\\_2022.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf)

USEPA (2008): United States Environmental Protection Agency Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Consulté à l'adresse <http://www.epa.gov/heatisland/resources/compendium.htm>

USGS (2019): Landsat 8 (L8), Data Users Handbook, Department of the Interior U.S. Geological Survey, LSDS-1574, Version 5.0. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.

Van den Bosch M. and Nieuwenhuijsen M. (2017): No time to lose - Green the cities now. *Environment International*, 99, 343–350.

Veerkamp C. J., Schipper A. M., Hedlund K., Lazarova T., Nordin A. and Hanson H. I. (2021): A Review of Studies Assessing Ecosystem Services provided by Urban green and Blue Infrastructure. *Ecosystem Serv.* 52, 101367. doi:10.1016/j.ecoser.2021.101367

Venhari A. A., Tenpierik M. and Hakak A. M. (2017): Heat mitigation by greening the cities, a review study. *Environment, Earth and Ecology* Vol. 1 No. 1, 5-32. DOI: 10.24051/eee/67281

Venhari A.A., Tenpierik M., Taleghani M. (2019): The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *J. Arid Environ.*, 166, pp. 68–76.

Vergriete Y. et Labrecque M. (2007) : Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de la littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais.

Rapport d'étape destiné au Conseil régional de l'environnement de Montréal. Université de Montréal. Canada.

Viatte P. (2002) : Les plantations d'arbres en ville : Le long des rues et sur les places. Certu. Cité in : Le Gourrierec Stéphane (2012).

Victorero F., Vera S., Bustamante W., Tori F., Bonilla C., Gironás J. and Rojas V. (2015): Experimental study of the thermal performance of living walls under semiarid climatic conditions. *Energy Procedia*, 78, 3416–3421.

Vinet J. (2000) : Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France.

Vidrih B. and Medved S. (2013): Multiparametric model of urban park cooling island. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(2), 220-229.

Vigneau J.P. (2005) : *Climatologie*. Edition Armand Colin, Collection Campus : 200 p.

Voogt J.A. and Oke T.R. (2003): Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.*, 86, 370–384.

Voogt J.A. (2007). How Researchers Measure Urban Heat Islands. In EPA. *United States Environmental protection Agency*. [https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-07/documents/epa\\_how\\_to\\_measure\\_a\\_uhi.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-07/documents/epa_how_to_measure_a_uhi.pdf) (Page consultée le 14/08/2022).

Vujovic S., Haddad B., Karaky H., Sebaibi N. and Boutouil M. (2021): Urban Heat Island: Causes, Consequences, and Mitigation Measures with Emphasis on Reflective and Permeable Pavements. *CivilEng* 2021, 2, 459–484. <https://doi.org/10.3390/civileng2020026>

Vysoudi M. (2015): Urban space and climate: Introduction to the Special Issue. *Moravian Geographical Reports*, 23(3): 2–7. DOI: 10.1515/mgr-2015-0012.

Wafdan L. (2021): Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Data from Sentinel-2 & ASTER Imagery Interpretation using Unsupervised Classification Algorithm. *PROC. INTERNAT. CONF. SCI. ENGIN.* Volume 4, 229-234.

Wahl S., Siegerstetter C., Tebani M., Dahlab F. et Bouilouta S., Dali Yahia L. (2018) : Analyse de Risque et de Vulnérabilité au Changement Climatique en Algérie. Rapport de synthèse. Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables (MEER). Editeur : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) Algérie. [https://www.researchgate.net/publication/330933385\\_Analyse\\_de\\_Risque\\_et\\_de\\_Vulnerabilite\\_au\\_Changement\\_Climatique\\_en\\_Algerie](https://www.researchgate.net/publication/330933385_Analyse_de_Risque_et_de_Vulnerabilite_au_Changement_Climatique_en_Algerie) consulté le 16/08/2022.

Wang J. (2012): Research on Temperature and Humidity of Urban Green Space Plant Communities in Summer, in College of Horticulture and Landscape Architecture; Southwest University: Chongqing, China, p. 32.

- Wang J., Huang B., Fu D. and Atkinson P.M. (2015): Spatiotemporal variation in surface urban heat island intensity and associated determinants across major Chinese Cities. *Remote Sens.* 7, 3670–3689.
- Wang Y., Zhang Y., Ding N., Qin K. and Yang X. (2020): Simulating the impact of urban surface evapotranspiration on the urban heat island effect using the modified RS-PM model: A case study of Xuzhou, China, *Remote Sens.*, 12, 578, <https://doi.org/10.3390/rs12030578>.
- Wanniarachchi S. and Sarukkalige R. (2022): A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future. *Hydrology*, 9, 123. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>
- Warner T. T. (2009): *Desert Meteorology*. Cambridge University Press, 620 pp.
- Wehner M.F., Stone D., Krishnan H.P., AchutaRao K. and Castillo F., (2016): The Deadly Combination of Heat and Humidity in India and Pakistan in Summer 2015. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, S81–S86,
- Wemegah C.S., Yamba E.I., Aryee J.N.A., Sam F. and Amekudzi L.K. (2020): Assessment of urban heat island warming in the greater Accra region. *Sci. African* 8, e00426.
- 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(4), 335–344. doi:10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007
- Westendorff V. E. (2020): Role of trees in mitigating urban heat island in Charlotte, North Carolina, USA. *Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 245
- Wheeler S. M., Abunnasr Y., Dialesandro J., Assaf E., Agopian S. and Gamberini V. C. (2019): Mitigating Urban Heating in Dryland Cities: A Literature Review. *Journal of Planning Literature*, Vol. 34(4) 434-446.
- Willemen L. (2020): It's about Time: Advancing Spatial Analyses of Ecosystem Services and Their Application. *Ecosystem Serv.* 44, 101125. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101125
- Winansih E., Antariksa A., Surjono S. and Leksono A.S. (2015): Thermal comfort at the street corridor around public places, case study Alun-alun Malang. *Journal of Islamic Architecture* Volume 3 Issue 4 December 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18860/jia.v3i4.3102>
- Wong N.H., Tan C.L. and Kolokotsa D.D. (2021): Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. Reviews. *Nat Rev Earth Environ* 2, 166–181 <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00129-5>
- Wu F., Li S., Liu J. (2017): Research on the relationship between urban green spaces of different areas and the temperature and humidity benefit. *Chin. Landsc. Archit.*, 23, 71–74.

- Wu Z. et Zhang Y. (2018): Spatial Variation of Urban Thermal Environment and Its Relation to Green Space Patterns: Implication to Sustainable Landscape Planning. *Sustainability*, 10, 2249; doi:10.3390/su10072249
- Xiao X., Zhang L., Xiong Y., Jiang J. and Xu A. (2022): Influence of spatial characteristics of green spaces on microclimate in Suzhou Industrial Park of China. *Scientific Reports* | (2022) 12:9121 | <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13108-1>
- Xue F. and Li X. (2017): The impact of roadside trees on traffic released PM 10 in urban street canyon: Aerodynamic and deposition effects. In : *Sustainable Cities and Society* 30, p. 195–204.
- Yamamoto Y. (2006): Measures to mitigate urban heat islands. *Quarterly Review*, Vol. 18, pp. 65-83.
- Yang H. S. (2013): Outdoor noise control by natural/sustainable materials in urban areas. In: T.U. Sheffield (Ed.). School of Architecture. The University of Sheffield, UK.
- Yang L., Qian F., Song D. et Zheng K. (2016): Research on Urban Heat-island Effect. 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island (UHI). *Procedia Engineering* 169 : 11 – 18
- Yang H., Xi C., Zhao X., Mao P., Wang Z., Shi Y., He T. and Li Z. (2020): Measuring the Urban Land Surface Temperature Variations Under Zhengzhou City Expansion Using Landsat-Like Data. *Remote Sensing* 12, no. 5: 801. <https://doi.org/10.3390/rs12050801>
- Yang J., Yang Y., Sun D., Jin C. and Xiao X. (2021): Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society* 72 :103045.
- Yang Y., Zhou D., Wang Y., Meng X., Gu Z., Xu D. and Han X. (2022): Planning method of centralized greening in high-rise residential blocks based on improvement of thermal comfort in summer. *Sustainable Cities and Society* 80 :103802.
- Yasmeen S. and Liu H. (2019): Evaluation of thermal comfort and heat stress indices in different countries and regions – A Review. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 609 (2019) 052037. Doi :10.1088/1757-899X/609/5/052037.
- Yin J., Wu X., Shen M., Zhang X., Zhu C., Xiang H., Shi C., Guo Z. and Li C. (2019): Impact of urban greenspace spatial pattern on land surface temperature: a case study in Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecol.* [https://doi.org/10.1007/s10980-019-00932-6\(0123456789\)](https://doi.org/10.1007/s10980-019-00932-6(0123456789)).
- Yingbai X., Zhun Y. and Xianliang Y. (2005): The evaluation on indoor thermal comfort index. The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 27-29 September 2005 (SB05Tokyo). 1569-1574.
- Yoshino M. (1990-1991): Development of urban climatology and problems today. *Energy and buildings*, vol.15, p. 1-10.

- Young N. E., Anderson R. S., Chignell S. M., Vorster A. G., Lawrence R. and Evangelista P. H. (2017): A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), pp. 920–932
- Yousefi S., Mirzaee S., Almohamad H., Al Dughairi A.A., Gomez C., Siamian N., Alrasheedi M. and Abdo H.G. (2022): Image Classification and Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Imagery: Optimization of SVM Parameters. *Land*, 11, 993. <https://doi.org/10.3390/land11070993>
- Yuvaraj R. M. (2020): Extents of Predictors for Land Surface Temperature Using Multiple Regression Model. *Hindawi The Scientific World Journal* Volume 2020, Article ID 3958589, 10 pages <https://doi.org/10.1155/2020/3958589>.
- Zaeemdar S. and Baycan T. (2017): Analysis of the Relationship between Urban Heat Island and Land Cover in Istanbul through Landsat 8 OLI. *J Earth Sci Clim Change*, Vol 8(11)
- Zaffran J. (1998) : Initiation à la Biologie Végétale, Ellipses. 160 pages.
- Zhang F., Tiyp T., Kung H. and Johnson V.C., Maimaitiyiming M., Zhou M., Wang J. (2016): Dynamics of land surface temperature (LST) in response to land use and land cover (LULC) changes in the Weigan and Kuqa river oasis, Xinjiang, China. *Arabian J. Geosci.* 9, 499.
- Zhang M., Luo G., Cai P. and Hamdi R. (2020): Effects on Local Temperature and Energy of Oasis City Expansion in Arid Area of Northwest China. *Hindawi, Journal of Sensors*: Volume 2020, Article ID 3282475, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/3282475>
- Zhang H. et Wang L. (2021): Analysis of the variation in potential evapotranspiration and surface wet conditions in the Hancang River Basin, China. *Sci Rep* 11, 8607. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88162-2>
- Zhang M., Dong S., Cheng H. and Li F. (2021): Spatio-temporal evolution of urban thermal environment and its driving factors: Case study of Nanjing, China. *PLoS ONE* 16(5): e0246011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246011>
- Zhao L., Oppenheimer M., Qing Z., Baldwin J. W., Ebi K. L, Bou-Zeid E., Guan K. and Liu X. (2018): Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13 (3).
- Zheng Q., Hao L., Huang X., Sun L. and Sun G. (2020): Effects of urbanization on watershed evapotranspiration and its components in southern China, *Water*, 12, 645, <https://doi.org/10.3390/w12030645>..
- Zhou D., Zhao S., Liu S., Zhang L. and Zhu C. (2014): Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sens. Environ.* 152, 51–61.
- Zhou D., Zhang L., Li D., Huang D. and Zhu C. (2016): Climate-vegetation control on the diurnal and seasonal variations of surface urban heat islands in China. *Environ. Res. Lett.* 11.

Zhou L.W., Wang Q., Li Y., Liu M. and Wang R.Z. (2018): Green roof simulation with a seasonally variable leaf area index. *Energy and Buildings* 174:156–167.

Zhou D., Xiao J., Bonafoni S., Berger C., Deilami K., Zhou Y., Froking S., Yao R., Qiao Z. and Sobrino J.A. (2019a): Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sens.* 11, 48; doi:10.3390/rs11010048

Zhou X, Li L, Chen L, Liu Y, Cui Y, Zhang Y, Zhang T. (2019b): Discriminating Urban Forest Types from Sentinel-2A Image Data through Linear Spectral Mixture Analysis: A Case Study of Xuzhou, East China. *Forests.*; 10(6):478. <https://doi.org/10.3390/f10060478>

Zhou B., Kaplan S., Peeters A., Kloog I. and Erell E. (2020): “Surface,” “satellite” or “simulation”: Mapping intra-urban microclimate variability in a desert city. *Int J Climatol.* 2020;40:3099–3117.

Zoulia I., Santamouris M. and Dimoudi A. (2009): Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment* 156, pp. 275–292.

**Sites internet:**

[www.aquisav.com](http://www.aquisav.com)

[www.mabiologie.com](http://www.mabiologie.com)

[www.gerbeaud.com](http://www.gerbeaud.com)

[www.anglevert-services.com](http://www.anglevert-services.com)

<https://espacepouurlavie.ca>

[www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com)

[www.buzzfeed.com](http://www.buzzfeed.com)

[www.flickr.com](http://www.flickr.com)

[www.gettyimages.fr](http://www.gettyimages.fr)

[www.istockphoto.com](http://www.istockphoto.com)

<https://designmag.fr/jardins-et-terrasses>

[www.rustica.fr](http://www.rustica.fr)

<https://cicadelle.org>

[www.marine-bezia-architecte.com](http://www.marine-bezia-architecte.com)

<https://environnement.brussels>

## ANNEXES

### Annexe A : Photos et images des sites de mesure

#### PT 01 Moussalla Moustadjeb



Vue sur la ville depuis le site du Moussalla Moustadjeb. Le jardin du camping M'zab apparait en bas droite de l'image.

#### PT 02 Le Registre de commerce



Le jardin du Camping « M'zab » à gauche et la place à coté du siège Registre de commerce à droite de l'image. Source : GoogleEarth.

### PT 03 Le Camping M'zab



### PT 04 Le Cimetière des martyrs



### PT 05 et PT 06 Jardin Mermed



### PT 07 Rue Zoubiri



### PT 08 Boulevard Didouche (la galerie)



### PT 09 Boulevard Didouche (cimetière)



### PT 10 Le Pont





Le Pont sur l'Oued M'zab, La CNAS à gauche dans l'image, La place 1<sup>er</sup> Mai à droite de l'image. Source : GoogleEarth.

### **PT 11 La place 1 er Mai**



### **PT 12 La CNAS**



**PT 13 Boulevard Talbi Ahmed**



**PT 14 Ruelle Ksar**



**PT 15 Rue IbnSina (exposé au soleil)**



**PT 16 Rue IbnSina (sous la canopée)**



La rue Ibn Sina, Source : GoogleEarth

**PT 17 Boulevard 1 er Novembre**





Le Boulevard 5 Juillet en haut de l'image, puis et le Boulevard 1<sup>er</sup> Novembre passant par le quartier dense de Thenia. Source : GoogleEarth.

### PT 18 Boulevard 5 Juillet



### PT 19 Cité 20 Août





La Cité 20 Août en bas de l'image et la Cité des 400 logements en haut.

Source :GoogleEarth.

### **PT 20 Cité 400 logements**



### **PT 21 Palmeraie Bounoura**



La palmeraie de Bounoura apparait en haut à gauche de l'image. Source :

GoogleEarth.

## PT 22 Parc de loisir "Oasis Kids"



Parc de loisir « Oasis kids » apparaît en haut à droite de l'image. Le site du Moussalla Moustadjeb apparaît en haut à gauche. Les deux sites se trouvent en haut des collines. La ville apparaît en contre-bas dans l'image. Source : GoogleEarth.



Vue sur la vallée depuis le site du Parc de loisir « Oasis kids ».



