



## THÈSE

Présentée pour obtenir

**LE DIPLÔME DE DOCTORAT LMD**

Spécialité : Architecture

Option : Patrimoine et projet urbain

Par

**BACHIR Nora**

### **La végétation urbaine comme moyen de rafraîchissement et d'atténuation des Ilots de chaleur urbains : Cas de la ville de Mostaganem**

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

<b>Mr.KADI Sid El Mahi Lamine</b>	Professeur	Président	Université de Mostaganem
<b>Mr. MISSOUM Hanifi</b>	Professeur	Examineur	Université de Mostaganem
<b>Mr. ZEROUALA Mohamed Salah</b>	Professeur	Examineur	EPAU- Alger
<b>Mme. KACEMI Malika</b>	Professeur	Examineur	USTO- Oran
<b>Mr. AICHE Messaoud</b>	Professeur	Rapporteur	Université de Constantine 3
<b>Mr. MALIKI Mustapha</b>	MCA	Co-rapporteur	Université de Mostaganem
<b>Mr. Bounoua Lahouari</b> Flight Center	Professeur	Invité	NASA Goddard Space
<b>Mr. Chachour Madjid</b>	MCA	Invité	Université de Mostaganem
<b>Mr. Roubai Chorfi Nabil</b>	MCB	Invité	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2022-2023

*...À mes très chers parents*

*« Les stratégies de rafraîchissement peuvent être résumées en une formule : la ville blanche, verte et bleue ». Serge Salat, De la ville blanche, verte et bleue à la forme urbaine bioclimatique. 2015.*

## Remerciements

Je remercie Allah le Tout-Miséricordieux, le Très-Miséricordieux de m'avoir donné le courage et la patience nécessaires pour mener à terme ce présent travail de doctorat. Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide au cours de mon parcours.

Je remercie tout particulièrement M. Aiche Messaoud, directeur de thèse et professeur au département d'architecture de l'université Constantine 3, ainsi que M. Maliki Mustapha, co-directeur et maître de conférences à l'université de Mostaganem, pour l'accompagnement et le suivi régulier de mes réflexions tout au long de ces cinq années de recherche. Vos conseils m'ont permis de conforter le choix de ma problématique, et vos relectures des chapitres ont sans aucun doute contribué à préciser mon propos. Je vous adresse mes profonds respects.

Je tiens également à exprimer mes remerciements les plus sincères à M. Bounoua Lahouari, directeur adjoint du laboratoire des Sciences de la biosphère NASA Goddard Space Flight Center, qui m'a aidé à franchir toutes les étapes de ma recherche dès les premiers moments. Je vous suis reconnaissante pour tout le temps que vous m'avez accordé et vos précieux conseils. Vous avez donné une dimension appliquée à mon travail dont je suis très reconnaissante.

Je remercie aussi M. Kadi Sid Mahi Lamine, M. Missoum Hanifi, M. Zerouala Mohamed Salah et Mme. Kacemi Malika, qui ont accepté d'examiner cette thèse, ainsi qu'à M. Bounoua Lahouari, M. Chachour Madjid et M. Roubai Chorfi Nabil, qui ont accepté d'être membres invités du jury.

Je voudrais également remercier chaleureusement M. Joseph Negro, membre du laboratoire NASA Goddard Space Flight Center, pour son aide précieuse dans la partie "télédétection" de ma recherche.

Une pensée spéciale va à Mme. Paula Shinzato, de l'Université de Sao Paulo au Brésil, pour ses réponses enrichissantes à toutes mes questions concernant l'outil Envi-met. Je remercie également M. Boukhelkhal Islam, de l'Université de Constantine 3, pour m'avoir initié à ce logiciel.

Je suis reconnaissant envers M. Abderrahmane Hamimed, de l'Université de Mascara, pour ses conseils concernant les campagnes de mesure sur le terrain.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai pu rencontrer lors de mes visites administratives. Dans ce cadre, je remercie Mme. Kessouce Fadila, de la direction de l'environnement de la wilaya de Mostaganem, et ses deux assistantes Amina et Sihem. Je remercie aussi M. Roubai Chourfi Samir et M. Belguendouse Mohamed El Amine, de la direction du Sonelgaz qui m'ont aimablement accueillie dans leur siège, ainsi que tous les membres de la conservation des forêts de la wilaya de Mostaganem, qui n'ont pas hésité à me donner tous les documents nécessaires dont j'avais besoin.

Mes remerciements les plus profonds vont à mes très chers parents. Merci pour votre patience, vos encouragements, vos conseils, votre soutien de tous les instants et votre confiance inconditionnelle. Sachez que sans votre présence, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail. Recevez, Papa et Maman, toute mon affection, ma reconnaissance et mon respect.

À mes chers frères Seddik et Yacine, je veux exprimer toute ma gratitude pour avoir partagé avec vous toutes les étapes de cette thèse. Aucun mot ne peut exprimer la profondeur des sentiments fraternels et d'attachement que j'éprouve envers vous. Que Dieu vous protège et réalise tous vos vœux. Je remercie également mes oncles Saïd et Kamel, qui ont toujours été là pour moi. Une pensée spéciale va à ma belle-sœur, ma nièce Salsabil et mon neveu Mohamed.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux à toute ma famille ainsi qu'à ma copine Tema et sa petite famille pour leur soutien et leur encouragement tout au long de cette thèse.

## Résumé

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) rappelle qu'aujourd'hui, les villes sont en première ligne dans la lutte contre le réchauffement climatique. Selon ces mêmes experts, le réchauffement global de la planète va croître considérablement d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle et s'accompagner de vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses. Cette hausse de température est susceptible d'affecter fortement les villes et participe à l'intensification du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), marqué par des hausses de température dans les centres des villes par rapport à leurs périphéries. Aujourd'hui, ce phénomène représente l'une des conséquences climatiques les plus médiatisées. Dans ce contexte de fortes tensions liées au climat, il est devenu paradoxal de séparer la conception de l'urbain des enjeux du climat. Et pour faire face aux défis d'atténuation des effets néfastes des ICU, les acteurs concernés sont conscients de la nécessité d'adopter des solutions et des stratégies urbaines soutenables impliquant des professionnels et des citoyens.

Parmi les solutions communément envisagées par les villes, la végétation urbaine représente un levier d'action potentiellement efficace. En effet, la végétation, par différents mécanismes, joue un rôle thermorégulateur important dans le microclimat urbain. Plusieurs travaux de recherche ont montré des avancées significatives liées à la végétalisation de la ville pour lutter contre les ICU.

Ce travail de thèse s'intéresse à l'étude de l'effet rafraîchissant de la végétation urbaine et à son rôle dans l'atténuation des ICU dans la ville de Mostaganem, une ville côtière méditerranéenne au nord-ouest de l'Algérie. En effet, l'évapotranspiration et l'ombre portée par la végétation modifient le bilan énergétique urbain à travers des interactions complexes avec le sol et l'atmosphère. L'intérêt principal de cette thèse est d'étudier ces interactions dans un ICU parmi les plus intenses de la ville. Dans ce sens, une localisation des ICU à Mostaganem a été préalablement effectuée par télédétection. Ensuite, une campagne de mesure in situ des paramètres climatiques a été menée à l'aide d'une station météorologique de type PCE-FWS-20 et d'un thermomètre infrarouge de type FLUKE 59 MAX+. Enfin, des simulations des différents scénarios de végétalisation ont été réalisées via le logiciel ENVI-met.