## Annexe B : Caractéristiques et photos des instruments de mesure

### Testo 415

Thermo-anémomètre pour des mesures simultanées de la vitesse de l'air et de la température.

La vitesse de l'air de 0 à 10 m/s

La température de l'air de 0 à +50°C

Précision  $\pm 1$  Digit (à 22°C)

$\pm 0,05$ m/s,  $\pm 5\%$  de la valeur mesurée (0... 10m/s)

$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  ( $>0,2$ m/s)



### Sunlight power measurement

ST-1307 Standard Taiwan

Caractéristiques: mesure jusqu'à 1999 watt/m<sup>2</sup>.



### Mastech MS6300 Multifunction

Temperature: -10 Celsius ~ 60 Celsius

Humidity: 0% ~ 100% RH  $\pm 3\%$  RH

Wind speed: 0.5 ~ 20 m / s  $\pm 3\%$



---

## Annexe C : Aperçu sur le fichier Métadonnées de l'image Landsat-8

GROUP = L1\_METADATA\_FILE

GROUP = METADATA\_FILE\_INFO

ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"

REQUEST\_ID = "0501805260241\_00015"

LANDSAT\_SCENE\_ID = "LC81950372015210LGN02"

LANDSAT\_PRODUCT\_ID = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1"

COLLECTION\_NUMBER = 01

FILE\_DATE = 2018-05-27T17:11:52Z

STATION\_ID = "LGN"

PROCESSING\_SOFTWARE\_VERSION = "LPGS\_13.1.0"

END\_GROUP = METADATA\_FILE\_INFO

GROUP = PRODUCT\_METADATA

DATA\_TYPE = "L1TP"

COLLECTION\_CATEGORY = "T1"

ELEVATION\_SOURCE = "GLS2000"

OUTPUT\_FORMAT = "GEOTIFF"

SPACECRAFT\_ID = "LANDSAT\_8"

SENSOR\_ID = "OLI\_TIRS"

WRS\_PATH = 195

WRS\_ROW = 37

NADIR\_OFFNADIR = "NADIR"

TARGET\_WRS\_PATH = 195

TARGET\_WRS\_ROW = 37

DATE\_ACQUIRED = 2015-07-29

SCENE\_CENTER\_TIME = "10:20:06.2088420Z"

CORNER\_UL\_LAT\_PRODUCT = 34.22545

CORNER\_UL\_LON\_PRODUCT = 2.12491

CORNER\_UR\_LAT\_PRODUCT = 34.21787  
CORNER\_UR\_LON\_PRODUCT = 4.61970  
CORNER\_LL\_LAT\_PRODUCT = 32.11498  
CORNER\_LL\_LON\_PRODUCT = 2.14563  
CORNER\_LR\_LAT\_PRODUCT = 32.10799  
CORNER\_LR\_LON\_PRODUCT = 4.58135  
CORNER\_UL\_PROJECTION\_X\_PRODUCT = 419400.000  
CORNER\_UL\_PROJECTION\_Y\_PRODUCT = 3787500.000  
CORNER\_UR\_PROJECTION\_X\_PRODUCT = 649200.000  
CORNER\_UR\_PROJECTION\_Y\_PRODUCT = 3787500.000  
CORNER\_LL\_PROJECTION\_X\_PRODUCT = 419400.000  
CORNER\_LL\_PROJECTION\_Y\_PRODUCT = 3553500.000  
CORNER\_LR\_PROJECTION\_X\_PRODUCT = 649200.000  
CORNER\_LR\_PROJECTION\_Y\_PRODUCT = 3553500.000  
PANCHROMATIC\_LINES = 15601  
PANCHROMATIC\_SAMPLES = 15321  
REFLECTIVE\_LINES = 7801  
REFLECTIVE\_SAMPLES = 7661  
THERMAL\_LINES = 7801  
THERMAL\_SAMPLES = 7661  
FILE\_NAME\_BAND\_1 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B1.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_2 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B2.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_3 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B3.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_4 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B4.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_5 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B5.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_6 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B6.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_7 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B7.TIF"  
FILE\_NAME\_BAND\_8 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B8.TIF"

FILE\_NAME\_BAND\_9 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B9.TIF"

FILE\_NAME\_BAND\_10 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B10.TIF"

FILE\_NAME\_BAND\_11 = "LC08\_L1TP\_195037\_20150729\_20180527\_01\_T1\_B11.TIF"

## Annexe D : Aperçu sur le fichier Métadonnées de l'image Sentinel 2 :

### Tuile 1

```

<n1:Level-1C_User_Product xmlns:n1="https://psd-
14.sentinel2.eo.esa.int/PSD/User_Product_Level-
1C.xsd" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-
instance" xsi:schemaLocation="https://psd-
14.sentinel2.eo.esa.int/PSD/User_Product_Level-1C.xsd">
<n1:General_Info>
<Product_Info>
<PRODUCT_START_TIME>2015-08-16T10:20:26.027Z</PRODUCT_START_TIME>
<PRODUCT_STOP_TIME>2015-08-16T10:20:26.027Z</PRODUCT_STOP_TIME>
<PRODUCT_URI>S2A_MSIL1C_20150816T102026_N0204_R065_T31SER_20150816T102
635.SAFE</PRODUCT_URI>
<PROCESSING_LEVEL>Level-1C</PROCESSING_LEVEL>
<PRODUCT_TYPE>S2MSI1C</PRODUCT_TYPE>
<PROCESSING_BASELINE>02.04</PROCESSING_BASELINE>
<GENERATION_TIME>2015-08-16T10:26:35.000000Z</GENERATION_TIME>
<PREVIEW_IMAGE_URL>Not applicable</PREVIEW_IMAGE_URL>
<PREVIEW_GEO_INFO>Not applicable</PREVIEW_GEO_INFO>
<Datatake datatakeIdentifier="GS2A_20150816T102026_000777_N02.04">
<SPACECRAFT_NAME>Sentinel-2A</SPACECRAFT_NAME>
<DATATAKE_TYPE>INS-NOBS</DATATAKE_TYPE>
<DATATAKE_SENSING_START>2015-08-
16T10:20:26.027Z</DATATAKE_SENSING_START>
<SENSING_ORBIT_NUMBER>65</SENSING_ORBIT_NUMBER>
<SENSING_ORBIT_DIRECTION>DESCENDING</SENSING_ORBIT_DIRECTION>
</Datatake>
<Query_Options completeSingleTile="true">
<PRODUCT_FORMAT>SAFE_COMPACT</PRODUCT_FORMAT>
</Query_Options>
<Product_Organisation>
<Granule_List>
<Granule datastripIdentifier="S2A_OPER_MSI_L1C_DS_EPA__20160705T074835
_S20150816T102635_N02.04" granuleIdentifier="S2A_OPER_MSI_L1C_TL_EPA__
20160705T074835_A000777_T31SER_N02.04" imageFormat="JPEG2000">
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B01</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B02</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B03</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B04</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B05</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B06</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER
_20150816T102026_B07</IMAGE_FILE>

```

```
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_B08</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_B8A</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_B09</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_B10</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_B11</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_B12</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SER_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SER_20150816T102026_TCI</IMAGE_FILE>
</Granule>
</Granule_List>
</Product_Organisation>
</Product_Info>
<Product_Image_Characteristics>
<Special_Values>
<SPECIAL_VALUE_TEXT>NODATA</SPECIAL_VALUE_TEXT>
<SPECIAL_VALUE_INDEX>0</SPECIAL_VALUE_INDEX>
</Special_Values>
<Special_Values>
<SPECIAL_VALUE_TEXT>SATURATED</SPECIAL_VALUE_TEXT>
<SPECIAL_VALUE_INDEX>65535</SPECIAL_VALUE_INDEX>
</Special_Values>
<Image_Display_Order>
<RED_CHANNEL>3</RED_CHANNEL>
<GREEN_CHANNEL>2</GREEN_CHANNEL>
<BLUE_CHANNEL>1</BLUE_CHANNEL>
</Image_Display_Order>
<QUANTIFICATION_VALUE unit="none">10000</QUANTIFICATION_VALUE>
<Reflectance_Conversion>
<U>0.974188155130973</U>
<Solar_Irradiance_List>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="0" unit="W/m2/μm">1913.57</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="1" unit="W/m2/μm">1941.63</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="2" unit="W/m2/μm">1822.61</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="3" unit="W/m2/μm">1512.79</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="4" unit="W/m2/μm">1425.56</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="5" unit="W/m2/μm">1288.32</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="6" unit="W/m2/μm">1163.19</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="7" unit="W/m2/μm">1036.39</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="8" unit="W/m2/μm">955.19</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="9" unit="W/m2/μm">813.04</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="10" unit="W/m2/μm">367.15</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="11" unit="W/m2/μm">245.59</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="12" unit="W/m2/μm">85.25</SOLAR_IRRADIANCE>
</Solar_Irradiance_List>
</Reflectance_Conversion>
```

```
<Spectral_Information_List>
<Spectral_Information bandId="0" physicalBand="B1">
<RESOLUTION>60</RESOLUTION>
<Wavelength>
<MIN unit="nm">430</MIN>
<MAX unit="nm">457</MAX>
<CENTRAL unit="nm">443.9</CENTRAL>
</Wavelength>
<Spectral_Response>
<STEP unit="nm">1</STEP>
<VALUES>0.01522444 0.06669758 0.19425897 0.35395736 0.45648857
0.50759455 0.54750739 0.58419244 0.61012868 0.64603585 0.69458246
0.74037505 0.78703023 0.85862712 0.94458791 0.9928916 1 0.99055275
0.97282606 0.95596914 0.95429069 0.91888272 0.72055356 0.38639386
0.14531035 0.05161255 0.01738704 0.00029585</VALUES>
```

## Annexe E : Aperçu sur le fichier Métadonnées de l'image Sentinel 2 :

### Tuile 2

```

<n1:Level-1C_User_Product xmlns:n1="https://psd-
14.sentinel2.eo.esa.int/PSD/User_Product_Level-
1C.xsd" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-
instance" xsi:schemaLocation="https://psd-
14.sentinel2.eo.esa.int/PSD/User_Product_Level-1C.xsd">
<n1:General_Info>
<Product_Info>
<PRODUCT_START_TIME>2015-08-16T10:20:26.027Z</PRODUCT_START_TIME>
<PRODUCT_STOP_TIME>2015-08-16T10:20:26.027Z</PRODUCT_STOP_TIME>
<PRODUCT_URI>S2A_MSIL1C_20150816T102026_N0204_R065_T31SES_20150816T102
635.SAFE</PRODUCT_URI>
<PROCESSING_LEVEL>Level-1C</PROCESSING_LEVEL>
<PRODUCT_TYPE>S2MSI1C</PRODUCT_TYPE>
<PROCESSING_BASELINE>02.04</PROCESSING_BASELINE>
<GENERATION_TIME>2015-08-16T10:26:35.000000Z</GENERATION_TIME>
<PREVIEW_IMAGE_URL>Not applicable</PREVIEW_IMAGE_URL>
<PREVIEW_GEO_INFO>Not applicable</PREVIEW_GEO_INFO>
<Datatake datatakeIdentifier="GS2A_20150816T102026_000777_N02.04">
<SPACECRAFT_NAME>Sentinel-2A</SPACECRAFT_NAME>
<DATATAKE_TYPE>INS-NOBS</DATATAKE_TYPE>
<DATATAKE_SENSING_START>2015-08-
16T10:20:26.027Z</DATATAKE_SENSING_START>
<SENSING_ORBIT_NUMBER>65</SENSING_ORBIT_NUMBER>
<SENSING_ORBIT_DIRECTION>DESCENDING</SENSING_ORBIT_DIRECTION>
</Datatake>
<Query_Options completeSingleTile="true">
<PRODUCT_FORMAT>SAFE_COMPACT</PRODUCT_FORMAT>
</Query_Options>
<Product_Organisation>
<Granule_List>
<Granule datastripIdentifier="S2A_OPER_MSI_L1C_DS_EPA__20160705T074835
_S20150816T102635_N02.04" granuleIdentifier="S2A_OPER_MSI_L1C_TL_EPA__
20160705T074835_A000777_T31SES_N02.04" imageFormat="JPEG2000">
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B01</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B02</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B03</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B04</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B05</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B06</IMAGE_FILE>

```

```
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B07</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B08</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B8A</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B09</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B10</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B11</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_B12</IMAGE_FILE>
<IMAGE_FILE>GRANULE/L1C_T31SES_A000777_20150816T102635/IMG_DATA/T31SES
_20150816T102026_TCI</IMAGE_FILE>
</Granule>
</Granule_List>
</Product_Organisation>
</Product_Info>
<Product_Image_Characteristics>
<Special_Values>
<SPECIAL_VALUE_TEXT>NODATA</SPECIAL_VALUE_TEXT>
<SPECIAL_VALUE_INDEX>0</SPECIAL_VALUE_INDEX>
</Special_Values>
<Special_Values>
<SPECIAL_VALUE_TEXT>SATURATED</SPECIAL_VALUE_TEXT>
<SPECIAL_VALUE_INDEX>65535</SPECIAL_VALUE_INDEX>
</Special_Values>
<Image_Display_Order>
<RED_CHANNEL>3</RED_CHANNEL>
<GREEN_CHANNEL>2</GREEN_CHANNEL>
<BLUE_CHANNEL>1</BLUE_CHANNEL>
</Image_Display_Order>
<QUANTIFICATION_VALUE unit="none">10000</QUANTIFICATION_VALUE>
<Reflectance_Conversion>
<U>0.974188155130973</U>
<Solar_Irradiance_List>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="0" unit="W/m2/μm">1913.57</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="1" unit="W/m2/μm">1941.63</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="2" unit="W/m2/μm">1822.61</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="3" unit="W/m2/μm">1512.79</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="4" unit="W/m2/μm">1425.56</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="5" unit="W/m2/μm">1288.32</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="6" unit="W/m2/μm">1163.19</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="7" unit="W/m2/μm">1036.39</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="8" unit="W/m2/μm">955.19</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="9" unit="W/m2/μm">813.04</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="10" unit="W/m2/μm">367.15</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="11" unit="W/m2/μm">245.59</SOLAR_IRRADIANCE>
<SOLAR_IRRADIANCE bandId="12" unit="W/m2/μm">85.25</SOLAR_IRRADIANCE>
```

```
</Solar_Irradiance_List>
</Reflectance_Conversion>
<Spectral_Information_List>
<Spectral_Information bandId="0" physicalBand="B1">
<RESOLUTION>60</RESOLUTION>
<Wavelength>
<MIN unit="nm">430</MIN>
<MAX unit="nm">457</MAX>
<CENTRAL unit="nm">443.9</CENTRAL>
</Wavelength>
<Spectral_Response>
<STEP unit="nm">1</STEP>
<VALUES>0.01522444 0.06669758 0.19425897 0.35395736 0.45648857
0.50759455 0.54750739 0.58419244 0.61012868 0.64603585 0.69458246
0.74037505 0.78703023 0.85862712 0.94458791 0.9928916 1 0.99055275
0.97282606 0.95596914 0.95429069 0.91888272 0.72055356 0.38639386
0.14531035 0.05161255 0.01738704 0.00029585</VALUES>
```

## Annexe F : Article publié

Vertigo

Volume 22 numéro 3 | Décembre 2022\_Écocitoyenneté et sciences citoyennes

### **Variations microclimatiques et effet de la végétation dans la ville aride de Ghardaïa, Algérie**

**Rachid Amieur, Djamilia Rouag Saffidine et Christiane Weber**

<https://doi.org/10.4000/vertigo.36719>

#### **Résumé**

La caractérisation du climat urbain dans les villes chaudes et arides est essentielle pour comprendre les interactions des variables climatiques avec le bâti et la végétation. Les chaleurs estivales caniculaires constituent une contrainte extrême pour les citoyens, en particulier la population à risque comme les jeunes enfants et les personnes âgées ou malades. La végétation contribue à améliorer le microclimat urbain de ces régions et est considérée comme un moyen de lutte contre les ICU (Îlots de Chaleur Urbains). Cette étude a pour objectif l'analyse des variations microclimatiques intra-urbaines et l'impact de la végétation dans la ville de Ghardaïa à travers une campagne de mesure *in situ*. Le comportement thermique des sites de mesures oscille entre ICU et IFU (Îlot de Fraicheur Urbain). L'étude a montré l'existence d'un « archipel » de chaleur à travers la ville. L'intensité maximale de l'ICU de chaleur est de 2.98°C. La température minimale nocturne est supérieure à 30°C, bien au-delà de la limite du confort thermique. Quant aux différences intra-urbaines, on note que la végétation produit un IFU maximal de 5.61°C. L'effet modérateur de la végétation durant le jour est dû principalement à l'ombre fournie par la canopée des arbres. Les sites végétalisés ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. Il s'avère qu'un couvert végétal urbain plus dense et irrigué améliorerait davantage les conditions de confort en ville.

#### **Mots-clés :**

îlot de chaleur urbain (ICU), îlot de fraicheur urbain (IFU), climat aride, végétation, confort thermique, Ghardaïa

#### **Keywords:**

urban heat island (UHI), parc cool island (PCI), arid climate, vegetation, thermal comfort, Ghardaïa

## **Introduction**

La qualité des espaces extérieurs dans les villes aujourd'hui est une des priorités pour le bien-être des citoyens et le développement économique (Harlan et al., 2006). L'effet conjugué de l'îlot de chaleur urbain et le réchauffement global de la planète constitue un des problèmes majeurs de nos jours (Potchter et Ben-Shalom, 2013). Les chaleurs caniculaires durant les étés torrides des villes du Sud constituent une contrainte extrême pour les citoyens, en particulier les populations à risque comme les personnes âgées, les jeunes enfants ou les malades (Harlan et al., 2006).

La caractérisation du climat urbain dans les villes chaudes et arides est une étape importante pour comprendre les interactions des variables climatiques avec la configuration du bâti et la végétation afin de déterminer les solutions d'aménagement urbain qui créent un confort thermique opportun pour les individus. Plusieurs moyens sont proposés pour contrer la chaleur urbaine, telle que l'utilisation de la végétation et de l'eau, l'application de surfaces réfléchissantes sur les bâtiments et les infrastructures, la diminution de l'énergie anthropique ainsi qu'une bonne composition géométrique du milieu bâti (Yamamoto, 2006).

Cette étude a pour objectif l'analyse des variations microclimatiques et l'impact de la végétation en été dans la ville chaude et aride de Ghardaïa en Algérie à travers une campagne de mesure *in situ*. Il s'agit de chercher comment les caractéristiques des sites urbains influencent le microclimat urbain et en particulier l'effet de la végétation.

Cette étude se propose dans un premier temps de présenter une brève revue de la littérature sur l'îlot de chaleur urbain et ses particularités dans les régions chaudes et arides. La deuxième partie traite de l'effet de la végétation sur le microclimat, illustré à travers divers exemples. Le protocole de mesure, l'instrumentation et la présentation de la zone d'étude sont exposés dans la section suivante, puis sont présentés les résultats et la discussion. Enfin, les principaux résultats de la recherche sont synthétisés dans la conclusion où sont proposées aussi des recommandations visant à l'amélioration de la planification urbaine en vue d'atténuer les effets des îlots de chaleur urbains.

## **L'îlot de chaleur urbain dans les régions chaudes et arides**

Les changements d'occupation du sol d'une région ont des conséquences sur son bilan radiatif et donc sur le climat local. Le processus d'urbanisation provoque une altération des propriétés radiatives, hygrothermiques et aérodynamiques de l'environnement (Ringebach, 2004). Les éléments physiques comme le rayonnement solaire, l'écoulement du vent et l'humidité interagissent avec les éléments qui constituent la ville : les bâtiments, les rues et les activités qui s'y développent. Les villes produisent donc leur propre climat, qui se caractérise par des températures plus élevées que dans les zones rurales environnantes. Ce phénomène est appelé « l'îlot de chaleur urbain »

(ICU) et il a été mis en évidence pour la première fois en 1830 à Londres (Howard, 1833). L'ICU est la manifestation physique la plus connue de la ville sur son climat. C'est un phénomène essentiellement nocturne (Sobstyl et al., 2017 ; Alcoforado et Matzarakis, 2010 ; Arnfield, 2003). Il désigne des élévations nocturnes de températures enregistrées en milieu urbain par rapport à la campagne voisine. Les températures de l'air augmentent graduellement de la périphérie jusqu'au centre-ville. Les conditions idéales climatiques à la formation de l'ICU sont les conditions anticycloniques stables, un ciel dégagé et des vents faibles.

L'ICU est aussi le résultat de plusieurs facteurs liés au rayonnement du milieu et au comportement des matériaux utilisés combinés :

- La complexité et la densité du milieu bâti qui favorise l'accumulation et le piégeage de la chaleur ainsi que le stockage de l'énergie dans les matériaux de construction.
- L'imperméabilisation des surfaces et leurs faibles albédos.
- Le manque de surfaces évaporatives telles que les plans d'eau et la végétation.
- La chaleur anthropique produite par les activités d'industrie, de transport, de climatisation et la pollution atmosphérique qui en résulte (Yamamoto, 2006).

Le Sky View Factor (SVF) ou le facteur d'ouverture au ciel permet de caractériser la morphologie urbaine et les échanges radiatifs qui en découlent. Il correspond au degré d'ouverture du ciel, c'est-à-dire la fraction de ciel visible en un point particulier (Hodul et al., 2016 ; Brown et Grimmond, 2001 ; Oke, 1987).

L'ICU est donc un phénomène urbain lié à l'hétérogénéité du milieu (Boukhabla et al., 2013), ses caractéristiques morphologiques (taille, hauteur, orientation et gabarit) des bâtiments et des infrastructures ainsi que l'existence d'espaces ouverts (parcs, plan d'eau, et *cetera*). S'il présente l'avantage de réduire la facture de chauffage en hiver, il peut provoquer en revanche de graves problèmes de qualité de l'air par piégeage des émissions et des particules, ainsi qu'une grande consommation d'énergie due à la climatisation et beaucoup d'inconfort thermique en été, conduisant à un surcroît de problèmes de santé. Des études ont ainsi montré qu'aux moments de vagues de chaleur, le taux de morbidité et de mortalité lié à la température augmente significativement (Harlan et al., 2006 ; Baker et al., 2002). La vague de chaleur d'août 2003 qui a frappé l'Europe a causé le décès de milliers de personnes dont 15 000 en France (Cadot et Spira, 2006 ; Hémon et al., 2003). Les fortes chaleurs urbaines affectent aussi le secteur économique, le rendement des travailleurs étant diminué par les modifications d'horaires de travail ou la pénibilité des activités. Les villes à climat chaud et aride sont plus exposées aux aléas des ICUs.

La lutte contre l'ICU est donc primordiale pour la santé de la population, l'économie et la régulation de la consommation d'énergie. Parmi les stratégies de lutte on peut citer : la végétalisation des espaces urbains, une conception réfléchie de la morphologie du cadre bâti, l'utilisation de matériaux réfléchissants et peu absorbants, la création de plans d'eau, etc. (Akbari *et al.*, 2001).

### **La particularité des régions chaudes et arides**

L'ICU dans ces régions présente des particularités différentes des villes à climat froid, tempéré ou équatorial. Les climats chauds et arides sont caractérisés généralement par des hivers doux, mais des étés très chauds et secs. Le régime hydrique des cours d'eau dans le désert est souvent intermittent en fonction des pluies, les types de cours d'eau de surface (oueds) ne permettent pas d'assurer un flux continu de la ressource. Dans ce contexte, la ville est plus végétalisée que l'environnement désertique (Ben Shalom *et al.*, 2009 ; Pearlmutter *et al.*, 2007 ; Roth, 2007), ce qui mène à une formation d'un IFU (Îlot de Fraicheur Urbain) en journée quand le désert est plus chaud que la ville. En effet, par le passé, les établissements humains dans le désert formaient une agglomération minérale compacte. La végétation et l'eau étant rares dans le désert (Besancenot, 2013), des palmeraies avec leurs systèmes d'irrigation ont été créées de toutes pièces par l'Homme. L'oasis formait ainsi une tache de verdure dans le désert et était toujours adjacente à la ville ou ksar qui, lui, était dépourvu de végétation. Les villes contemporaines, en revanche, contiennent de la végétation, que ce soit dans les espaces et équipements publics ou dans les cours et terrasses des propriétés privées. Les palmeraies résistent à la progression urbaine, mais cèdent souvent la place à des bâtiments ou des infrastructures laissant çà et là des espaces verts résiduels. La végétation plantée est irriguée, car les plans d'eau n'existent pas et les cours d'eau sont à sec une grande partie de l'année (Côte, 2005). L'entretien de sources d'alimentation en eau pour l'irrigation ou l'arrosage constitue une charge qui peut s'avérer importante selon la taille de la ville (Côte, 2005).

Au sein d'une agglomération, les bâtiments et les arbres créent des espaces ombragés, et offrent un abri contre le rayonnement solaire intense et les vents violents. En dehors de la ville, dans le désert environnant, les gens sont exposés au soleil et au vent. Cette situation fait que les villes désertiques présentent des îlots de fraîcheur diurne recherchés (Garcia-cueto *et al.*, 2007 ; Correa *et al.*, 2006 a,b ; Brazel *et al.*, 2000). Après le coucher du soleil, en revanche, le désert connaît un refroidissement rapide dû à la faible capacité thermique du sol et la grande ouverture vers le ciel. La ville, quant à elle, voit l'émergence d'îlots de chaleur (ICU) nocturne liée à la forte inertie thermique des matériaux de construction et au faible facteur de vue (SVF) des rues. L'énergie emmagasinée le jour est ainsi réémise vers l'atmosphère durant la nuit. S'ajoute à cela la chaleur anthropique produite par les activités humaines : circulation, activités de production, climatisation (Roth, 2007). Toute cette chaleur est ainsi piégée dans la

complexité géométrique de la ville, ce qui entraîne des températures nocturnes élevées par rapport au désert.

À titre d'exemple, l'urbanisation rapide de la ville de Phoenix (Arizona, US) a conduit à une élévation de sa température minimale nocturne de 5°C et de sa moyenne journalière de 3.1°C (Rosheidat et al., 2008). Sofer et Potchter (2006) rapportent un ICU d'une intensité de 1.7°C à d'Eilat en Israël ville chaude et aride, tout comme à Beer Sheva, où Potchter et al. (2010) enregistraient un îlot de chaleur d'une intensité de 4°C. Ce schéma entre la ville désertique et la campagne environnante est donc différent de celui qui se trouve dans les régions tempérées ou tropicales où la ville est constituée de bâtiments et de surfaces imperméables avec peu de végétation comparée à la campagne. Ces espaces environnants, caractérisés par des espaces naturels, des champs ou des forêts sont recherchés en journée. En revanche, dans le désert, la ville est le seul îlot de végétation concentré (oasis et végétation urbaine) : ainsi, le gradient ville-campagne s'inverse en journée et, selon les quartiers, il fait plus frais en ville.

Ce constat est également confirmé dans les études de la relation de l'occupation du sol avec l'îlot de chaleur urbain de surface dans les villes chaudes et arides. Les agglomérations contemporaines (en dehors des noyaux historiques) sont plus végétalisées en comparaison aux alentours désertiques. Ces études montrent que les villes présentent souvent un îlot de fraîcheur urbain durant le jour (Dialesandro et al., 2019 ; Fan et al., 2017 ; Nassar et al., 2016 ; Hao et Li, 2016 ; Rasul et al., 2015 ; Lazzarini et al., 2013 ; Frey et al., 2006). Dans le cadre de cette étude, bien que l'îlot de chaleur urbain soit largement constaté la nuit, nous considérons comme certains auteurs l'apparition en journée d'un « l'îlot de chaleur urbain diurne » ("diurnal urban heat island" ou "daytime urban heat island") (Li et Zhang, 2021 ; Krüger et al., 2018 ; Hidalgo et al., 2010 ; Giridharan et al., 2004). Dans les villes désertiques où la différence entre ville et zones alentour est inversée en journée, le concept d'îlot de chaleur urbain diurne peut dès lors s'appliquer.

De ce qui précède, il apparaît que la végétation et l'hétérogénéité du bâti (spatiale, verticale et des matériaux) requièrent une importance toute particulière selon la zone étudiée. La caractérisation de l'îlot de chaleur urbain doit permettre de mieux cerner les éléments favorisant une planification urbaine plus efficace face au stress thermique des villes désertiques.

### **L'effet de la végétation**

La végétation offre un certain nombre de services écosystémiques en milieu urbain. D'un côté, elle a une action positive sur les processus naturels comme la capture et le stockage du carbone, l'érosion des sols, le cycle naturel de l'eau dans les sols, et elle favorise la biodiversité (Laille et al., 2015 ; Mestayer et Brunet, 2015). De l'autre côté,

la végétation fournit des services pour les citoyens à travers trois facteurs : l'ombrage, l'humidification de l'air et la modification de la vitesse et de la direction du vent. Par effet cumulatif de ces facteurs, la végétation permet la réduction de la température de l'air et l'amélioration des conditions de confort. Celle-ci, notamment pendant les pics de chaleur, a un fort impact sur la qualité de vie en ville et la santé des citoyens. Un des moyens de limiter ces impacts est de végétaliser les espaces urbains, et d'optimiser l'évapotranspiration (Motazedian et Leardini, 2012 ; Yu et Hien, 2006). En optimisant l'évapotranspiration des zones végétalisées la température de surface peut être réduite, ainsi que celle de l'air localement (Makhelouf Ali, 2013 ; Oliveira et al., 2011 ; Bowler et al., 2010 ; Dimoudi et Nikolopoulou, 2003 ; Givoni, 1991). En effet les arbres absorbent par leur feuillage les flux radiatifs. Plus de 80 % du rayonnement solaire incident est intercepté par les feuilles (Saudreau et al., 2015). La réduction du rayonnement solaire sous une canopée dense peut être de 70 à 90 % par une journée claire d'été (Heisler, 1986). Une partie du rayonnement est utilisée dans la photosynthèse et une autre est utilisée pour l'évaporation de l'eau des feuilles. Ainsi l'évaporation refroidit l'air en contact avec les feuilles. Cet effet rafraîchissant ou « Parc Cool Island - PCI » (Spronken-Smith et Oke, 1998) dépend aussi de la surface du couvert, de sa densité, des espèces en présence, de l'orientation, de la hauteur et de l'âge des arbres, et *cetera*. Le rafraîchissement généré peut être ressenti à des distances variables selon l'importance de la surface et du type de végétation.

La taille des espaces verts, le type de végétation, mais aussi la topographie, la vitesse du vent influencent l'effet de la végétation (Chow et al., 2010). Certains chercheurs indiquent notamment que plus le parc est grand, plus l'effet rafraîchissant est important (Bacci et al., 2003 ; Jauregui, 1991 ; Barradas, 1991). Néanmoins, même un arbre isolé peut avoir un effet (Streiling et Matzarakis, 2003 ; Souch et Souch, 1993). L'espèce de la plante, sa localisation et le climat sont des facteurs primordiaux car ils impactent le taux d'évaporation. Ceci renvoie à la nécessité de penser la plantation du bon arbre au bon endroit (Kotzen, 2003). Les résultats de plusieurs recherches indiquent qu'en général, cet effet de refroidissement est de l'ordre de 2 à 3°C (Hamada et al., 2013 ; Ren et al., 2013 ; Bacci et al., 2003 ; Shashua-Bar et Hoffman, 2000 ; Spronken-Smith et Oke, 1998 ; Kurn et al., 1994 ; Saito et al., 1991). Potchter et al. (2010) montrent que l'effet rafraîchissant des arbres se situe autour de 1.5 et 3°C en été dans le climat désertique de Beer Sheva. Taleb et Taleb (2014), dans une étude de quantification de l'effet rafraîchissant de la végétation, concluent que la plantation d'arbres pourrait faire baisser les pics de température à Dubaï (Émirats Arabes Unis) de 2 à 6°C et augmenter ainsi le confort thermique des piétons.