**Mots clés :** Végétation urbaine, îlot de chaleur urbain, télédétection, simulation, Envi-met confort thermique, Mostaganem.

# Abstract

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) recalls that today, cities are on the front line in the fight against global warming. According to these same experts, global warming of the planet will increase considerably by the end of the 21st century and will be accompanied by more frequent and intense heat waves. This temperature rise is likely to strongly affect cities and contributes to the intensification of the urban heat island phenomenon (UHI), marked by temperature increases in city centers compared to their outskirts. Today, this phenomenon represents one of the most publicized climatic consequences. In this context of strong climate-related tensions, it has become paradoxical to separate the conception of the urban from climate issues. And to face the challenges of mitigating the harmful effects of UHIs, the actors concerned are aware of the need to adopt sustainable urban solutions and strategies involving professionals and citizens.

Among the solutions commonly considered by cities, urban vegetation represents a potentially effective lever for action. Indeed, vegetation, through different mechanisms, plays an important thermoregulatory role in the urban microclimate. Several research works have shown significant advances related to the greening of the city to fight against UHIs.

This thesis work focuses on the study of the cooling effect of urban vegetation and its role in UHI mitigation in the city of Mostaganem, a Mediterranean coastal city in northwestern Algeria. Indeed, evapotranspiration and the shade cast by vegetation modify the urban energy balance through complex interactions with the soil and the atmosphere. The main interest of this thesis is to study these interactions in one of the most intense ICUs in the city. In this sense, a location of the ICUs in Mostaganem was previously carried out by remote sensing. Then, an in-situ measurement campaign of climatic parameters was carried out using a PCE-FWS-20 type weather station and a FLUKE 59 MAX+ type infrared thermometer. Finally, simulations of the different vegetation scenarios were carried out using the ENVI-met software.

**Keywords:** Urban vegetation, urban heat island, remote sensing, simulation, Envi-met thermal comfort, Mostaganem.

## ملخص

تشير الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC) إلى أن المدن اليوم تقف على خط المواجهة في مكافحة ظاهرة الاحتباس الحراري. وفقًا لهذه الهيئة، سيزداد الاحتباس الحراري العالمي بشكل كبير بحلول نهاية القرن الحادي والعشرين مرفوقًا بموجات حرارية أكثر توترًا وشدة. ومن المرجح أن يؤثر هذا الارتفاع في درجة الحرارة بقوة على المدينة، ويساهم في تكثيف ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية (UHI)، والتي تتميز بارتفاع درجات الحرارة في مراكز المدن مقارنة بأطرافها. تمثل هذه الظاهرة اليوم واحدة من أكثر عواقب التغيير المناخي انتشارًا. في هذا السياق من التوترات القوية المتعلقة بالمناخ، أصبح من التناقض فصل تصميم المناطق الحضرية عن قضايا المناخ. ولمواجهة تحديات التخفيف من الآثار الضارة لجزر الحرارة الحضرية، تدرك الجهات الفاعلة المعنية الحاجة إلى اعتماد حلول واستراتيجيات حضرية مستدامة تشمل إشراك المهنيين والمواطنين.

من بين الحلول التي تتبناها المدن بشكل شائع، يمثل الغطاء النباتي الحضري وسيلة فعالة محتملة. في الواقع، تلعب النباتات باليات مختلفة دورًا مهمًا في التنظيم الحراري للمناخ الحضري المحلي. أظهرت العديد من البحوث تقدمًا كبيرًا فيما يتعلق باعتماد المساحات الخضراء لمحاربة الجزر الحرارية الحضرية.

تركز هذه الأطروحة على دراسة تأثير التبريد للنباتات الحضرية ودورها في تخفيف الجزر الحرارية الحضرية في مدينة مستغانم. مدينة ساحلية متوسطة في شمال غرب الجزائر. في الواقع، يعمل التبخر والظل الناتج عن الغطاء النباتي على تغيير ميزانية الطاقة في المناطق الحضرية من خلال التفاعلات المعقدة مع التربة والجو. الاهتمام الرئيسي لهذه الأطروحة هو دراسة هذه التفاعلات في واحدة من أكثر جزر الحرارة الحضرية شدة في المدينة. في هذا السياق، قد تم أولاً تحديد مواقع الجزر الحرارية الحضرية في مدينة مستغانم عن طريق الاستشعار عن بعد. بعد ذلك، تم قياس المتغيرات المناخية في موقع البحث بواسطة محطة أرصاد جوية من نوع PCE-FWS-20 ومقياس الحرارة بالأشعة تحت الحمراء من نوع FLUKE 59 MAX+. أخيرًا، تم إجراء عمليات محاكاة لسيناريوهات الغطاء النباتي المختلفة باستخدام برنامج ENVI-me.

**الكلمات المفتاحية:** الغطاء النباتي الحضري، جزيرة الحرارة الحضرية، الاستشعار عن بعد، المحاكاة، الراحة الحرارية، مستغانم Envi-met.

# Sommaire

## INTRODUCTION GENERALE

I.	Contexte général .....	1
II.	L'objet de recherche .....	2
III.	La problématique .....	3
IV.	L'hypothèse de travail .....	5
VI.	La méthodologie de recherche .....	6
VII.	Structure de la thèse .....	7

## CHAPITRE 01 : CADRE THEORIQUE ET ETAT DE L'ART

<b>Introduction .....</b>	<b>11</b>
1.1 Villes sous influence du changement climatique global .....	11
1.2 Ilot de chaleur urbain .....	14
1.2.1 Bilan énergétique des zones urbaines .....	18
1.2.2 Facteurs de formation des ICU .....	19
1.2.2.1 Réduction de la végétation dans les milieux urbains .....	19
1.2.2.2 L'imperméabilisation et propriétés thermiques des matériaux .....	20
1.2.2.3 La forme urbaine .....	22
1.2.2.4 Augmentation des émissions de chaleur anthropique .....	23
1.2.2.5 Climat et géographie .....	23
1.2.3 Le confort thermique extérieur .....	23
1.2.4 Conséquences des ICU en ville et stratégies d'atténuation .....	26
1.3 La végétation, une des stratégies d'adaptation aux ICU .....	28
1.3.1 L'évolution de la présence de la végétation en ville .....	28
1.3.2 Les principales formes du végétal en ville .....	30
1.3.3 Les qualités multiples de la végétation urbaine .....	30
1.3.4 Les grandeurs et les formes de l'arbre en ville .....	32
1.3.5 Effet de la végétation sur le microclimat urbain .....	32
1.3.6 Etat de l'art autour des recherches sur l'effet de la végétation sur le microclimat urbain	37
1.3.7 Quelques exemples des stratégies de végétalisation à travers le monde face au changement climatique .....	41
1.3.7.1 Le patrimoine vert à Montréal .....	41

1.3.7.2	La ville verte de Stuttgart .....	42
1.3.7.3	Plan stratégique de végétalisation de la ville de Genève .....	43
<b>Conclusion.....</b>		<b>43</b>