Cependant, les zones chaudes et arides souffrent d'une très faible pluviométrie (Chen et Chen, 2013 ; Kottek et al., 2006). L'absence de précipitations et de ressources en eau est également un élément majeur de la compréhension des interactions entre ville, végétation et conditions microclimatiques. Les besoins d'évapotranspiration sont

calculés d'après les caractéristiques de température et d'humidité, les espaces végétalisés en milieu aride ne pouvant pas en émettre autant qu'une végétation en milieu tempéré en raison du manque d'eau dans le sol et du stress hydrique continu (Kotzen, 2003). La faible humidité rend donc le refroidissement par évapotranspiration très limité. Le manque de l'eau dans les villes arides constitue un frein quant à l'usage de stratégies de rafraîchissement par évaporation (Wheeler et al., 2019). Ainsi Guhathakurta et Gober (2007) et Middel et al. (2012) indiquent que la consommation d'eau pour le rafraîchissement augmente considérablement en été dans la ville de Phoenix, dans le sud des États-Unis. La plantation de la végétation pour son rôle microclimatique (humidité et ombre) se heurte à la nécessité d'économie d'eau d'irrigation. Shashua-Bar et al. (2009) recommandent la plantation d'arbres plutôt que le gazon pour une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau dans le désert. Le choix d'espèces xérophytes s'impose souvent pour leur faible consommation d'eau (Chow et Brazel, 2012).

Un autre service écosystémique est à souligner : la présence de la végétation augmente la performance énergétique des bâtiments, soit par protection directe des parois (du soleil et du vent) ou par la régulation de la température extérieure (Pandit et Laband, 2010 ; Akbari et al., 2001 ; Akbari et al., 1997 ; Huang et al., 1987). La végétalisation paraît ainsi d'autant plus préconisée que le climat est chaud et sec, et son utilisation dans les climats chauds et arides trouverait tout son intérêt en intégrant une réflexion sur la planification urbaine, les ressources en eau disponibles et la végétalisation de la ville. Cependant, les plans d'urbanisme actuels ne prennent en compte l'intérêt du végétal que sous l'angle de l'esthétique ou de l'embellissement, et négligent souvent les caractéristiques climatiques ainsi que les besoins en confort thermique des citoyens. Il convient donc de fournir des éléments de compréhension des phénomènes ci-dessus et de leur intégration dans les procédures de planification.

### **Site d'étude, données et méthodes**

#### **Zone d'étude**

L'étude a été menée dans la ville de Ghardaïa (Latitude : 32°29'27" Nord, Longitude : 3°40'24" Est) située au nord du Sahara à 600 kilomètres au sud de la capitale Alger (Algérie) dans la région du M'zab (Figure 1). La vallée du M'zab est connue pour ses cinq ksour classés patrimoine mondial par l'UNESCO en 1982. Le paysage géomorphologique de la vallée du M'zab se trouve sur un grand plateau rocheux, la Hamada ; il est dominé par des escarpements rocheux, la Chebka (« filet » en arabe). Il s'agit d'une vaste étendue pierreuse sans dunes. Le manque d'eau est associé au type de végétation présent sur le site. L'allocation de la ressource doit en effet répondre aux besoins des habitants, des activités économiques, et ensuite à ceux des palmeraies et autres espaces de végétation. Les besoins d'irrigation ne sont pas *a priori*

prépondérants sauf pour des activités économiques. L'oued est totalement intermittent : il ne soutient pas les besoins en eau de la végétation urbaine et ne permet pas de rafraîchir les quartiers qu'il jouxte, en revanche, son orientation favorise des coulées de vent dans son lit.

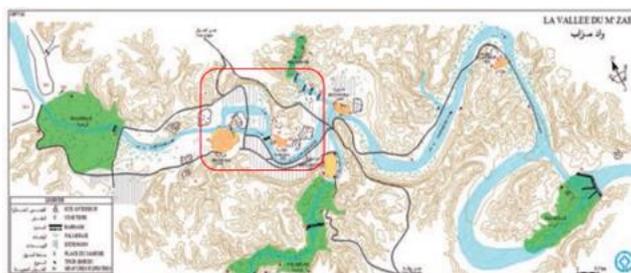
Figure 1. Situation de la ville de Ghardaïa



RFI [en ligne] URL : [http://www1.rfi.fr/actufr/articles/106/article\\_73099.asp](http://www1.rfi.fr/actufr/articles/106/article_73099.asp)

Le territoire géomorphologique de Ghardaïa est situé sur un plateau rocheux (calcaire). L'Oued M'zab traverse la vallée d'Ouest en Est. Les cinq cités du M'zab (Benyoucef, 2010) sont disséminées le long du cours d'eau (figure 2).

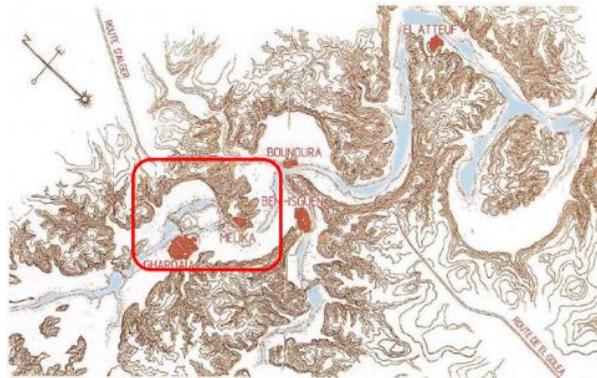
Figure 2. La vallée du M'zab



OPVM, 2012.

Les ksour sont des agglomérations fortifiées datant de 1000 ans, érigées sur des pitons rocheux et s'étalant le long de l'oued du M'zab. Dans une logique de préservation de l'équilibre nature/culture, les monts servaient à bâtir et à la défense et les vallées à cultiver (figure 3) (Ben-youcef 1986). Au fond de la vallée, les oasis étaient constituées de palmeraies (chacune rattachée à un ksar, figure 2). Elles étaient un lieu de subsistance pour la population locale et constituaient un havre de fraîcheur dans l'écosystème du M'zab. Le système d'irrigation était conçu d'une manière ingénieuse afin d'économiser l'eau, ressource rare dans le désert (Côte, 2005).

Figure 3. Topographie générale et simplifiée de la vallée du M'zab



Morphologie originale avant les extensions urbaines anarchiques ; la zone d'étude est encadrée en rouge.

Ravereau et al., 2003.

Le ksar est entouré d'une muraille défensive jalonnée par des tours. Il se caractérise par une forme compacte dictée par la rigueur du climat et les pratiques sociales. La mosquée occupe le point central et culminant du ksar (figure 4). Les habitations forment une composition étagée épousant la pente de la colline. Ce sont des constructions en pierre à forte inertie thermique. Elles sont organisées autour d'un patio central doté d'une ouverture zénithale appelée « Chebek » servant pour l'aération et l'éclairage. Les habitants du ksar pratiquent un nomadisme saisonnier-vertical-quotidien-interne en se déplaçant d'un niveau à un autre (les habitants occupent le rez-de-chaussée durant la journée et la terrasse fraîche durant la nuit pour l'été, et le contraire en hiver : les habitants vivent sur la terrasse ensoleillée durant la journée, et ils passent la nuit au rez-de-chaussée). Le patio joue ainsi le rôle de régulateur thermique. L'autre nomadisme saisonnier concerne la migration vers la résidence d'été dans la palmeraie, pour ceux qui en possèdent, et le retour au ksar en hiver (Adad et Mazouz, 2013 ; Nouibat et Tacherift, 2007).

Le réseau des rues et ruelles s'organise en une organisation radioconcentrique. En raison de la rudesse du climat, les rues ont un profil profond et les maisons ont peu de surfaces exposées au soleil.

Figure 4. Vue aérienne présentant le ksar de Ghardaïa en premier plan, la vallée en second plan, puis les collines environnantes



Arthus-Bertrand, 2014.

Les extensions contemporaines ne respectent pas ce modèle urbain et architectural ancestral. Les voies y sont plus larges (en raison de la circulation automobile) et parfois dotées d'arbres d'alignement. Les quartiers récents dans la partie extra-muros ont quelques places et jardins. Si le ksar représente une entité totalement minérale où il n'y a pas de place pour la végétation, les nouvelles extensions comprennent plusieurs espaces verts.

### **Instrumentation et protocole de mesure**

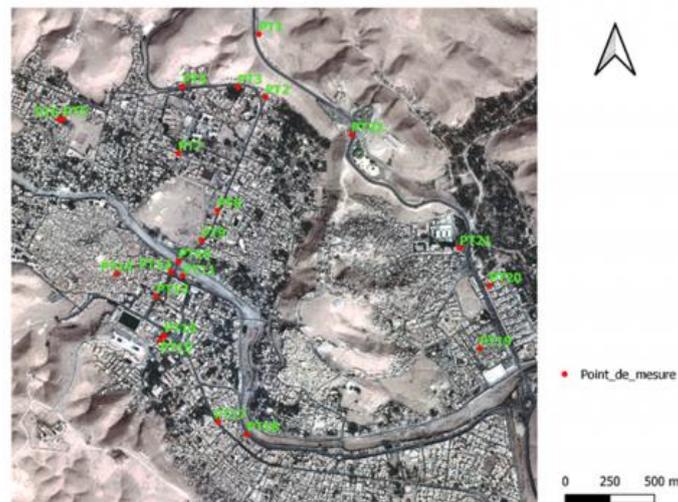
La région est caractérisée par un climat chaud et aride (Bkw) selon la classification de Koppen, avec des hivers doux et des étés chauds et secs (Chen et Chen, 2013 ; Peel et al., 2007 ; Kottek et al., 2006). Les précipitations sont faibles, avec une moyenne de 60 millimètres par an (O.N.M., 2016 ; D.P.A.T., 2005 ; Bouchair, 2004). Le nombre de jours de pluie se situe entre 11 et 15 jours par an. La température moyenne en juillet est de 35°C, avec des maxima dépassant les 45°C et un minimum de 27°C. En janvier, la température moyenne est de 10°C avec un maximum de 20°C et un minimum de 3°C. Les vents dominants en hiver sont de direction Nord-Ouest avec une vitesse moyenne de 12 km/h et un maximum de 29 km/h (janvier). En été, les vents dominants sont de direction Est avec une moyenne de 13 km/h et un maximum de 29 km/h (juillet). Le ciel est dans l'ensemble clair avec une forte insolation (O.N.M., 2016 ; D.P.A.T., 2005 ; Bouchair, 2004).

Le périmètre d'étude couvre plus particulièrement les quartiers du centre-ville de Ghardaïa où se déroule l'essentiel de l'activité économique, administrative et récréative (Figure n° 5). Ces quartiers ont été sélectionnés selon plusieurs critères : la

présence de végétation, la morphologie des rues et des îlots urbains, l'ouverture du ciel et la fréquentation des lieux sélectionnés (boulevards, jardins, et *cetera*).

Les 22 sites de mesure ont été choisis pour leur représentativité le long d'un transect dans les quartiers sélectionnés. L'intérêt du parcours est de pouvoir déceler les variations microclimatiques entre les différents sites (Chebli et al., 2020 ; Ghribi et Dahech, 2020 ; Sharifi et al., 2017 ; Zoulia et al., 2009) selon un parcours urbain de 20 minutes en moyenne.

Figure 5. Localisation des points de mesure dans l'aire d'étude



L'Oued M'zab traverse la ville d'Ouest en Est. Le ksar de Ghardaïa se démarque à gauche de l'image par son tissu compact et la palmeraie de Bounoura est à droite en haut de l'image.

La campagne de mesure s'est étalée du 27 juillet au 04 août 2015. La durée moyenne du jour en cette période est de 14 heures (le lever du soleil à 05 :55 h et le coucher à 19:45 h). Cette période estivale est caractérisée par des températures extrêmes et une humidité très faible. Des données climatiques ont été relevées à 1.5 m du sol : la température de l'air, l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Ces données ont été complétées par des informations morphologiques (rue, bâtiment), environnementales (sol, orientation) et activités économiques.

La prise de mesure est effectuée trois fois par jour :

- À 05:00h, à l'aube où les températures sont les plus basses et où l'effet de l'ICU est mesurable ;
- À 14:30h, au milieu de journée quand les températures sont au maximum. (Fin des activités de beaucoup d'employés, notamment dans le secteur du bâtiment, et arrêt des activités à cause des grandes chaleurs) ;

- À 00:00h, lorsque le confort thermique se fait sentir pour les citoyens. Les commerces sont fermés et la plupart des activités urbaines nocturnes cessent. À cette heure, la plupart des gens passent la nuit à l'extérieur (cours ou jardins) ou sur les terrasses des habitations).

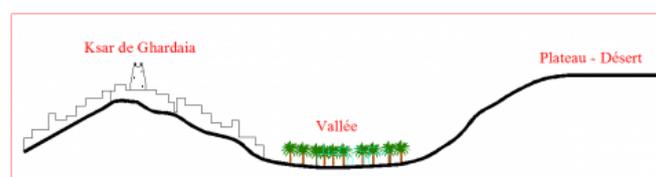
Figure 6. Vue générale sur la ville de Ghardaïa (en regardant vers l'ouest)



L'oued M'zab apparaît en bas à gauche de l'image.

La température a été mesurée avec un appareil thermomètre-anémomètre de marque « testo 415 » (de 0 à 50°C, de 0 à 10 mètres par seconde), plus un appareil multifonction mesurant la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Dans des sites de végétation, deux mesures ont été faites sous et hors de la canopée pour évaluer l'effet d'ombrage des sites. Le rayonnement solaire est mesuré à l'aide d'un pyranomètre (ST-1307 Standard). Les instruments étaient protégés du rayonnement direct et calibrés à l'avance. La valeur moyenne de chaque mesure ainsi que le minimum et maximum ont été calculés sur toute la période de mesure (Tableau 3, 4 et 5 en annexe 1). Le site du Moussalla Moustadjeb (PT01) est choisi comme site de référence en raison de sa situation, en dehors de l'agglomération urbaine, et sa position sur le plateau : il se trouve en haut de la colline, par opposition aux autres sites urbains situés dans la ville en contrebas dans la vallée (figure n° 7 et tableau 1, en annexe).

Figure 7. Profil schématique sur l'aire d'étude ; direction Nord-Sud



L'ICU et l'IFU sont calculés à partir des écarts de température de l'air entre le site de référence, le PT 01 (Moussalla Moustadjeb) et les sites de mesures en ville (Potchter et al., 2010). L'effet de rafraîchissement de la végétation est calculé par la différence de

température de l'air entre le site végétalisé et le site de référence, ou par rapport à un autre site urbain dépourvu de végétation (Bowler et al., 2010).

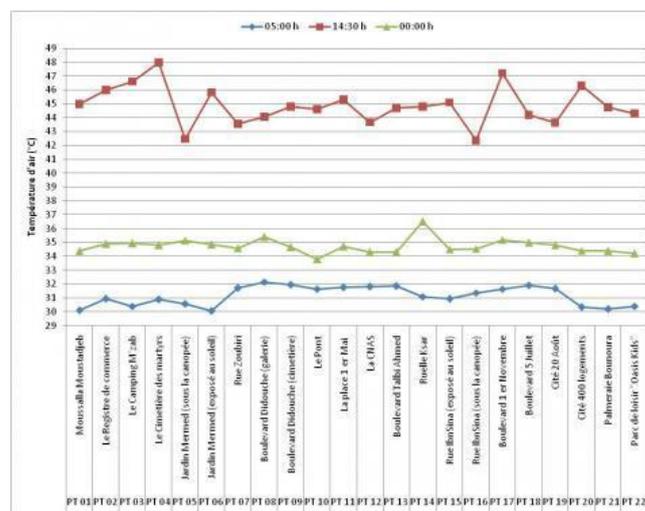
## Résultats

La météo durant la période de mesure était caractérisée par des conditions anticycloniques stables. Les données microclimatiques relevées durant la campagne de mesure sont caractéristiques du climat de Ghardaïa pendant cette période de l'année. Les chaleurs caniculaires sont typiques du climat qui règne au milieu de l'été : l'amplitude thermique quotidienne est de 15°C en moyenne ; le taux d'humidité très faible, reflétant le degré d'aridité de la région ; le vent est faible dans les sites urbains, surtout pendant la nuit. Lors de cette étude l'écart de température entre sites était prononcé durant le jour mais ne dépassait pas les 6°C ; durant la nuit, les écarts sont plus faibles et les températures plus homogènes. Nous allons présenter les variations des différentes mesures réalisées en journée, à minuit et au petit matin.