## **CHAPITRE 02 : MOSTAGANEM, LA VILLE ENTRE CLIMAT MEDITERRANEEN ET VEGETATION**

<b>Introduction .....</b>	<b>46</b>
2.1 Changement climatique et ICU en Algérie .....	46
2.1.1 Changement climatique en Algérie .....	46
2.1.2 Les engagements de l'Algérie pour la lutte contre le changement climatique .....	49
2.1.3 Etudes sur le confort thermique et l'ICU en Algérie .....	51
2.2 Climat de la ville de Mostaganem .....	53
2.2.1 Présentation générale de la ville .....	53
2.2.2 Mostaganem, la ville au climat méditerranéen .....	54
2.2.2.1 La pluviométrie .....	55
2.2.2.2 Les températures .....	58
2.2.2.3 Vent et tempêtes .....	59
2.2.3 Projections futurs du climat de la wilaya de Mostaganem .....	60
2.2.3.1 Les précipitations .....	61
2.2.3.2 Les températures .....	62
2.2.4 Conséquences du changement climatique sur la ville .....	62
2.2.4.1 L'augmentation du nombre de jours de canicule .....	62
2.2.1.2 Conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments .....	64
2.3 Evolution de la place de la végétation à travers le développement urbain de la ville .....	65
2.3.1 La ville précoloniale .....	65
2.3.2 La ville coloniale .....	66
2.3.3 La ville postcoloniale et les nouvelles extensions .....	69
<b>Conclusion.....</b>	<b>74</b>

## **CHAPITRE 03 : ANALYSE PAR TELEDETECTION DE LA PRESENCE DE LA VEGETATION ET LA LOCALISATION DES ICU DE SURFACE DANS LA VILLE DE MOSTAGANEM**

<b>Introduction .....</b>	<b>76</b>
3.1 Les techniques de télédétection .....	76
3.2 La télédétection dans les études urbaines .....	82

3.2.1 L'étude de l'étalement urbain .....	82
3.2.2 La détermination des structures urbaines .....	83
3.2.3 Détermination des surfaces imperméables .....	83
3.2.4 L'étude des ICU.....	84
3.2.5 L'étude de la thermique urbaine .....	85
3.2.6 La détermination de la présence de la végétation en ville .....	85
3.3 La température de surface du sol à partir de la télédétection .....	85
3.4 L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) .....	87
3.5 Application à la ville de Mostaganem : L'analyse de la relation entre la température de surface (LST) et l'indice de végétalisation par différence normalisé (NDVI) .....	89
3.5.1 L'analyse des résultats du LST.....	90
3.5.2 L'analyse des résultats du NDVI.....	94
3.5.3 L'analyse de la relation entre LST et NDVI.....	99
3.5.4 La localisation des ICU de surface en été à Mostaganem .....	100
3.5.4.1 L'ICU choisi pour l'étude des simulations .....	103
<b>Conclusion.....</b>	<b>103</b>

## **CHAPITRE 04 : ENVI-MET, L'OUTIL DE SIMULATION DU MICROCLIMAT**

<b>Introduction .....</b>	<b>105</b>
4.1 Les outils de la simulation numérique du microclimat urbain .....	105
4.1.1 Soléne-microclimat.....	107
4.1.2 TEB – SURFEX .....	108
4.1.3 ENVI-MET .....	109
4.2 Les propriétés du modèle physique d'ENVI-met.....	112
4.2.1 Les équations du flux de vent .....	112
4.2.2 Température et humidité.....	114
4.2.3 La turbulence atmosphérique.....	114
4.2.4 Flux de chaleur radiatifs .....	115
4.2.5 Le modèle du sol.....	116
4.2.6 Le modèle de la végétation .....	116
4.2.7 Le modèle de surface du sol .....	118
4.2.8 La température des surfaces des bâtiments.....	119
4.2.9 Modèle des gaz et des particules .....	121
4.2.10 Fontaines et sprays d'eau.....	121
4.2.11 Le calcul de la température moyenne radiante par ENVI-met .....	123

4.3 le concept du forçage dans ENVI-met .....	124
4.4 Concordance entre des résultats de simulation avec ENVI-met et des données mesurées .....	124
4.5 Recherches sur l'ICU utilisant ENVI-met.....	125
<b>Conclusion.....</b>	<b>127</b>

## **CHAPITRE 05 : LA SIMULATION MICROCLIMATIQUE DE L'ICU DANS UNE PARTIE DE LA CITE EL-HOURIA A MOSTAGANEM**

<b>Introduction .....</b>	<b>129</b>
5.1 Description du site d'étude.....	129
5.2 Campagne de mesure in-situ .....	134
5.3 Le modèle géométrique de base dans ENVI-met.....	134
5.4 Données d'entrée et processus de calibration du modèle.....	138
5.5 l'analyse des résultats de la simulation du scénario de base .....	139
5.5.1 La comparaison entre les résultats d'ENVI-met et les données mesurées .....	139
5.5.2 Les résultats de la température de l'air .....	142
5.5.3 La température de surface du sol .....	144
5.5.4 La température moyenne radiante .....	147
5.5.5 PMV.....	151
<b>Conclusion.....</b>	<b>154</b>

## **CHAPITRE 06 : LES RESULTATS DES SIMULATIONS DE L'IMPACT DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DE LA VEGETATION ET DU CHOIX DES ESSENCES D'ARBRES SUR L'ATTENUATION DE L'ICU DE LA CITE EL-HOURIA A MOSTAGANEM**

<b>Introduction .....</b>	<b>156</b>
6.1 La simulation de l'impact de la distribution spatiale de la végétation sur le microclimat urbain dans une partie de la cité El-Houria à Mostaganem .....	156
6.1.1 La conception de différents scénarios de végétalisation.....	157
6.1.2 Résultat des simulations .....	160
6.1.2.1 La température de l'air.....	162
6.1.2.2 La température moyenne radiante.....	165
6.1.2.3 La température de surface du sol .....	166
6.1.2.4 Paramètre du confort thermique PMV .....	166
6.2 La simulation de l'impact du choix des essences d'arbres d'alignement des rues sur le microclimat urbain dans une partie du quartier El-Houria à Mostaganem.....	169

6.2.1 Le choix des types d'arbres .....	170
6.2.2 La conception des scénarios .....	171
6.2.3 L'analyse des résultats des simulations .....	175
6.2.3.1 Effet de la forme et la taille des arbres sur les rues.....	175
6.2.3.2 Effet sur la température de l'air .....	178
6.2.3.3 Effet sur la température moyenne radiante .....	180
6.2.3.4 Effet sur la température de surface .....	182
6.2.3.5 Effet sur le paramètre du confort thermique P.P.D.....	185
<b>Conclusion.....</b>	<b>187</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>189</b>
<b>Perspectives.....</b>	<b>193</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>194</b>

# Liste des figures

## Chapitre 01

- Figure 1.1** : Evolution de la température moyenne en surface fondées sur des projections multimodèles moyennes pour la période 2081–2100 par rapport à la période 1986–2005, selon les scénarios RCP2,6 (à gauche) et RCP8,5 (à droite). Source : GIEC, 2014..... 13
- Figure 1.2** : Sécheresse en région Méditerranéenne. Les couleurs rouge et orange représentent les endroits autour de la Méditerranée qui ont connu des hivers nettement plus secs durant la période 1971-2010 en comparaison à la période 1902-2010, haute résolution. Source : Hubert., 2015..... 13
- Figure 1.3** : Nombre de nuits tropicales associées à des journées chaudes dans les conditions climatiques présentes et futures. Source : Fischer et Schar, 2010..... 13
- Figure 1.4** : Profil de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée. Source : dans Pigeon et al., 2008, adaptation de T. Oke (1987)..... 15
- Figure 1.5** : (a) Différences des températures de l'air en milieu rural et urbain, (b) les taux de refroidissement et de réchauffement, et (c) l'intensité de l'îlot de chaleur. Source ; dans De Munck Cécile (2013), d'après Oke, 1987..... 16
- Figure 1.6** : Composantes de l'atmosphère urbaine par des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s. Source : dans Ringenbach Nicolas ,2004. D'après Mestayer, Anquetin, 1995..... 17
- Figure 1.7** : Variations des températures de surface et atmosphériques. Source U.S. Environmental Protection Agency. 2008..... 17
- Figure 1.8** : Un bilan d'énergie d'une zone rurale à gauche et d'une zone urbaine à droite, en haut le jour, et en bas la nuit. Source : Pigeon et al., 2008..... 19
- Figure 1.9** : Processus contribuant à la formation d'îlots de chaleur urbains à petite échelle et à l'échelle régionale. Source : Santé Canada, 2020. D'après Voogt, 2010 ; figure reproduite avec la permission du Dr. James Voogt..... 20
- Figure 1.10** : Thermographies IRT et photos des revêtement examinés dans l'étude de Doulos et al., 2004. Source : Doulos et al., 2004 ..... 21
- Figure 1.11** : Phénomène du piégeage radiatif en ville (à gauche) et en zone rurale (à droite). Source : Greuillet et Galsomiés, 2013. D'après : Griffiths, 1976. .... 22
- Figure 1.12** : Variation du PPD selon le PMV. Source : ASHRAE, 2009..... 26
- Figure 1.13** : Les couleurs d'un arbre à travers les différentes saisons. <https://science.howstuffworks.com/nature/climate-weather/atmospheric/climate-change-four-seasons-redefine.htm>..... 31
- Figure 1.14** : Les hauteurs et grandeurs des arbres. Source : Le Gourriérec, 2012, selon Larue, 1996..... 33

<b>Figure 1.15</b> : Phénomène du piégeage radiatif en ville (à gauche) et en zone rurale (à droite). Source : GREUILLET et GALSOMIÈS, 2013. D'après : Griffiths, 1976.....	33
<b>Figure 1.16</b> : Les processus d'évapotranspiration et d'ombre fournis par la végétation. Source : APURE, 2012.....	35
<b>Figure 1.17</b> : Le rôle des stomates des plantes dans la photosynthèse et l'interception des polluants. Source : Brunet, 2016.....	35
<b>Figure 1.18</b> : Schéma du rôle participatif des arbres urbains dans le bilan énergétique des surfaces terrestres urbaines. Sdown est le rayonnement descendant à ondes courtes, Sup est le rayonnement ascendant à ondes courtes, L est le rayonnement à ondes longues, ET est l'évapotranspiration, H est le flux de chaleur sensible, G est le flux de chaleur du sol et AF est la chaleur anthropique. Source : Wang et al 2018.....	36
<b>Figure 1.19</b> : Bilan d'énergie pour une scène végétale (A) et une scène de bâti (B). (E) représente l'évaporation, (Q) les sources internes, et ( $\Delta S$ ) le stockage d'énergie. Source : Brunet, 2016.....	36
<b>Figure 1.20</b> : Mont Royal et centre-ville à gauche. Source : <a href="https://avenues.ca/partir/infos-voyage/15-choses-mont-royal-montreal">https://avenues.ca/partir/infos-voyage/15-choses-mont-royal-montreal</a> . L'intérieur du parc Mont Royal à droite. Source : <a href="https://www.ledevoir.com/societe/587684/le-stationnement-du-mont-royal-de-nouveau-ferme">https://www.ledevoir.com/societe/587684/le-stationnement-du-mont-royal-de-nouveau-ferme</a>	41
<b>Figure 1.21</b> : Espaces verts à Stuttgart. Source : Reuter (2015).....	42
<b>Figure 1.22</b> : Vision stratégique de Genève, Projeter selon les espaces de référence. Source : Daniel Kunzi, blvdr, 2019.....	43

## Chapitre 02

<b>Figure 2.1</b> : Ecart par rapport à la normale des températures des régions : Ouest, Centres, et Est de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : D.Boucherf, ONM Alger 2004.....	47
<b>Figure 2.2</b> : Cartes par rapport à la normale des températures des régions : Hauts plateaux Est et Hauts plateaux Ouest de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : D.Boucherf, ONM Alger 2004.....	47
<b>Figure 2.3</b> : Ecart par rapport à la normale des températures des régions Nord de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : D.Boucherf, ONM Alger 2004.....	48
<b>Figure 2.4</b> : Situation de la ville de Mostaganem. Source : Bachir et al, 2021.....	54
<b>Figure 2.5</b> : Carte climatique sommaire. Source : J. Boulaine « Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie au 1/200.000 ». Feuille de Mostaganem n°21, Pédologie – CS, n°6 Alger, 1955.....	55
<b>Figure 2.6</b> : Les précipitations annuelles de la wilaya de Mostaganem - la station de Mostaganem au cours de la période 1977-2012. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	56

<b>Figure 2.7</b> : Précipitations à l'échelle de la région de Mostaganem entre 1997 et 2013. Source : Megherbi,2015.....	56
<b>Figure 2.8</b> : Evolution saisonnière de la moyenne des précipitations de la wilaya de Mostaganem - la station de Mostaganem au cours de la période 1977-2012. Source : ONM, dans Snouci et Trache. 2014. A : Précipitations hiver (DJF), B : Précipitation Printemps (MAM), C : Précipitations ETE (JJO), D : Précipitations Automne (SON).....	57
<b>Figure 2.9</b> : La crue de l'Oued Ain Séfra de la nuit du 27 Novembre 1927. Source : <a href="https://fr-fr.facebook.com/379416508756013/photos/linondation-de-1927-%C3%A0-tigditil-y-a-de-cela-plus-de-86-ans-la-ville-de-mostaganem">https://fr-fr.facebook.com/379416508756013/photos/linondation-de-1927-%C3%A0-tigditil-y-a-de-cela-plus-de-86-ans-la-ville-de-mostaganem</a> .....	58
<b>Figure 2.10</b> : Evolution des températures moyennes annuelles de Mostaganem. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	59
<b>Figure 2.11</b> : Evolution des températures maximales annuelles de Mostaganem. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	59
<b>Figure 2.12</b> : Evolution des vents et rafales à Mostaganem. Source : Kuhn, 2020 .....	60
<b>Figure 2.13</b> : Les tempêtes ayant affecté Mostaganem entre 1977-2012. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	60
<b>Figure 2.14</b> : Précipitations annuelles simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	61
<b>Figure 2.15</b> : Précipitations saisonnières simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	62
<b>Figure 2.16</b> : Précipitations saisonnières simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.....	63
<b>Figure 2.17</b> : Précipitations saisonnières simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014 .....	63
<b>Figure 2.18</b> : Nombre annuel de jours Tmax>90 percentile et Tmax>95 percentiles pour Mostaganem 1977-2012. Source ONM, dans Snouci et Trache, 2014.....	64
<b>Figure 2.19</b> : Longueur des canicules observées à Mostaganem durant la période 1977-2012. Source : ONM, dans Snouci et Trache, 2014.....	64
<b>Figure 2.20</b> : L'évolution de la consommation électrique de la ville de Mostaganem entre 2014 et 2019. Source : SONELGAZ, siège de Mostaganem.....	65
<b>Figure 2.21</b> : Les trois quartiers de la ville précoloniale de Mostaganem. Fond de carte : <a href="http://alger-roi.fr/Alger/mostaganem/pages/0_petit_plan_mostaganem_texas.htm">http://alger-roi.fr/Alger/mostaganem/pages/0_petit_plan_mostaganem_texas.htm</a> . Elaboration : N. Bachir.....	66
<b>Figure 2.22</b> : L'emplacement du jardin public et la place de la république dans la ville coloniale de Mostaganem. Fond de carte : delcampe.net. Elaboration : N. Bachir.....	68
<b>Figure 2.23</b> : Photos de Mostaganem pendant la période coloniale, à gauche Oued Ain-Sefra, à droite la place de la république plantée d'arbres. Source : photos tirées d'internet.....	68