## Variation de la température de l'air

La figure n° 8 présente les températures moyennes de l'air enregistrées sur l'ensemble des sites durant la période d'investigation. Le thermomètre a affiché des températures extrêmes, de l'ordre de 48°C, et des minimums supérieurs à 30°C. Ces pics et ces minimums sont représentatifs de l'été dans les villes de cette région telle que la ville de Ouargla (Bouchahm et al., 2011).

Figure 8. Température de l'air des sites de mesure



## Variation diurne (14h30)

D'après la figure 8, on constate que le site du cimetière des martyrs (PT04) est le plus chaud des 22 sites de la ville, avec une moyenne de 47.95°C. Le deuxième îlot de

chaleur est enregistré dans le boulevard 1<sup>er</sup> novembre (PT17) avec une différence de 2.23°C par rapport au site de référence PT01. Les autres sites urbains manifestent un comportement thermique homogène, d'une variation faible (moins de 1.4°C). Cependant, certains points de mesure, comme la rue Ibn Sina (PT16) ou le Jardin Mermed (PT05) présentent des températures plus basses parce que prises sous la canopée (plus de 5°C de différence) ; d'autres, comme Cité 20 août (PT19) ou rue Zoubiri (PT07), sont plus frais par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04), avec environ 4°C de différence.

Si les températures des points dépourvus de végétation présentent des températures similaires, les sites ombragés dans l'allée Ibn-Sina PT16, au jardin de Mermed PT05 et le point sous le groupe d'arbres de la CNAS (PT12) manifestent des îlots de fraîcheur par rapport au site désertique de référence (PT01). L'effet rafraîchissantou PCI, « *Park Cool Island* » (Chow *et al.* 2010 ; Spronken-Smith et Oke, 1998) est respectivement de 2.62°C, 2.50°C et 1.3°C. La différence maximale est enregistrée entre le site du cimetière des martyrs (PT04) et l'allée Ibn-Sina (PT16) avec une valeur de 5.61°C. Si on considère les différences au sein des espaces verts, entre les points ombragés et exposés au soleil, on constate que l'impact de la végétation est là aussi significatif. Ainsi, dans l'allée Ibn-Sina (PT15 - PT16) l'effet rafraîchissant localisé de la végétation est de 2.72°C alors que dans le jardin de Mermed (PT06 - PT05) l'effet s'élève jusqu'à 3.36°C.

Afin de bien comprendre le rôle de l'ombre de la végétation sur la température de l'air, nous avons aussi étudié le taux de réduction du rayonnement solaire par le feuillage des arbres. Les mesures du rayonnement solaire montrent que le feuillage et le branchage réduisent considérablement les valeurs du rayonnement qui peuvent dépasser les 970 watts par mètre carré (tableau 2), soit environ 800 Watt par mètre carré de différence. Le taux de réduction du rayonnement par la canopée varie selon les types ou les espèces des arbres. Au jardin de Mermed (PT06) par exemple, le rayonnement solaire sous un grand eucalyptus est diminué de 87.7 % par rapport au point ensoleillé (PT05). Celui mesuré sous un casuarina adulte est réduit de 88.4 % (PT 05) (voir images dans le tableau 1, en annexe). Dans la rue Ibn-Sina le taux de réduction du rayonnement solaire sous la canopée d'un tamaris va jusqu'à 91.2 % (PT16) (voir images dans le tableau 1, en annexe). Au niveau du boulevard 1<sup>er</sup> novembre (PT17) sous la haute canopée d'un palmier dattier l'atténuation du rayonnement solaire atteint 83 %. On voit bien que le choix des espèces d'arbres peut être un élément important de confort en ville.

Tableau 2. Le rayonnement solaire dans différents sites à 14:30 h

Point de mesure	Description	Rayonnement (W/m <sup>2</sup> )
PT 01	Moussalla Moustadjeb	959
PT 02	Le Registre de commerce	951,5
PT 03	Le Camping M'zab	931,66
PT 05	Jardin Mermed sous la canopée d'un eucalyptus*	120
PT 05 bis	Jardin Mermed sous la canopée Casuarina*	113,33
PT 06	Jardin Mermed (Max)	<b>974,66</b>
PT 07	Rue Zoubiri	922
PT 09	Boulevard Didouche Mourad	937
PT 11	La place 1 <sup>er</sup> mai (face à la CNAS)	940
PT 12	La CNAS sous la canopée d'un groupe d'eucalyptus*(Min)	<b>64</b>
PT 15	Rue IbnSina	949
PT 16	Rue IbnSina sous la canopée des tamarix*	103
PT 17	Boulevard 1 <sup>er</sup> novembre	940
PT 17 bis	Boulevard 1 <sup>er</sup> novembre sous le feuillage du palmier*	160

(\*) indique que les mesures sont prises à l'ombre de la végétation.

#### **Variation nocturne (00:00h et 05 :00h)**

D'après la figure 8, on constate une homogénéité dans les températures des sites durant la nuit. L'écart est plus faible qu'en journée. À minuit, l'îlot de chaleur le plus intense est enregistré dans la ruelle de ksar (PT14) : 2.1°C. En revanche, au niveau du pont

(PT10) sur l'oued, on relève un îlot de fraîcheur de  $0.6^{\circ}\text{C}$  par rapport au site de référence. La prise de mesure dans ce site est effectuée sur 7 mètres au-dessus du niveau du lit de l'oued. Ce point de mesure connaît des vitesses de l'air élevées, de jour comme de nuit (figure 10). Durant la nuit, le vent est de direction ouest, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement de l'eau dans l'oued. D'après les figures 2 et 3, ce vent souffle depuis la palmeraie de Ghardaïa située en amont de l'oued M'zab. La température la plus haute à cette heure est relevée dans le ksar (PT14) :  $36.5^{\circ}\text{C}$ . Pour le boulevard Didouche Mourad, le (PT08) situé dans la galerie présente une température plus élevée de  $0.75^{\circ}\text{C}$  par rapport au point (PT09) situé dans un espace ouvert à côté du cimetière. La configuration des lieux doit être prise en compte dans l'étude des micro-variations.

Les espaces verts connaissent des îlots de chaleur de faible intensité à 00:00 h. Malgré le passage de quatre heures après le coucher du soleil, les sites végétalisés maintiennent une température semblable voire même supérieure au désert environnant. Il convient de signaler que les arbres ne sont irrigués régulièrement que dans le jardin de Mermed. Ainsi, le point (PT05) sous les arbres manifeste en effet un îlot de chaleur de  $0.75^{\circ}\text{C}$  à ce moment-là, alors que le point (PT06) non couvert par une canopée est plus frais de  $0.3^{\circ}\text{C}$ .

A l'aube (05h00) on constate que le site désertique de référence a connu un rythme de refroidissement plus rapide que la ville. Le point (PT08) dans la galerie du boulevard Didouche Mourad affiche un îlot de chaleur maximal de  $2.05^{\circ}\text{C}$ . D'une manière générale, les îlots de chaleur enregistrés à 05:00 h sur l'ensemble des sites sont d'une intensité supérieure aux îlots de chaleur relevés à minuit.

L'effet rafraîchissant maximal de la végétation à l'aube est obtenu dans le jardin de Mermed (PT06), d'une valeur maximale de  $\text{PCI}_{\text{max}}=2.08^{\circ}\text{C}$ . On peut constater cependant qu'au niveau des sites végétalisés du jardin de Mermed et de l'allée Ibn-Sina, les points de mesure situés sous les arbres sont les plus chauds ; le (PT05) est plus chaud de  $0.5^{\circ}\text{C}$  que le point (PT06). Tout comme le point (PT16) est plus chaud de  $0.43^{\circ}\text{C}$  que le point (PT15). On voit que la végétation peut aussi être un frein au refroidissement dans certains cas, ce qui revient à penser que la végétation en l'absence de vent conserve la chaleur sous le houppier à cet endroit.

### **Variation de l'humidité relative de l'air**

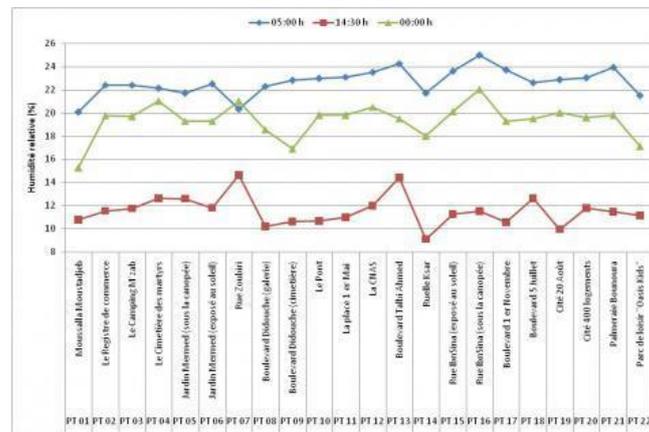
La figure 9 présente le taux d'humidité relative moyen relevé dans l'ensemble des sites durant la campagne de mesure à 05:00 h, 14:30 h, et 00:00 h.

### **Variation diurne (14h30)**

Les mesures de 14:30 h montrent une humidité relative faible pour l'ensemble des sites. Le maximum enregistré se situe au niveau de la rue Zoubiri (PT07) avec un taux de 14.6 %, suivi du boulevard Talbi Ahmed (PT13) avec 14.4 %. La ruelle du ksar présente l'humidité relative la plus faible (9.1 %), inférieure même au site de référence.

Dans les espaces verts, les taux d'humidité sont eux aussi faibles : dans la rue Ibn-Sina l'humidité relative affiche 11.5 % au PT16) et 11.2 % au (PT15), et au jardin de Mermed 12.5 % PT05 et 11.8 % PT06. Le site de référence affiche quant à lui une humidité relative de 10.75 %.

Figure 9. Humidité relative de l'air des sites de mesure



### Variation nocturne (00:00h et 05:00h)

À minuit, les sites urbains affichent des taux d'humidité relativement plus élevés par rapport au désert. Le point de mesure (PT 16) sous la canopée affiche une humidité légèrement élevée par rapport aux sites dépourvus de végétation. À l'aube, on remarque que tous les sites voient leur humidité s'élever. Le désert enregistre toujours la plus faible valeur par rapport aux sites urbains. Tout comme les mesures de minuit, le point (PT 16) sous la canopée d'Ibn-Sina a le taux le plus élevé (25 %).

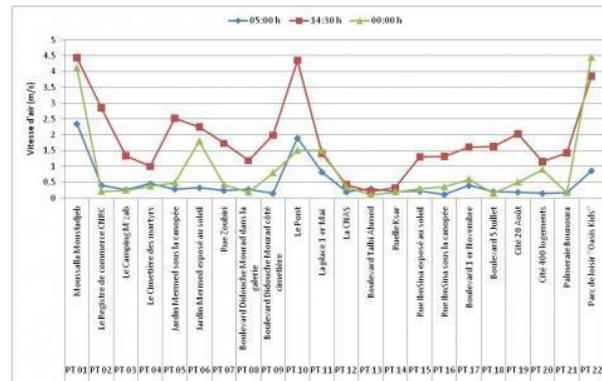
### Variation de la vitesse de l'air

La figure n°10 présente les vitesses du vent moyennes relevées sur l'ensemble des sites. La valeur maximale est de 4,45 mètres par seconde (et un minimum de 0.1 mètre par seconde). On constate que les sites urbains connaissent des vitesses de vent faibles par rapport au désert. Il est à noter que les vitesses de l'air fluctuent énormément pendant la prise de mesure, en particulier dans les sites du centre-ville. D'après la figure 10, les vitesses de l'air à la fin de la nuit sont plus faibles qu'en journée. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les sites de plateaux ou au niveau du pont sur l'oued M'zab, qui favorise la circulation de l'air dans son lit. Au niveau du site de référence, la vitesse moyenne du vent est de 4.43 mètres par seconde ; dans le

parc de loisir (PT 22), elle est de 3.85 mètres par seconde. La vitesse de l'air moyenne au niveau du pont sur l'oued (PT 10) est aussi élevée qu'au niveau du plateau avec une valeur de 4.35 mètres par seconde.

Pendant la nuit, les vitesses de l'air au niveau des sites urbains sont plus faibles que celles enregistrées durant le jour.

Figure 10. Vitesses de l'air des sites de mesure



## Discussion

L'influence des caractéristiques des sites et l'effet de la végétation sur la variation intra-urbaine de la température d'air

### Les écarts de température diurne (14h30)

Les températures élevées enregistrées montrent le niveau du stress thermique que vivent les habitants de Ghardaïa. Si l'on considère tous les sites de mesure, on constate qu'ils ont des comportements thermiques différents par rapport au site de référence ; or, l'élévation de la chaleur en milieu urbain peut être dommageable pour la santé des habitants et les activités économiques (Harlan et al., 2006).

Le site du cimetière des martyrs (PT04) est le point le plus chaud de la ville. Il présente une grande aire asphaltée de couleur noire et présente aussi une très grande ouverture au ciel. L'absence d'ombre et l'exposition à la forte insolation durant des heures participent à l'élévation importante de la température à ce moment de la journée. De plus, il connaît une très grande énergie anthropogénique issue d'une circulation automobile intense et donc la présence d'émissions importante. Sa situation à la limite de la vallée et proche de l'immense chaleur dégagée par le flanc de la colline rocheuse est aussi un élément déterminant dans son comportement thermique (figure n°13 en annexe).

Le deuxième point chaud se trouve sur le boulevard du 1<sup>er</sup> novembre (PT17). C'est l'artère commerciale principale de la ville, elle est connue pour ses embouteillages et sa circulation très intense. Ce boulevard est dépourvu de galeries mais il est garni d'arbres d'alignement, des palmiers dattiers espacés de neuf mètres en moyenne. Les palmiers ne reçoivent pas d'irrigation et offrent une ombre clairsemée. Les façades du boulevard présentent des climatiseurs accrochés un peu partout, ce qui génère une forte chaleur (voir image dans le tableau 1, en annexe). Les bâtiments ont en général deux niveaux, ce qui correspond à une rue à faible profondeur et par conséquent avec un grand ensoleillement. Tous ces facteurs contribuent à réchauffer l'air à cet endroit.

Une autre voie parallèle au boulevard 1<sup>er</sup> novembre, le boulevard de l'indépendance (5 juillet) (PT18), longe l'oued M'zab (voir image dans le tableau 1, en annexe). Cette voie connaît moins de trafic automobile que le boulevard du 1<sup>er</sup> novembre et a beaucoup moins d'activités commerciales. Il est moins chaud de 3°C par rapport au boulevard 1<sup>er</sup> novembre à cause de la plus faible chaleur anthropique et sa grande ouverture au ciel et la proximité de l'oued. Le pont de l'oued (PT10) quant à lui présente une température relativement haute à cause de la très grande circulation automobile à tous moments de la journée car c'est un nœud de circulation entre les deux rives dans la ville.