<b>Figure 2.24</b> : Photos de Mostaganem pendant la période coloniale, à gauche jardin public, à droite vue de loin de la place de la république plantée d'arbres. Source : photos tirées d'internet.	69
<b>Figure 2.25</b> : Photo du centre-ville de Mostaganem en 1935 qui illustre l'alignement d'arbres. Source : photos tirées d'internet.....	69
<b>Figure 2.26</b> : les jardins et les places végétalisées recensé par la direction de l'environnement. Source: Réalisation N,BACHIR selon les données de la direction de l'environnement.....	72
<b>Figure 2.27</b> : Parc et espace vert, terre forestière, et terre agricole selon la révision du PDAU du groupement des communes de Mostaganem, Mazagran, et Sayada. Source: Fond de plan: Révision du PDAU. Mise en forme: N, Bachir.....	73

### Chapitre 03

<b>Figure 3.1</b> : Principe des différents modes d'enregistrement du signal lidar. Source : Ristorcelli,2013.....	81
<b>Figure 3.2</b> : Fonctionnement de la télédétection dans le domaine solaire. Source : Bacour 2001.....	82
<b>Figure 3.3</b> : Le NDVI est une mesure de l'état de santé des plantes basée sur la façon dont la plante réfléchit la lumière à certaines fréquences (certaines ondes sont absorbées et d'autres sont réfléchies). Source : <a href="https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/.....">https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/.....</a>	88
<b>Figure 3.4</b> : Changement de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation. Source : Rafik et Oughriss, 2017, d'après : <a href="http://e-cours.univ-paris1.fr.....">http://e-cours.univ-paris1.fr.....</a>	88
<b>Figure 3.5</b> : Carte d'utilisation/d'occupation des sols de la ville de Mostaganem basée sur l'image LANDSAT 8. Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro .....	89
<b>Figure 3.6</b> : Moyenne saisonnière du LST (du 1er Mars 2014 aux 28 Février 2019). Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro .....	92
<b>Figure 3.7</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2014.....	93
<b>Figure 3.8</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2015.....	93
<b>Figure 3.9</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2016.....	93
<b>Figure 3.10</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2017.....	94
<b>Figure 3.11</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2018.....	94
<b>Figure 3.12</b> : Moyenne saisonnière du NDVI (du 1er Mars 2014 aux 28 Février 2019). Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro. V.....	96

<b>Figure 3.13</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2014 .....	97
<b>Figure 3.14</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2015.....	97
<b>Figure 3.15</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2016.....	97
<b>Figure 3.16</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2017.....	98
<b>Figure 3.17</b> : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2018.....	98
<b>Figure 3.18</b> : En haut la moyenne saisonnière du LST (du 1er Mars 2014 aux 28 Février 2019), et en bas la moyenne saisonnière du NDVI (du 1er Mars 2014 aux 28 Février 2019). Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro.....	99
<b>Figure 3.19</b> : Situation des ilots de chaleur urbain de surface dans la ville de Mostaganem. Source : N.Bachir .....	101

## Chapitre 04

<b>Figure 4.1</b> : En haut, Bilan thermo-radiatif (Musy et al. 2012) ; à gauche, Bilan hydrique (Musy et al. 2012) ; à droite, Processus aérauliques (Musy et al. 2012). Source : Jojo et al., 2015.....	107
<b>Figure 4.2</b> : couplage d'outil de simulation numérique du climat urbain réalisé par SOLENE-microclimat. Source : Morille, 2018.....	108
<b>Figure 4.3</b> : Echange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère dans TEB. Source : Fahed, 2019 .....	109
<b>Figure 4.4</b> : Maillage vertical du domaine 3D d'ENVI-met. Source : Torres, 2014.....	111
<b>Figure 4.5</b> : Disposition de base du modèle ENVI-met. Source : Jin et al., 2017.....	112
<b>Figure 4.6</b> : Schéma montrant les sous-modèles d'ENVI-met. Source : Huttner, 2012.....	113
<b>Figure 4.7</b> : Schéma du nouveau « modèle des 3 nœuds ». Source : Huttner, 2012.....	119
<b>Figure 4.8</b> : Le flux radiatif déterminant la température moyenne radiante. Source : (Matzarakis et al., 2010).....	124
<b>Figure 4.9</b> : Schéma illustrant l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met. Source : Huttner, 2012.....	125
<b>Figure 4.10</b> : le modèle « Energy plus » et le modèle ENVI-met utilisés dans l'étude de Yang et al. (2012).....	126

## Chapitre 05

<b>Figure 5.1</b> : La situation de la zone d'étude dans la ville de Mostaganem, la ligne pointillée blanche représente la cité d'El Houria, la ligne pointillée rouge représente la limite de la zone d'étude.....	130
<b>Figure 5.2</b> : La zone d'étude. A représente une partie de la forêt d'El Houria, et B l'espace central entre les bâtiments de la zone d'étude. Le point rouge représente la localisation de la station météorologique et du thermomètre infrarouge.....	131
<b>Figure 5.3</b> : La foret des Dunes limitant le site d'étude au nord. Source : N. Bachir, 2020 .....	131
<b>Figure 5.4</b> : L'état clairsemé de la forêt des Dunes. Source : N. Bachir, 2020 .....	132
<b>Figure 5.5</b> : L'espace vide au centre du site d'étude. Source : N. Bachir, 2020 .....	132
<b>Figure 5.6</b> : Photographies hémisphériques prises avec une caméra équipée d'un objectif Fisheye 180° et leur emplacement dans le site. Source : N. Bachir, 2020 .....	133
<b>Figure 5.7</b> : Rues à l'intérieur du site d'étude. Source : N. Bachir, 2020 .....	133
<b>Figure 5.8</b> : La station météorologique du type PCE-FWS-20 utilisée lors de la campagne de mesure. Source : N. Bachir, 2020 .....	135
<b>Figure 5.9</b> : Thermomètre infrarouge de type FLUKE 59 MAX+ utilisé pour mesurer la température de surface lors de la campagne de mesure. Source : N. Bachir, 2020.....	135
<b>Figure 5.10</b> : Le model 2D réalisé à l'aide d'ENVI-met. La couleur grise représente les bâtiments, la verte revient à la végétation présente sur site sous forme d'arbre de type pin d'Alep, et représentée dans le model par le type d'arbre : cylindric, small trunk, sparse, with a height of 5m .....	137
<b>Figure 5.11</b> : Le model 3D réalisé à l'aide d'ENVI-met. La couleur grise représente les bâtiments, noire les routes en asphaltes, marron le sol en terre et la verte illustre les arbres .....	137
<b>Figure 5.12</b> : La fonction Albero dans ENVI-met 4.4.5.....	138
<b>Figure 5.13</b> : Le type d'arbre : cylindric, small trunk, sparse, with a height of 5m, utilisé dans le modèle de base.....	138
<b>Figure 5.14</b> : Températures mesurées sur site et simulées pour le scenario de base A) : température de l'air et B) température de surface. Pour la température de surface, les mesures ont été restreintes à cause du Covid19 (confinement imposé de 8h à 16h).....	141
<b>Figure 5.15</b> : Cartes des températures de l'aire diurne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.....	143
<b>Figure 5.16</b> : Cartes des températures de l'aire nocturne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.....	144
<b>Figure 5.17</b> : Cartes des températures de surfaces diurne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.....	145
<b>Figure 5.18</b> : Cartes des températures de surfaces nocturne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.....	146