Si les variations de température sont d'une intensité faible (moins de 1.4°C) dans les autres sites urbains, leurs différences intra-urbaines sont significatives. Le site dans la cité 20 août (PT19) est plus frais de 4.31°C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Cette cité a été réalisée par l'architecte André Ravéreau selon des principes bioclimatiques. Les rues sont toutes brisées et ne sont pas carrossables. Elles sont dotées de passages couverts et de profils profonds. Cette différence de température souligne l'importance de la géométrie des rues dans la protection contre le rayonnement solaire. Des remarques similaires peuvent être retenues dans les sites de la place 1<sup>er</sup> mai (PT11), le registre de commerce (PT02) et la cité 400 logements (PT20) par exemple. Ces lieux sont caractérisés par une grande ouverture au ciel (voir image dans le tableau 1, en annexe).

Le site de la rue Zoubiri (PT07) affiche une différence de 4.39°C par rapport au site du cimetière des martyrs (PT04). Ceci est dû au profil relativement profond de la rue et à son orientation est-ouest qui offre plus d'ombre au milieu de la journée comparée à une orientation nord-sud où elle serait exposée directement à l'irradiation solaire. De plus, la rue Zoubiri (PT07) présente une faible circulation automobile comparée au site du cimetière des martyrs (PT04) donc moins d'énergie anthropique.

Les deux points de mesure dans le boulevard Didouche Mourad (PT 08 et 09) confirment aussi le rôle de l'ombre fournie par la géométrie des rues. Le point (PT09) situé sur le trottoir est plus chaud que le point PT08 qui bénéficie de la protection de la

galerie à arcades. Une observation identique peut être constatée dans le tissu traditionnel au niveau de la ruelle du ksar (PT14) où on enregistre une différence de température de 3.15°C par rapport au site ouvert du cimetière des martyrs (PT04). On voit que l'ouverture au ciel, l'organisation des formes urbaines, leurs orientations ainsi que l'intensité de la circulation sont des clés agissant sur la température de l'air.

L'effet rafraîchissant de la végétation (PCI) est d'une intensité variable d'un site à l'autre, corroborant les résultats de plusieurs auteurs (Ren et al., 2013 ; Oliveira et al., 2011 ; Potchter et al., 2010 ; Bowler et al., 2010). L'effet maximal de la végétation est de 5.61°C (la différence de température PT04 – PT16). Dans le site du camping M'zab et de la palmeraie de Bounoura (PT03 et PT11), l'effet de la végétation n'est pas ressenti malgré la grande densité d'arbres. Les mesures dans ces deux sites ont été prises dans des points à la limite du couvert végétal qui ne sont pas ombragés. Ce constat indique que l'effet modérateur de la végétation durant le jour est dû principalement à l'ombre fournie par la canopée dense des arbres.

D'après les résultats de mesure du rayonnement solaire, le taux de réduction du rayonnement par la canopée varie d'un site à l'autre et selon les types ou les espèces d'arbres. La réduction du rayonnement dépasse les 88%. Ces résultats corroborent ceux obtenus par Kotzen (2003) où sont rapportées des réductions de l'ordre de 90% sous plusieurs espèces dans le désert de Negev. On voit bien que le choix des espèces d'arbres peut être un élément important de confort en ville. Les espèces étudiées (l'eucalyptus, le casuarina, le tamaris et le palmier dattier) réduisent considérablement le rayonnement solaire sous leur frondaison. Ces arbres à feuillage persistant sont bien adaptés au climat de la ville de Ghardaïa : ils nécessitent peu d'entretien et d'irrigation par les services municipaux.

Dans la ville chaude et aride d'Amman en Jordanie, Abdel-Aziz et al. (2015) montrent que les canopées des arbres (*Mimosa* et *Royal Poinciana*) peuvent réduire l'énergie solaire incidente de plus de 200 kilowatts au milieu de la journée en été, bien qu'au cours de celle-ci les taux de réduction varient. Toujours à Amman, Alkhatib et Qrunfleh (2018) affirment que la canopée des arbres (*Cedrus libani* et *Pinus halepensis*) réduit amplement la radiation solaire. Louafi et al. (2017) rapportent une réduction du rayonnement solaire de plus de 85 % sous le feuillage des arbres dans le climat chaud et semi-aride de Constantine en Algérie.

Plusieurs recherches dans d'autres climats ont trouvé des résultats semblables aux valeurs de la présente recherche. Andrade et Vieira (2007) ont enregistré une réduction moyenne du rayonnement solaire de 88 % sous la canopée dense dans un parc à Lisbonne. Georgi et Ziafradis (2006) ont trouvé que le rayonnement est réduit jusqu'à 98 % sous les arbres à Thessalonique. Il en résulte que plus l'arbre a un feuillage

dense, plus il réduit et filtre le rayonnement et offre davantage de confort thermique sous sa canopée.

### **Les écarts de température nocturne (00 :00h et 05 :00h)**

La nuit est marquée par une homogénéité dans les températures des sites avec un écart plus faible par rapport au jour. A minuit l'IFU le plus fort ( $0.6^{\circ}\text{C}$ ) est enregistré sur l'oued (PT10) à cause probablement des courants d'air de direction Ouest (figure 10). D'après la figure 2, le vent souffle depuis la palmeraie de Ghardaïa et permet ainsi une formation d'IFU. Le grand facteur d'ouverture au ciel de ce site favorise aussi le refroidissement nocturne, ce qui explique en partie cette réduction de la température.

La ruelle affiche dans le ksar (PT14) la température la plus haute à cette heure ( $2.1^{\circ}\text{C}$ ). Le profil très profond de cette ruelle empêche la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. De plus la chaleur générée essentiellement par les climatiseurs (voir image dans le tableau 1, en annexe) et les cuisines participe au réchauffement durant la nuit (DeMunck et al., 2013). La même remarque peut être évoquée pour le boulevard Didouche Mourad (PT08) car la galerie couverte maintient la chaleur par rapport au point (PT09) qui lui n'est pas ouvert vers le ciel. D'une manière générale les sites qui ont une grande ouverture au ciel commencent à se refroidir plus rapidement tels que les sites : PT02, PT04, PT11, PT20 et PT 13. Le boulevard 1<sup>er</sup> novembre (PT17) est sensiblement chaud aussi à cette heure à cause des climatiseurs et du trafic qui ne commence à baisser qu'à partir de 23 :00 h (voir image dans le tableau 1, en annexe).

À minuit, les sites végétalisés affichent des températures encore élevées. Le manque d'irrigation réduit l'effet de l'évapotranspiration et ainsi le pouvoir rafraîchissant de la végétation. Si l'ombre de la couronne foliaire des arbres a réduit la température le jour, elle a empêché considérablement le refroidissement de ce point par rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Dans les autres sites végétalisés - le groupe d'arbres de la CNAS (PT12), la rue Ibn-Sina (PT15, PT16) et la palmeraie de Bounoura (PT21) – il n'y a pas de différence significative de température avec le site de référence. Le feuillage des arbres piège la chaleur du jour au sein de la couronne foliaire et entre les branches, ce qui contribue au réchauffement des points de mesure sous la végétation (Chudnovsky et al., 2004).

À la fin de la nuit (05h00), l'intensité de l'îlot de chaleur est plus importante que celle relevée à minuit. Les sites couverts affichent des températures élevées. Le ciel obstrué de certains points rend difficile le refroidissement nocturne. Le désert dégagé à l'extérieur de la ville a profité toute la nuit du rayonnement de grande longueur d'onde vers le ciel pour se refroidir ; le vent a, de plus, favorisé des échanges convectifs importants. En revanche, les sites urbains tardent à perdre l'énergie stockée à cause de

la grande capacité thermique des matériaux de construction, de la géométrie complexe du bâti et de la chaleur anthropique. Si on compare la cité 400 logements (PT20) et la cité 20 août (PT19) (voir image dans le tableau 1, en annexe) par exemple, on remarque que la géométrie de leurs constructions détermine en grande partie leur variation thermique. Si le tissu compact et les ruelles étroites et brisées de la cité 20 août offre davantage d'ombre durant le jour, la cité 400 logements perd plus rapidement sa chaleur durant la nuit grâce à sa grande ouverture au ciel. Ainsi, les sites avec un grand facteur de vue au ciel connaissent en général un rythme de refroidissement nocturne rapide. Si le SVF ne provoque pas une différence importante de la température de l'air, il agit surtout sur la température radiante et affecte ainsi le confort thermique (Venhari et al., 2019).

Le principe de refroidissement par ouverture au ciel est utilisé aussi dans l'organisation de la maison traditionnelle. Dans les habitations du ksar les gens ouvrent le chebek à partir de 18h00 afin de permettre à la chaleur interne de se dissiper (Ravereau, 1981). Le toit plat à faible parapet est un véritable lieu de vie après le coucher de soleil. Du fait de son ouverture au ciel, il perd rapidement sa chaleur par rayonnement nocturne. Le niveau inférieur de la maison étant fermé nécessite plus de temps pour perdre sa chaleur. Les habitants du ksar passent la nuit sur la terrasse pour profiter de la fraîcheur due au refroidissement nocturne vers la voûte céleste. L'architecture savante des maisons à patio reflète l'importance du refroidissement nocturne par l'ouverture au ciel. Les sites urbains à grand SVF dans les extensions en extra-muros agissent de la même manière sur le plan radiatif. Ils présentent plus de confort thermique par rapport aux sites à faible SVF.

Le désert environnant connaît des vitesses de vent plus importantes durant la nuit (figure 10). Le vent faible dans les sites urbains ne permet pas la dissipation rapide de l'énergie à cause d'une part de la rugosité aérodynamique due à la complexité du bâti et de la végétation et d'autre part de la topographie, la ville se trouvant dans une vallée encaissée alors que le site de référence est au niveau du plateau (figure 11). L'effet modérateur de la végétation est faible à l'aube. Les arbres, en effet, maintiennent la chaleur en la piégeant entre le feuillage et le branchage de la couronne foliaire. Ainsi, les points de mesure situés sous la canopée sont plus chauds. Le rôle de l'ouverture au ciel dans le refroidissement des sites est essentiel, alors que l'évapotranspiration ne joue pas un grand rôle à ce moment-là.

### **L'effet de la végétation sur les niveaux d'humidité**

#### **Variation diurne (14h30)**

Les espaces verts ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. La végétation a peu d'influence sur la variation de l'humidité

relative à travers les sites étudiés au milieu du jour. À ce moment de la journée, où les températures sont les plus élevées, les plantes ferment leurs stomates et arrêtent la transpiration afin de ne pas perdre leur réserve en eau, ce qui est appelé la résistance stomatique (Saaroni et al., 2004 ; Dubost, 2002). Plus encore, il n'y a pas de différence notable entre les mesures d'humidité effectuées sous la canopée des arbres et celles effectuées à ciel ouvert au sein même de l'espace vert (Si l'analyse était exprimée en pression de vapeur d'eau les valeurs seraient certainement plus nuancées (Ibsen et al., 2021 ; Puliafito et al., 2013 ; Givoni et Saaroni, 2003). Il n'existe pas de plans d'eau ni de fontaine dans la ville de Ghardaïa, et que l'oued est un cours d'eau sec. L'eau est une ressource rare dans le désert.

Dans la zone étudiée, les arbres ne sont pas irrigués, sauf dans le jardin de Mermed où ils reçoivent un peu d'irrigation le soir. Les arbres adultes et matures peuvent puiser l'eau en profondeur dans le fond de la vallée pour survivre.

Un autre paramètre est que la plupart des arbres sont de type xérophytique, tel que le tamaris et le palmier dattier, ou bien adaptés à la sécheresse de la région, comme le ficus, le casuarina ou l'eucalyptus. La vallée en forme de cuvette est relativement protégée du vent (qui a un pouvoir desséchant) et les arbres ont plus d'aptitude à surmonter l'été. Dans une étude antérieure réalisée à Ben-Isguen dans la vallée du M'zab, une humidité relative très faible, même au sein de la palmeraie (9 % en moyenne), a été relevée, et ce pendant la période la plus chaude de la journée (Bencheikh et Amieur, 2012). Il en résulte que la végétation, même sous une forme plus dense comme la palmeraie, voit son effet humidifiant baisser considérablement au milieu du jour. Matallah et al. (2020) ont étudié le confort thermique dans la ville de Biskra et sa palmeraie, caractérisée par un climat désertique semblable à celui de Ghardaïa. Ils rapportent des niveaux de stress thermique similaires entre le couvert végétal et les sites bâtis. Les faibles niveaux d'humidité durant le jour ne jouent pas un grand rôle dans l'amélioration du confort thermique. La présence de quelques arbres sous forme d'arbres d'alignement ou d'un petit espace vert a un effet très limité sur l'humidité relative de l'air (Aram et al., 2019 ; Bowler et al., 2010).

Le sol, sec en permanence, ne contribue pas au phénomène d'évapotranspiration et par conséquent n'a pas d'effet sur l'humidité. Le désert au niveau du site de référence affiche une humidité relative de 10.75 %, ce qui est proche des mesures réalisées dans une autre étude effectuée dans la vallée du M'zab en 2006, sur le plateau dénudé en milieu de journée : 7 % d'humidité relative (Bencheikh et Amieur, 2012). La faible humidité laisse place à une grande énergie sensible donc un grand potentiel de réchauffement de l'air.

### **Variation nocturne (00 :00h et 05 :00h)**

À minuit, l'écart d'humidité, bien que modeste, peut aller jusqu'à 7 % entre les sites urbains et le désert. Les sites des plateaux, le point de référence Moussalla Moustadjeb (PT 01) et le parc de loisirs (PT 22), ont des valeurs proches, ce qui indique que la topographie et l'altitude jouent un rôle dans la variation de l'humidité, en partie à cause des vitesses élevées du vent au sommet des collines (figure 7).

Même à quatre heures du coucher du soleil, il n'y a pas de grande différence d'humidité entre les espaces verts et les autres sites urbains. Le jardin Mermed (PT16) sous la canopée affiche une humidité légèrement plus élevée par rapport aux sites dépourvus de végétation. L'absence d'irrigation, la nature xérophytique des arbres et l'effet du vent jouent un rôle certain en ville. Dans le cas d'espaces verts denses, comme le camping M'Zab (PT03) et la palmeraie Bounoura (PT21), on note l'effet humidifiant de la végétation essentiellement au centre du couvert végétal dense où l'évaporation à partir du sol et la transpiration des arbres se combinent pour élever l'humidité relative.

À l'aube, l'humidité relative des sites s'élève. Le désert enregistre toujours la plus faible valeur par rapport aux sites de la ville. Dans les sites végétalisés, il n'y a pas d'effet localisé de la végétation ; l'évapotranspiration y est toujours faible. En effet, une simple brise peut rapidement occulter la différence d'humidité générée par la transpiration des arbres à travers le mixage et le brassage de l'air. Tous ces facteurs expliquent les faibles taux d'humidité et leur légère variabilité entre sites.

### **Le rôle de la vitesse de l'air dans les écarts de température et d'humidité**

Durant le jour, la forte irradiation du soleil réchauffe considérablement la surface du désert, ce qui crée des gradients thermiques verticaux provoquant de grandes turbulences et mixages entre les différentes couches de l'air (Ao et al., 2017 ; Warner T. T., 2009). Les points de mesure situés au sommet des collines affichent les vitesses de l'air les plus élevées (PT 01 et PT 22). Dans le désert environnant il n'y a pas beaucoup d'obstacles, les vents balayent la surface du sol plus librement. Sebti et al. (2013) enregistrent des vitesses jusqu'à 4 mètres par seconde à l'extérieur de la ville de Ouargla (Algérie) durant la nuit. En revanche, la ville en contrebas est relativement protégée du vent. De plus, la complexité géométrique des bâtiments, les aménagements urbains et la végétation créent une forte rugosité aérodynamique.

L'oued (PT 10) se présente quant à lui sous forme d'un long canyon délimité par les murs de protection des berges et les façades des bâtiments qui le longent. La vitesse moyenne au niveau du pont sur l'oued (PT10) est aussi élevée qu'au niveau du plateau avec une valeur de 4.35 mètres par seconde. L'effet de canalisation accélère le vent dans le canyon de l'oued. Les sites urbains enregistrent des vitesses de l'air faibles durant la nuit. Il se trouve que l'altitude et la topographie conditionnent largement la

variation de la vitesse de l'air entre les sites urbains et le désert. Ceci a un impact sur la distribution et la variation des températures et de l'humidité entre le désert et la ville, et entre les sites de la ville.