<b>Figure 5.19</b> : Les valeurs de l'albédo des matériaux (selon le tableau de Parlow,2011) composant la surface du sol du site. Source : N. BACHIR, 2020.....	147
<b>Figure 5.20</b> : Cartes des températures moyennes radiantés diurne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.....	149
<b>Figure 5.21</b> : Cartes des températures moyennes radiantés nocturne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.....	150
<b>Figure 5.22</b> : La distribution des valeurs du FVC à une hauteur de 1,5 m.....	151
<b>Figure 5.23</b> : Cartes des valeurs du PMV diurne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.....	152
<b>Figure 5.24</b> : Cartes des valeurs PMV nocturne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.....	153

## Chapitre 06

<b>Figure 6.1</b> : Le scénario de la forêt (B), réalisé par ENVI-met 4.4.5.....	158
<b>Figure 6.2</b> : Les arbres 3D utilisées dans le scénario de la forêt : à gauche Platanus de 20 m et à droite P.Nigra de 10m .....	158
<b>Figure 6.3</b> : Le scénario des alignements d'arbres (C), réalisé par ENVI-met 4.4.5.....	158
<b>Figure 6.4</b> : Le scénario du parc urbain (D), réalisé par ENVI-met 4.4.5.....	159
<b>Figure 6.5</b> : Les arbres 3D utilisées dans les deux scénarios (C) et (D) : à gauche Platanus de 15 m et à droite Pseudoplatanus de 15m.....	159
<b>Figure 6.6</b> : Le scénario combiné (E), réalisé par ENVI-met 4.4.5.....	160
<b>Figure 6.7</b> : Scénarios réalisés : (A) - Scénario de base, (B) – Scénario de la forêt, (C) – Scénario des alignements d'arbres (D) – Scénario du parc, (E) - Scénario combiné.....	161
<b>Figure 6.8</b> : L'espace en couleur jaune représente la zone sélectionnée pour calculer la moyenne des sorties du modèle. A représente une partie de la forêt d'El Houria, et B l'espace central entre les bâtiments de la zone d'étude.....	162
<b>Figure 6.9</b> : Résultat de la température de l'air à 14h pour : (A) le scénario de base, (B) la différence entre la température de l'air du scénario et la référence : (C) idem (B) mais pour le scénario d'alignement des arbres, (D) idem (B) mais pour le scénario parc, (E) comme (B) mais pour le scénario combiné. L'air chaud sur le bord gauche du domaine dans le scénario de base est dû à l'advection par la brise du nord provenant des habitations résidentielles chaudes en béton.....	164
<b>Figure 6.10</b> : La différence entre la température moyenne de l'air du scénario de base et les trois scénarios de végétation dans la zone sélectionnée.....	166

<b>Figure 6.11</b> : Variation diurne du PMV pour les quatre scénarios par rapport à la référence. La ligne horizontale bleu clair représente la valeur d'inconfort la plus élevée de 3 (voir le texte pour plus de détails).....	169
<b>Figure 6.12</b> : La structure d'un arbre. Source : <a href="https://arbres.grenoblealpesmetropole.fr/801-glossaire.htm">https://arbres.grenoblealpesmetropole.fr/801-glossaire.htm</a> .....	170
<b>Figure 6.13</b> : Scénarios réalisés : (A) - Scénario de base, (B) – Scénario du Populus alba, (C) – Scénario du Robinia pseudo-acacia, (D) – Scénario de Jacaranda mimosifolia.....	175
<b>Figure 6.14</b> : Coupes : A-A, B-B, C-C, réalisées pour les trois scénarios : B, C, D avec les trois types d'arbres choisis.....	177
<b>Figure 6.15</b> : Résultats de la température de l'air à 14h pour le scénario de base (A), le scénario du Populus alba (B), scénario du Robinia pseudo-acacia (C), et le scénario du Jacaranda mimosifolia.....	178
<b>Figure 6.16</b> : La différence entre les moyennes des températures d'aire des scénarios B, C, D et le scénario de base.....	180
<b>Figure 6.17</b> : Résultats de la température moyenne radiante à 14h pour le scénario de base (A), le scénario du Populus alba (B), scénario du Robinia pseudo-acacia (C), et le scénario du Jacaranda mimosifolia.....	182
<b>Figure 6.18</b> : Résultats de la température de surface à 14h pour le scénario de base (A), le scénario du Populus alba (B), scénario du Robinia pseudo-acacia (C), et le scénario du Jacaranda mimosifolia.....	183
<b>Figure 6.19</b> : La différence entre les moyennes des températures de surface des scénarios B, C, D et le scénario de base.....	183
<b>Figure 6. 20</b> : Figure 6. 20 Variation diurne et nocturne du PPD pour les quatre scénarios par rapport à la référence. La ligne horizontale bleu clair représente la valeur d'inconfort la plus élevée de 10.....	185

# Table des tableaux

## Chapitre 01

<b>Tableau 1.1 :</b> Echelle de sensation thermique d'ASHRAE. Source : ASHRAE, 2009.....	24
--	----

## Chapitre 02

<b>Tableau 2.1 :</b> Ecart par rapport à la normale des températures des régions Nord de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : ONM Alger 2004.....	49
--	----

<b>Tableau 2.2 :</b> Résultats obtenus par le modèle MAGICC pour la projection climatique en Algérie à l'horizon 2020. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : ONM Alger 2004.....	49
--	----

<b>Tableau 2.3 :</b> Principales actions d'atténuation par secteurs. Source : Berezowska-Azzag, 2016. D'après : CPDN, Algérie, 2015.....	50
--	----

<b>Tableau 2.4 :</b> Résultats obtenus par le modèle MAGICC pour la projection climatique en Algérie à l'horizon 2020. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : ONM Alger 2004.....	51
--	----

## Chapitre 03

<b>Tableau 3.1 :</b> Les différents satellites météorologiques à orbite quasi polaire et géostationnaire. Source : (Alonso, 2017).....	78
--	----

<b>Tableau 3.2 :</b> Le coefficient de corrélation de Pearson entre LST and NDVI. Source : N.Bachir	100
---	-----

<b>Tableau 3.3 :</b> Les ICU de surface et leurs caractéristiques physiques à Mostaganem durant la période d'étude. Source : N.Bachir.....	102
--	-----

## Chapitre 05

<b>Tableau 5.1 :</b> les valeurs du facteur de vue du ciel (SVF) calculées par la logiciel Rayman à partir des images hémisphériques. Source : N. Bachir.....	132
---	-----