Ces résultats indiquent que la température dans la zone d'étude n'a pas le temps de se refroidir. Le niveau extrême d'inconfort durant le jour ne fait que baisser pendant la nuit sans jamais atteindre un niveau de confort. L'air étant très chaud, la température minimale reste au-dessus des 30°C. Le vent ne participe pas au confort, bien au contraire : le corps humain reçoit plus de chaleur par convection. Les habitants de ces régions boivent plusieurs litres d'eau jour et nuit. Les fortes chaleurs du jour font que l'air et les matériaux de la ville sont chauffés intensément et les heures de la nuit ne suffisent pas pour perdre toute la chaleur accumulée. Les climatiseurs (figure n°12 en annexe) fournissent un surplus de chaleur à l'atmosphère déjà surchauffée.

### **Conclusion**

La recherche avait pour objectif l'analyse des variations microclimatiques intra-urbaines dans la ville de Ghardaïa en été, et l'étude de l'effet de la végétation. La période de mesure a été caractérisée par des conditions anticycloniques stables. Les températures et les taux d'humidité de l'air sont représentatifs du climat de la ville en été. L'amplitude thermique quotidienne (l'écart entre la température minimale et maximale) est de 15°C. La température minimale nocturne est supérieure à 30°C, bien au-delà de la limite du confort thermique. L'écart maximal de température entre sites avoisine les 6°C. La différence de température entre les sites urbains (dépourvus de végétation) atteint 4.39°C. Cette différence est due principalement à l'ombre fournie par la géométrie des rues et leur orientation.

Le comportement thermique des sites varie entre îlots de chaleur et îlots de fraîcheur. Plusieurs îlots de chaleur ont été décelés à travers la ville : il s'agit donc plutôt d'un « archipel » de chaleur que d'un îlot de chaleur urbain unique. L'intensité maximale de l'îlot de chaleur est de 2.98°C. Les îlots de fraîcheur les plus intenses ont été enregistrés au niveau des espaces verts, jusqu'à 2.62°C. Quant aux différences intra-urbaines, elles sont liées à la présence de végétation qui produit un effet rafraîchissant maximal de 5.61°C (enregistré entre le site du cimetière des martyrs et l'allée Ibn-Sina). Les résultats de mesure aux abords immédiats du couvert végétal (le camping M'zab et la palmeraie de Bounoura) montrent que l'effet de végétation diminue brusquement à la limite de l'espace vert. Ceci peut s'expliquer par le taux de réduction du rayonnement solaire dû à la canopée. Celui-ci varie selon les espèces des arbres. Sous un grand eucalyptus, il est atténué de 87.7 %, et sous un casuarina de 88.4 %. Sous les tamarix, la filtration va jusqu'à 91.2 %. Il en résulte que plus le feuillage de l'arbre est dense, plus il réduit le rayonnement. Ces résultats sont en concordance avec d'autres études (Alkhatib et Qrunfleh, 2018 ; Louafi et al., 2017 ; Abdel-Aziz et al.,

2015 ; Zhang et al., 2013 ; Andrade et Vieira, 2007 ; Georgi et Ziafradis, 2006 ; Kotzen, 2003 ; Heisler, 1986).

Durant la nuit, le profil très profond des rues empêche la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée durant le jour. De plus la chaleur anthropique, générée notamment par des climatiseurs et la circulation automobile, participe au réchauffement. Le désert environnant connaît un rythme de refroidissement plus rapide que la ville. A l'aube, la ville affiche un îlot de chaleur maximal de 2.05°C. Les sites urbains tardent à perdre leur énergie stockée à cause de la grande capacité thermique des matériaux de construction, de la géométrie complexe du bâti et de la chaleur anthropique. Si les sites compacts et les ruelles étroites et brisées offrent davantage d'ombre durant le jour, les sites ayant une grande ouverture au ciel perdent plus rapidement leur chaleur durant la nuit. Ainsi, les sites avec un grand facteur de vue au ciel connaissent en général un rythme de refroidissement nocturne rapide. Si les principaux résultats sont conformes avec ceux de l'étude de Kitous et al. (2012) sur la ville de Ghardaïa, la complexité des sites de mesure et leur variabilité rendent difficile une comparaison fine des résultats, notamment pour les températures de l'air.

Si l'ombre de la couronne foliaire des arbres a réduit la température le jour, elle empêche considérablement le refroidissement par rayonnement de grande longueur d'onde vers la voûte céleste. Le feuillage et le branchage de l'arbre piègent la chaleur du jour et contribuent au réchauffement de l'air sous la canopée. L'effet rafraîchissant maximal de la végétation à l'aube est de 2.08°C. L'évapotranspiration, très minime, ne contribue pas efficacement à ce rafraîchissement. Les sites végétalisés ne manifestent pas de différence significative d'humidité par rapport aux autres sites urbains. De ce fait, la végétation a peu d'influence sur la variation de l'humidité relative à travers les sites étudiés au milieu du jour, à cause, d'une part, du phénomène de la résistance stomatique, et d'autre part à cause du caractère xérophytique des arbres (Chow et Brazel, 2012 ; Saaroni et al., 2004 ; Dubost, 2002).

Le désert environnant connaît des vitesses de vent plus importantes durant la nuit. Le vent faible dans les sites urbains ne permet pas la dissipation rapide de l'énergie à cause de la rugosité aérodynamique due à la complexité du bâti et de la topographie. En termes de planification urbaine, plusieurs recommandations peuvent être avancées. Un couvert végétal urbain plus dense pourrait améliorer les conditions de confort en ville. Il serait donc judicieux de densifier les espaces verts pour en créer une « ville-oasis ». Le choix d'arbres adaptés au climat, hauts avec une canopée large afin d'ombrager les voies (chaussée et trottoirs) serait bénéfique. En matière d'espèces végétales, il est ainsi recommandé de choisir des plantes de types « xérophytiques » pour faire face à la pénurie d'eau. Les espèces étudiées (l'eucalyptus, le casuarina, le tamaris et le palmier dattier) présentent une bonne efficacité de consommation d'eau d'irrigation. Elles sont aussi d'une grande efficacité dans la réduction du rayonnement

solaire sous leur frondaison. Il est recommandé de multiplier la plantation de ces espèces dans les rues et les jardins afin d'offrir le maximum d'ombre.

Les zones de développement futur devraient prévoir des tissus compacts reprenant les caractéristiques locales de construction. Il faudrait aussi éviter les vastes aires asphaltées ou pavées de couleur sombre, et les remplacer par des matériaux de couleurs claires diminuant l'accumulation de la chaleur. Un autre volet de recommandations couvre la mobilité, en limitant la circulation en centre-ville et en favorisant une mobilité douce (transports en commun et circulation verte en vélo).

Nous adressons nos remerciements aux services de la ville de Ghardaïa pour l'autorisation donnée pour la campagne de mesure.

## Bibliographie

Abdel-Aziz, D. M., A. Al-Shboul et N. Y. Al-Ku, 2015, Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption – The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate, *American Journal of Environmental Engineering* 2015, 5, 5, pp. 131-140.

Adad, M. C., M. T. Mazouz, 2013, Les anciens et nouveaux ksour : étude comparative, cas du m'zab, *Courrier du Savoir*, 16, pp. 77-87.

Akbari, H., D. M. Kurn, S. E. Bretz et J. W. Hanford, 1997, Peak power and cooling energy savings of shade trees, *Energy and Buildings*, 25, 2, pp. 139-148.

Akbari, H., M. Pomerantz et H. Taha, 2001, Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Solar Energy*, 70, 3, pp. 295-310.

Alcoforado, M.J., A. Matzarakis, 2010, Planning with urban climate in different climatic zones, *Geographicalia*, 57, pp. 5-39.

Alkhatib, L. M. S., M. M. Qrunfleh, 2018, Plants as an Element in Microclimate Modification in Jordan Landscape Courtyard Gardens, *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 14, 1, 2018.

Andrade, H., R. Vieira, 2007, A climatic study of an urban green space: the Gulbenkian park in Lisbon (Portugal), *Finisterra*, xlii, 84, pp. 27-46.

Ao, Y., J. Li, Z. Li, S. Lyu, C. Jiang et M. Wang, 2017, Relation between the Atmospheric Boundary Layer and Impact Factors under Severe Surface Thermal Conditions, *Advances in Meteorology*, 2017, ID 8352461, 12 p.

Aram, F., E. H. García, E. Solgi et S. Mansournia, 2019, Urban green space cooling effect in cities, *Heliyon* 5, 2019 e01339, [En ligne] URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019300702>

Arnfield, A., 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, pp. 1–26.

- Bacci, L., M. Morabito, A. Raschi et F. Ugolini, 2003, Thermohygro-metric conditions of some urban parks of Florence (Italy) and their effect on human wellbeing. *Proceedings of "Fifth International Conference on Urban Climate"*, 1-5 September Lodz, Poland.
- Barradas, V. L., 1991, Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of Mexico City, *International Journal of Biometeorology*, 35, pp. 24-28.
- Baker, L. A., A. J. Brazel, A. J., N. Selover, C. Martin, N. McIntyre, F. Steiner, F., A. Nelson et L. Musacchio, 2002, Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): Impacts, feedbacks and mitigation, *Urban Ecosystems*, 6, pp. 183-203.
- Ben Shalom, H., O. Potchter et H. Tsoar, 2009, The effect of the urban heat island and global warming on thermal discomfort in a desert city- the case of Beer Sheva, Israel, *The seventh International Conference on Urban Climate*, 29 June – 3 July 2009, Yokohama, Japan.
- Benyoucef, B., 2010, *Le M'Zab parcours millénaire*, Éditions ALPHA, Alger, 253 p.
- Besancenot, J.P., 2013, La ville à l'épreuve du milieu aride et semi-aride. Article introductif, *Secheresse*, 24, pp. 159-163.
- Bouchair, A., 2004, Decline of urban ecosystem of Mzab valley, *Building and Environment*, 39, pp. 719-732.
- Bouchahm, Y., F. Bourbia et A. Belhamri, 2011, Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate, *Renewable Energy* 36, pp. 898-906.
- Boukhabla, M., D. Alkama et A. Bouchair, 2013, The effect of urban morphology on urban heat island in the city of Biskra in Algeria, *International Journal of Ambient Energy*, 34, 2, pp. 100-110.
- Bowler, D.E., L.-M. Buyung-Ali, T.M. Knight et A. S. Pullin, 2010, A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments, *BMC Public Health*, 10, 456, [En ligne], URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20684754/>.
- Brazel, A. J., N. Selover, R. Vose et G. Heisler, 2000, The tale of two cities: Baltimore and Phoenix urban LTERs, *Climate Research*, 15, 2, pp. 123-135.
- Brown, M.J., C.S.B. Grimmond, 2001, Sky view factor measurements in downtown Salt Lake City – Data report for the DOE CBNP URBAN Experiment, Oct. 2000, *Internal Report, March, 2001*, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, LA-UR-01- 1424, 44 p.
- Cadot, E., A. Spira, 2006, Canicule et surmortalité à Paris en août 2003, Le poids des facteurs socio-économiques, *Espace urbain et santé*, 2-3, pp. 239-249.
- Chebli, M., S. Charfi et S. Dahech, 2020, Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019, *Climatologie*, 17, 4, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.1051/climat/202017004>.
- Chen, D., H.W. Chen, 2013, Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010, *Environmental Development*, 6, pp. 69–79.

- Chow, W. T. L., R. L. Pope, C. A. Martin et A. J. Brazel, 2010, Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts, *Theoretical and Applied Climatology*, 103, 1–2, pp. 197-211.
- Chow, W. T. L., A. J. Brazel, 2012, Assessing xeriscaping as a sustainable heat island mitigation approach for a desert city, *Building and Environment*, 47, 1, pp. 170-181.
- Chudnovsky, A., E. Ben-Dor et H. Saaroni, 2004, Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements, *Energy Building*, 36, pp. 1063-1074.
- Correa, E.N., C. Rosa et G. Lesino, 2006a, Impact of urban design strategies on the urban climate in arid regions. The case of Mendoza's Metropolitan Area, in Argentina, *Proceedings 'Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in arid and hot regions?'* Ghardaïa, Algeria, 9-12 December.
- Correa, E., C. Martínez, G. Lesino, C. de Rosa et A. Cantón, 2006b, Impact of urban parks on the climatic pattern of Mendoza's metropolitan area, in Argentina, *The 23<sup>rd</sup> conference on passive and low energy architecture*, PLEA Geneva, Switzerland.
- Côte, M., 2005, *La ville et le désert, le bas Sahara algérien*, Karthala, Paris. 306 p.
- DeMunck, C., G. Pigeon, V. Masson, F. Meunier, P. Bousquet, B. Tréméac, M. Merchat, P. Poëuf et C. Marchadier, 2013, How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33, pp. 210-227.
- Dialesandro, J. M., S. M. Wheeler et Y. Abunnasr, 2019, Urban heat island behaviors in dryland regions, *Environmental Research Communication*, 1, 8, [En ligne] URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ab37d0/meta>
- Dimoudi, A., M. Nikolopoulou, 2003, Vegetation in the urban environment: microclimate analysis and benefits, *Energy and Buildings*, 35, pp. 69-76.
- D.P.A.T., 2005, *Atlas : Annuaire statistique de la Wilaya Ghardaïa*, Direction de la planification et de l'aménagement du territoire de la Wilaya de Ghardaïa.
- Dubost, D., 2002, *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*, Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides, 423 p.
- García-Cueto, O. R., E. Jauregui-Ostos, D. Toudert et A. Tejada-Martínez, 2007, Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use, *Atmosfera*, 20, pp. 111-131.
- García-Cueto, O. R., A. Tejada-Martínez et G. Bojórquez- Morales, 2009, Urbanization effects upon the air temperature in Mexicali, B. C., Mexico, *Atmosfera*, 22, pp. 349-365.
- Georgi, N.J., K. Zafiriadis, 2006, The impact of park trees on microclimate in urban areas, *Urban Ecosystems*, 9, pp. 195-209.
- Ghribi, M., S. Dahech, 2020, Caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain à Sfax durant la saison chaude (centre-est de la Tunisie), *Climatologie*, 17, 7, [En ligne], <https://doi.org/10.1051/climat/202017007>.