<b>Tableau 5.2 :</b> Les conditions météorologiques initiales prises sur place pendant la campagne de mesure, et utilisé comme données d'entrée pour générer le forçage simple du modèle.....	140
---	-----

<b>Tableau 5.3 :</b> Mesures quantitatives de la performance de la simulation du modèle de base.....	140
--	-----

<b>Tableau 5.4 :</b> Valeurs de réflexion du rayonnement pour différents matériaux. Source : C,Rens, 2012.....	147
--	-----

<b>Tableau 5.5 :</b> Comparaison entre les valeurs du FVC calculées par le logiciel Rayman et simulées par ENVI-met.....	150
--	-----

## Chapitre 06

<b>Tableau 6.1</b> : Température moyenne à 14h et différence entre les scénarios et la ligne de base. La valeur de l'analogique a été obtenue en ajoutant les différences des trois scénarios (voir le texte pour plus de détails).....	165
<b>Tableau 6.2</b> : La différence entre la température moyenne radiante du scénario de base et les trois scénarios de végétation dans la zone sélectionnée.....	166
<b>Tableau 6.3</b> : Nomenclature des arbres urbains et des arbres d'alignement du journal officiel N° 10. Les arbres choisis sont soulignés en jaune. Source : journal officiel N° 10 de la république Algérienne.....	172
<b>Tableau 6.4</b> : Forme des trois arbres choisis et de leurs feuilles.....	173
<b>Tableau 6.5</b> : Les propriétés dans Albéro des arbres utilisés dans les scénarios.....	174
<b>Tableau 6.6</b> : Les moyennes diurnes et nocturnes des températures de l'aires pour tous les scénarios et les différences entre les scénarios B, C, D et le cas de base.....	179
<b>Tableau 6.7</b> : Les moyennes diurnes et nocturnes des températures de surface pour tous les scénarios et les différences entre les scénarios B, C, D et le cas de base.....	184
<b>Tableau 6.8</b> : Les moyennes d'urnes et nocturnes du PPD pour tous les scénarios et les différences entre les scénarios B, C, D et le cas de base.....	186

## Liste des abréviations

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

RCP : Representative Concentration Pathway.

ICU : Ilot de chaleur urbain.

PMV : Predicted Mean Vote.

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied.

PAC : Plan d'action canopée.

GES : Gaz à effet de serre.

PNC : Plan National Climat.

SAU : Surface agricole utile.

ONM : Office national de Météorologie.

PDAU : Le plan directeur d'aménagement et d'urbanisme.

POS : Plan d'occupation du sol.

LST : Land surface température.

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index.

TIROS : Télévision and Infra-Red Observation Satellit.

MSS : Multispectral Scanner System.

EVI : Enhanced Vegetation Index.

NDII : Normalized Difference Infrared Index.

NDWI : Normalized Difference Water Index.

TEB : Town energy balance.

LAD : Leaf Area Density.

SVF : Sky View Factor.

RMSE : Root mean squared error.

MAE : Mean Absolute Percentage Error.

TMR : Température moyenne radiante.

## Nomenclature

Q* : Le flux de rayonnement net	[w.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>LE</sub> : Les flux de chaleur latente	[w.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>H</sub> : Les flux de chaleur sensible	[w.m <sup>-2</sup> ]
ΔQ <sub>S</sub> : Le flux de chaleur stocké dans le sol	[w.m <sup>-2</sup> ]
R <sub>m</sub> : Le flux radiatif	[w.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>c</sub> : Le flux convectif entre le corps et son entourage	[w.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>l</sub> : Le flux de chaleur latente par diffusion de vapeur d'eau au travers de la peau	[w.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>re</sub> : Le flux de chaleur sensible et latente causé par la respiration	[w.m <sup>-2</sup> ]
Q <sub>Tr</sub> : Le flux de chaleur latente causé par la transpiration	[w.m <sup>-2</sup> ]
u <sub>1</sub> , u <sub>2</sub> et u <sub>3</sub> : La vitesse du vent dans les directions x, y et z	[m/s]
K <sub>m</sub> : Le coefficient d'échange local	[W.m <sup>-2</sup> .k <sup>-1</sup> ]
θ <sub>ref</sub> (z) : La température de référence qui est la moyenne des températures des cellules de la grille à un niveau z	[K]
K <sub>q</sub> et K <sub>h</sub> : Le coefficient d'échange d'humidité et de chaleur en régime permanent	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
σ <sub>svf</sub> : Le coefficient lié au facteur de vue de ciel.	-
Q <sub>sw,dir</sub> <sup>0</sup> : Le flux solaire direct initial à courtes longueurs d'ondes.	[w.m <sup>-2</sup> ]
$\bar{T}_f^4$ Et $\bar{T}_{f-}^4$ : La température moyenne de la couche végétale au-dessus de Z(+) et au-dessous de z (-).	[K]
ε <sub>s</sub> , ε <sub>f</sub> : L'émissivité du sol, des murs et du feuillage	-
T <sub>0</sub> : La température surfacique du sol	[K]
Q <sub>lw</sub> : Le flux de rayonnement à ondes longues horizontal des murs environnants	[w.m <sup>-2</sup> ]

$\sigma_B$ : La constante de Stefan-Boltzmann	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]
$\eta$ : L'humidité volumique du sol	[Kg/Kg]
$D_\eta$ : La diffusivité hydraulique	[m/s]
$K_y$ : La conductivité hydraulique du sol	[m/s]
$S_\eta$ : La source additionnelle d'humidité provoqués par les racines des plantes	-
$T_f$ : La température du feuillage	[K]
$q_a$ : L'humidité spécifique de l'air	[Kg/Kg]
$\Delta q$ : La différence d'humidité	[Kg/Kg]
$Q_{cl,net}$ : Le flux radiatif à courte longueur d'onde au niveau de la surface du sol	[w.m <sup>-2</sup> ]
$Q_{gl,et}(T_0)$ : Le flux radiatif à grande longueur d'onde au niveau de la surface	[w.m <sup>-2</sup> ]
$G(T_0)$ : Le flux de chaleur du sol	[w.m <sup>-2</sup> ]
$LE(T_0)$ : Le flux turbulent de chaleur sensible	[w.m <sup>-2</sup> ]
$(T_{0,0})$ : Le flux turbulent de chaleur latente	[w.m <sup>-2</sup> ]
$Q_{cl,et}$ : L'ensemble du flux direct et diffus	[W.m <sup>-2</sup> ]
$a_s$ : L'albédo de la surface	-
$T_v$ : La température surfacique des végétaux	[K]
$T_w$ : La température surfacique des murs.	[K]
$S_s, S_w$ et $s_v$ : Les émissivités des surfaces, des murs et des végétations	-
$h_{c,0}$ : Le coefficient de convection du mur extérieur	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$Q_{cl,net}^{abs}$ et $Q_{gl,net}^{abs}$ : Les flux à courtes et à grandes longueurs d'ondes.	[w.m <sup>-2</sup> ]
$\lambda$ : Le coefficient de transfert de chaleur	[W/mK]
$\Delta x$ : La distance qui sépare deux nœuds	[m]
$c_w$ : La capacité calorifique du mur	[J/(KgK)]
$T_n$ : La température au nœud n à un instant t	[K]
$T_n^*$ : la température au nœud n pour le pas du temps suivant	[K]
$h_{c,0}$ : Le coefficient de convection thermique	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]