- [Giridharan](#), R., S. [Ganesan](#) et S. S. Y. [Lau](#), 2004, Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong, *Energy and Buildings*, 36, 6, pp. 525-534.
- Givoni, B., 1991, Impact of planted areas on urban environmental quality: A review, *Atmospheric Environment*, 25, pp. 289–299.
- Givoni, B., H. Saaroni, 2003, Predicted sun exposed irrigated lawn temperature, *Fifth International Conference on Urban Climate*, 15 September 2003, Lodz, Poland.
- Guhathakurta, S., P. Gober, 2007, The Impact of the Phoenix Urban Heat Island on Residential Water Use, *Journal of the American Planning Association*, 73, 3, pp. 317-329.
- Hamada, S., T. Tanaka et T., Ohta, 2013, Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas, *Urban forestry & urban greening*, 12, 4, pp. 426-434.
- Harlan, S. L., A. J. Brazel, L. Prashad, W. L. Stefanov et L. Larsen, 2006, Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress, *Social Science & Medicine*, 63, 11, pp. 2847-2863.
- Hao, X., W. Li, 2016, Oasis cold island effect and its influence on air temperature: a case study of Tarim Basin, Northwest China, *J Arid Land*, 8, 2, pp. 172-183.
- Heisler, G.M., 1986, Energy Savings with Trees, *Journal of Arboriculture*, 12, 5, pp. 113-125.
- Hémon, D., E. Jougl, J. Clavel, F. Laurent, S. Bellec et G. Pavillon, 2003, Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France. République Française. Ministère de la santé de la famille et des personnes handicapées, *Institut de veille sanitaire*, Numéro spécial : BEH, 45-46, 76 p.
- [Hidalgo](#), J., [V. Masson](#) et L. [Gimeno](#), 2010, Scaling the Daytime Urban Heat Island and Urban-Breeze Circulation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 5, pp. 889-901.
- Hodul, M., A. Knudby et H.C. Ho, 2016, Estimation of Continuous Urban Sky View Factor from Landsat Data Using Shadow Detection, *Remote Sensing*, 8, 568, [En ligne], <https://doi.org/10.3390/rs8070568>.
- Howard, L., 1833, *The Climate of London*, Reprinted 2007, IAUC edition, 284 p.
- Huang, Y.J., H. Akbari, H. Taha et A. H., Rosenfeld, 1987, The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings, *Journal of Applied Meteorology*, 26, 9, pp. 1103- 1116.
- Fan, C., S.W. Myint, S. Kaplan, A. Middel, B. Zheng, A. Rahman, H.-P. Huang, A. Brazel, et D.G. Blumberg, 2017, Understanding the Impact of Urbanization on Surface Urban Heat Islands—A Longitudinal Analysis of the Oasis Effect in Subtropical Desert Cities, *Remote Sens*, 9, 7, 672, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.3390/rs9070672>.
- Frey, C.M., G. Rigo, E. Parlow et A. Marçal, 2006, The cooling effect of cities in a hot and dry environment. *Global developments in environmental earth observation from space, Proceedings of the 25th EARSeL Symposium, Porto, Portugal, 2005-2006*, pp. 169-174.
- Ibsen, P. C., D. Borowy, T. Dell, H. Greydanus, N. Gupta, D. M. Hondula, T. Meixner, M. V. Santelmann, S. A. Shiflett, M. C. Sukop, C. M. Swan, M. L. Talal, M. Valencia, M. K.Wright et G. D.

- Jenerette, 2021, Greater aridity increases the magnitude of urban nighttime vegetation-derived air cooling, *Environmental Research Letters*, 16, 3, [En ligne] URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abdf8a>
- Jauregui, E., 1991, Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city, *Energy and buildings*, 15, 3, pp. 457-463.
- Kitous, S., 2012, Forme urbaine et environnement thermos-aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien, Thèse de doctorat, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme, Alger, Algérie.
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf et F. Rubel, 2006, World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 3, pp. 259-263.
- Kotzen, B., 2003, An investigation of shade under six different tree species of the Negev desert towards their potential use for enhancing micro-climatic conditions in landscape architectural development, *Journal of Arid Environments*, 55, pp. 231-274.
- Krüger, E., P. Drach et R. Emmanuel, 2018, Atmospheric Impacts on Daytime Urban Heat Island, *Air, Soil and Water Research*, 11, 1-3, [En ligne] URL : <https://doi.org/10.1177/1178622118810201>
- Kurn, D., S. Bretz, B. Huang et H. Akbari, 1994, The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling, Proceedings of the ACEEE, *Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 9, 155, Pacific Grove, CA, August 1994.
- Laille, P., D. Provendier et F. Colson, 2015, Effets du végétal sur le cadre de vie et la santé humaine, *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 47-60.
- Lazzarini, M., Marpu, P.R. et H. Ghedira, 2013, Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas, *Remote Sensing of Environment*, 130, pp. 136-152.
- Li, C., N. Zhang, 2021, Analysis of the Daytime Urban Heat Island Mechanism in East China, *JGR: Atmospheres*, 126, 12, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.1029/2020JD034066>
- Louafi, S., S. Abdou et S. Reiter, 2017, Effect of vegetation cover on thermal and visual comfort of pedestrians in urban spaces in hot and dry climate, *Nature & Technology Journal*, 17, 30, pp. 30-41.
- Makhelouf, A., 2013, The contribution of urban green spaces in the regulation of the microclimate and the improvement of the air quality in cities, *Asian Journal of Current Engineering and Maths* 2, 3, pp.190 - 195.
- Matallah M. E., D. Alkama, A. Ahriz et S. Attia, 2020, Assessment of the Outdoor Thermal Comfort in Oases Settlements, *Atmosphere*, 11, 2, 185, [En ligne], URL : <https://doi.org/10.3390/atmos11020185>
- Mestayer, P.G., Y. Brunet, 2015, Impact de la végétation urbaine sur la qualité de l'air, *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 35-45.
- Middel, A., A. J. Brazel, S. Kaplan et S. W. Myint, 2012, Daytime cooling efficiency and diurnal energy balance in Phoenix, Arizona, USA, *Climate Research*, 54, pp 21-34.

Motazedian, A., P. Leardini, 2012, Impact of green infrastructures on urban microclimates. A critical review, *46th Annual Conference of the Architectural Science Association (ANZAScA)*, Griffith University, Gold Coast.

Nassar, A.K., G. A. Blackburn et J.D. Whyatt, 2016, Dynamics and controls of urban heat sink and island phenomena in a desert city: Development of a local climate zone scheme using remotely-sensed inputs, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 51, pp. 76–90.

Nouibat, B., A. Tacherift, 2007, L'occupation optimale du sol urbain à l'habitation individuelle dans les régions arides, villes maghrébines et orientales, cas d'étude : Bou-Saada, *Sciences & Technologies*, D, 25, pp. 50-64.

Oke, T. R., 1987, *Boundary Layer Climates*, Routledge, 435 p.

Oliveira, S., H. Andrade et T. Vaz, 2011, The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon, *Build. Environ.*, 46, pp. 2186-2194.

O.N.M., 2016, Office national de météorologie, station de Ghardaïa.

O.P.V.M., 2012, (Office de Protection et de Promotion de la Vallée du M'Zab), Guide des sites et monuments historiques de la wilaya de Ghardaïa, ministère de la Culture, Algérie.

Pandit, R., D. N. Laband, 2010, Energy savings from tree shade, *Ecological Economics* 69, pp. 1324-1329.

Pearlmutter, D., P. Berliner et E. Shaviv, 2007, Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert, *International Journal of Climatology*, 27, pp. 1875-1885.

Peel, M., B. Finlayson et T. McMahon, 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, pp 1633-1644.

Potchter, O., Y. Yaakov, L. Shashua-Bar, S. Cohen, J. Tanny, J. et P. Bar-Kutiel, 2010, City Weather: *Meteorology and Urban Design*, pp. 1-13.

Potchter, O., I. H. Ben-Shalom, 2013, Urban warming and global warming: combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel, *Journal of Arid Environment*, 98, pp. 113-122.

Puliafito, S., F. Bochaca, D. Allende et R. Fernandez, 2013, Green Areas and Microscale Thermal Comfort in Arid Environments: A Case Study in Mendoza, Argentina, *Atmospheric and Climate Sciences*, 3,3, pp. 372-384.

Rasul, A., H. Balzter et C. Smith, 2015, Spatial variation of the daytime surface urban cool island during the dry season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from landsat 8, *Urban Climate*, 14 (Part 2), pp. 176–186.

Ravereau, A., 1981, *Le Mzab, une leçon d'architecture*, Paris, Sindbad. 282 p.

Ravereau, A., R. Baudouï, R., P. Potié, Y. Cussey et R. L. Perraudin, 2003, *L'atelier du désert*, Parenthèses éditions, Marseille, France, 192 p.

Ren, Z., X. He, H. Zheng, D. Zhang, X. Yu, G. Shen et R. Guo, 2013, Estimation of the Relationship between Urban Park Characteristics and Park Cool Island Intensity by Remote Sensing Data and Field Measurement, *Forests*, 4, pp. 868-886.

Ringenbach, N., 2004, *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*, Thèse : climatologie et temps, Université Strasbourg I, 167 p.

Rosenzweig, C., W. Solecki, L. Parshall, S. Gaffin, B. Lynn, R. Goldberg, J. Cox et S. Hodges, 2006, Mitigating New York City's heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces, Dans : *Proceedings of Sixth Symposium on the Urban Environment, January 30–February 2, Atlanta, GA*.

Rosheidat, A., H. Bryan et D. Hoffman, 2008, Visualizing Pedestrian Comfort in a Hot Arid Urban Environment Using ENVI-met, SIMBUILD2008, *International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*, University of California, Berkeley.

Roth, M., 2007, Review of urban climate research in (sub) tropical regions, *International Journal of Climatology*, 27, pp. 1859-1873.

Saaroni, H., A. Bitan, E. B. Dor et N. Feller, 2004, The mixed results concerning the 'oasis effect' in a rural settlement in the Negev Desert, Israel, *Journal of Arid Environments*, 58, pp. 235–248.

Saito, I., T. Ishihara et T. Katayama, 1990/91, Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area, *Energy and Buildings*, 15-16, pp. 493–498.

Saudreau, M., P. Kastendeuch, J. Ngao, G. Najjar et T. Améglio, 2015, Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert, *Innovations Agronomiques*, 45, pp. 23-34.

Sebti, M., D. J. Alkama et A. Bouchair, A., 2013, Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement 'Ksar' of Ouargla in southern Algeria, *Frontiers of Architectural Research*, 2, pp. 322–337.

Sharifi, E., A. Ali Soltani, 2017, Patterns of Urban Heat Island Effect in Adelaide: A Mobile Traverse Experiment, *Modern Applied Science*, 11, 4, pp. 1-80.

Shashua-Bar, L., M. E. Hoffman, 2000, Vegetation as a climatic component in the design of an urban street, *Energy and Buildings*, 31, pp. 221-235.

Shashua-Bar, L., D. Pearlmutter et E. Erell, 2009, The Cooling Efficiency of Urban Landscape Strategies in a Hot Dry Climate, *Landscape and Urban Planning*, 92, 3-4, pp. 179-186.

Shiflett, S. A., L. L. Liang, S. M. G. Crum, L. Feyisa, J. G. Wang et D. Jenerette, 2017, Variation in the urban vegetation, surface temperature, air temperature nexus, *Science of the Total Environment*, 579, pp. 495–505.

Sobstyl, J.M., T. Emig, M. J. A. Qomi, R. J. M. Pellenq et F. J. Ulm, 2017, Role of Structural Morphology in Urban Heat Islands at Night Time, *Physical Review Letter*, 120, 108701, May 2017, [En ligne], URL : <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.108701>

Sofer, M., O. Potchter, 2006, The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel, *Theoretical and Applied Climatology*, 85, pp. 81-88.

- Souch, CA., C. Souch, 1993, The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana, *Journal of Arboriculture*, 19, 5, pp. 303-312.
- Spronken-Smith, R. A., T. R. Oke, 1998, The Thermal Regime of Urban Parks in Two Cities With Different Summer Climates, *International Journal of Remote Sensing*, 19, 11, pp. 2085-2104.
- Streiling, S., A. Matzarakis, 2003, Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city: a case study, *J. Arboriculture*, 29, pp. 309-316.
- Taleb, H., D. Taleb, 2014, Enhancing the thermal comfort on urban level in a desert area: Case study of Dubai, United Arab Emirates, *Urban forestry & urban greening*, 13, 2, pp. 253-260.
- Venhari, A.A., M. Tenpierik et M. Taleghani, 2019, The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate, *Journal of Arid Environment*, 166, pp. 68–76.
- Warner, T. T., 2009, *Desert Meteorology*, Cambridge University Press, 620 p.
- Yamamoto, Y., 2006, Measures to mitigate urban heat islands, *Quarterly Review*, Vol. 18, pp. 65-83.
- Yu, C., W. N. Hien, 2006, Thermal benefits of city parks, *Energy and Buildings*, 38, pp. 105–120.
- Zhang, A., Y. Lu et H. Pan, 2013, Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks, *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, pp. 323–329.
- Zoulia, I., M. Santamouris et A. Dimoudi, 2009, Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens, *Environmental Monitoring and Assessment* 156, pp. 275–292.

Nom et Prénom : AMIEUR Rachid



Titre : Impact du couvert végétal sur les ambiances thermiques extérieures dans les zones chaudes et arides. Site d'étude : la ville de Ghardaïa, Algérie

Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en sciences

Spécialité : Architecture

#### Résumé

Les villes contemporaines dans les climats chauds et arides sont soumises à de multiples extrêmes météorologiques tels que les épisodes caniculaires. La vulnérabilité des citoyens aux vagues de chaleur est exacerbée par le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU). La surchauffe urbaine provoque une dégradation de l'ambiance thermique dans la ville saharienne contemporaine. Les niveaux de confort thermique conditionnent largement la pratique et l'usage des espaces extérieurs urbains. La végétation urbaine joue un rôle capital dans le microclimat et contribue à l'amélioration du confort thermique, en particulier dans les milieux désertiques. Ce travail de recherche a pour objectif la caractérisation et la spatialisation de l'îlot de chaleur de l'air et de l'îlot de chaleur de surface dans la ville désertique de Ghardaïa, en période estivale. De plus, il vise la quantification de l'effet de rafraîchissement du végétal urbain et l'évaluation des niveaux de confort thermique dans les espaces extérieurs. Le travail d'investigation s'appuie sur une campagne de mesure *in-situ* des paramètres météorologiques, ainsi que l'utilisation d'images satellitaires. Le travail est axé sur l'analyse des données issues de la campagne de terrain et l'interprétation de la cartographie de l'occupation du sol et des températures de surface associées (LST). Les résultats ont permis de mettre en évidence les variations intra-urbaines de la température d'air et de surface dans la ville de Ghardaïa. Plusieurs facteurs déterminent les conditions thermiques des sites : le facteur de vue au ciel, la présence de la végétation, la chaleur anthropique produite par les climatiseurs et la circulation automobile, l'albédo, etc. Les résultats démontrent des comportements thermiques variés, tout d'abord l'existence d'un « archipel » de chaleur et non pas un îlot de chaleur unique, et un mélange d'îlots de chaleur et d'îlots de fraîcheur. Les résultats sur le confort thermique en ville ont révélé que le stress thermique à Ghardaïa est extrême. Les ambiances thermiques urbaines ne sont pas confortables même la nuit, avec des températures nocturnes supérieures à 30 °C. Le végétal apporte une légère amélioration du confort thermique de 5,25 % par rapport aux sites sans végétation. La télédétection spatiale, particulièrement dans l'infrarouge, s'est révélée être un outil incontournable dans l'étude de la surchauffe urbaine et de l'impact de la végétation sur le microclimat. La superposition de la carte d'occupation du sol avec l'image thermique a permis la spatialisation des îlots de chaleur urbain de surface à Ghardaïa. La ville manifeste un îlot de fraîcheur diurne d'une intensité maximale de 10 °C, tandis que l'effet de rafraîchissement de la végétation s'élève à 15 °C. L'ombre des bâtiments et de la végétation réduit énormément les températures de surface et entraîne la création d'îlots de fraîcheur urbains. L'étude a montré l'existence d'une corrélation négative entre la température de surface (LST) et la végétation et une corrélation positive entre la LST et le bâti et les sols nus. Les espaces verts quant à eux, apparaissent comme des poches de fraîcheur « cool-spot » notamment en journée. Les couverts végétaux de grande taille tels que la palmeraie de Ghardaïa et celle de Ben-Isguen sont de véritables « puits-à-chaleur ». Ils contribuent à l'amélioration de la qualité des ambiances thermiques urbaines au sein de l'agglomération. La carte thermique obtenue montre que le type du tissu urbain, l'albédo et la nature des matériaux de construction influencent directement la LST. L'étude de l'îlot de chaleur urbain de surface en journée via télédétection a complété l'étude de l'îlot de chaleur de l'air mesuré sur le terrain. De même, elle a permis de valider l'impact positif de la végétation.

**Mots-clés :** Îlot de chaleur urbain (ICU), climat chaud-aride, végétation, espace public, confort thermique, Température de surface, Télédétection, Ghardaïa

Directrice de thèse : Djamilia ROUAG SAFFIDINE - Université Constantine 3

Année Universitaire : 2023-2024