$T_i$ : La température de l'air à l'intérieur du bâtiment	[K]
$w_D$ : La quantité d'eau sous forme de gouttelettes dans un volume d'air donné	[g(eau)/ m <sup>3</sup> (air)]
$m_D$ : La masse d'une gouttelette d'eau qui dépend du rayon $r_D$ (μm) de la gouttelette	[mg]
$\mathcal{E}$ : Le facteur de la vue du ciel	-
$Q_{cl,ol}$ : Le flux total des rayonnements à courtes longueurs d'ondes.	[w.m <sup>-2</sup> ]
$Q_{cl-dir,in}$ : Le flux des rayonnements directes entrants à courtes longueurs d'ondes.	[w.m <sup>-2</sup> ]

# INTRODUCTION GENERALE



*« Plus notre vie devient hightech,  
Plus nous avons besoin de nature ». Richard Louv, 2005.*

# Introduction générale

## I. Contexte général

**D**epuis l'ère industrielle, la population urbaine mondiale a considérablement augmenté. Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain, soit 4,2 milliards de citoyens. Selon une estimation, la population urbaine des pays émergents augmentera de 2,5 milliards de personnes d'ici 2050, avec 90% de cette croissance en Afrique et en Asie (Barthélémy, 2020). En Algérie, la proportion de la population citadine est passée de 30% en 1966 à 65% en 2008 (Belguidoum, 2018). Cette évolution démographique est accompagnée d'une croissance et d'un étalement urbain exceptionnels. Toutefois, cette croissance rapide de l'urbanisation dans le monde s'accompagne également de nombreux problèmes environnementaux et met en évidence l'exposition accrue de la population aux effets des climats urbains<sup>1</sup>.

En effet, selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), le réchauffement global pourrait croître de 1,1 à 6,4 °C vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Ce même rapport prévoit une élévation de la température qui pourrait atteindre 4,8 °C entre 2080 et 2100. Dans ce contexte, l'Algérie, appartenant aux zones arides et semi-arides, est considérée comme l'un des pays les plus exposés aux risques de changement climatique selon le rapport de l'université des Nations unies pour l'environnement et la sécurité humaine (UNU-EHS) ; l'alliance développement works de 2014 (Admin, 2015). Face à cette situation de changement climatique global, la ville provoque et subit à la fois un ensemble de phénomènes, dont l'îlot de chaleur urbain représente la manifestation la plus remarquable de l'impact de la ville sur son climat local.

Dans le milieu urbain, et plus précisément dans la couche appelée canopée urbaine qui varie entre le sol et le sommet des immeubles, règne une multitude de microclimats. Ces derniers sont souvent générés par des interactions complexes entre la forme urbaine et le rayonnement solaire d'une part, et la pénétration du vent d'autre part (Salat, 2015). L'ensemble de ces interactions gouvernent l'amplification du phénomène d'ICU.

---

<sup>1</sup> Selon Xavier Foissard (2015), les villes sont caractérisées par leurs dimensions, leurs formes, et leur contexte climatique, ce qui crée différentes particularités, pour cela le mot « Climats urbains » est utilisé en pluriel.

L'ICU, qui représente l'écart positif de température d'air entre le centre urbain et les zones non urbanisées périphériques, engendre de multiples effets sur l'environnement urbain et affecte principalement le confort thermique, la santé des citoyens et la consommation énergétique des bâtiments. Il est particulièrement intense en été. Depuis quelques dizaines d'années, plusieurs études se sont intéressées à l'analyse des ICU. Leurs résultats ont montré que la différence entre la température de l'air des centres villes et des régions rurales environnantes peut atteindre dans certain cas 10 °C. En l'occurrence, Bounoua et al (2015) ont affirmé dans leur étude que les villes avec des zones périphériques boisées comme Washington DC et Atlanta ont des températures de surfaces supérieures à celles des zones environnantes végétalisées durant une grande partie de la journée. Par contre, les villes situées dans des environnements désertiques comme la ville de Phoenix sont plus fraîche de 0,7 °C. Ce rafraîchissement était probablement dû à la végétation importée par les citadins (Bounoua et al., 2015).

Dans ce contexte de hausse de température, l'intensité des ICU est liée à plusieurs facteurs, tels que les activités anthropiques, les formes urbaines, l'inertie des matériaux et aussi l'augmentation de la température due à un changement climatique global. Cependant, un constat est établi : la réduction du taux d'évapotranspiration des végétaux et le remplacement de la végétation dans la ville par des matériaux peu réfléchissants, qui absorbent la chaleur, représente la cause principale de la formation des ICU (Bounoua et al., 2009, 2015). Ce travail de recherche s'inscrit dans cette thématique et tentera de contribuer à mieux connaître les phénomènes physiques complexes, et les paramètres qui commandent les rôles potentiels de la végétation relative à l'atténuation des ICU et à l'amélioration des conditions de confort thermique extérieur en été.

## **II. L'objet de recherche**

La végétation urbaine occupe de multiples fonctions au sein de l'écosystème urbain, et contribue largement à l'atténuation des îlots de chaleur. Elle est souvent considérée comme une stratégie d'adaptation des villes au changement climatique (De Munck, 2013., Redon, 2017), surtout quand la forme urbaine et l'orientation des rues ne peuvent plus être modifiées (Redon, 2017). Et comme l'exprimaient Musy et al. (2014) : plus la ville est verte, moins elle souffre du phénomène d'ICU. En plus de son pouvoir rafraîchissant sur le climat extérieur, la végétation procure également de multiples avantages sociaux-économiques, tels que la création des lieux de cohésion sociale et de loisir, encourageant l'activité sportive, le maintien de la biodiversité, la réduction de l'empreinte carbone des villes, l'attractivité des pôles urbains, etc.

En ville, le végétal se manifeste sous différentes formes telles que les parcs urbains, les jardins publics, les jardins privés, les alignements d'arbres, les haies le long des rues, les coulées vertes, les toits et les façades végétalisées, les squares, etc. Chacune de ces formes a un impact sur le climat urbain à différentes échelles, en fonction de ses caractéristiques radiatives, thermiques, hydriques et aérauliques (Redon, 2017). À titre d'exemple, la végétalisation de l'enveloppe du bâtiment contribue à la réduction de la consommation énergétique. En revanche, un parc urbain de 500 mètres de diamètre peut réduire la température de l'air sur une zone d'environ 500 mètres autour (Brunet, 2016). Ces effets de rafraîchissement liés à la végétation, et plus particulièrement aux arbres, sont dus à la modification des bilans énergétiques et radiatifs. En créant de l'ombre, en absorbant une partie du rayonnement solaire incident et en augmentant l'humidité de l'air par évapotranspiration (Redon, 2017).

Ces dernières années, les villes algériennes, tout comme de nombreuses villes dans le monde, ont enregistré des températures de plus en plus élevées, accompagnées par de longues périodes de canicule pendant l'été (Faci et Matari, 2017). Ce phénomène météorologique extrême a une incidence directe importante sur la santé humaine et d'autres secteurs. Pour faire face à cette situation, la végétalisation des villes se présente comme l'une des solutions les plus avancées.

Le travail que nous entreprenons, s'intéresse à la notion d'atténuation des ilots de chaleur urbains et des températures élevées par la végétation dans un contexte climatique large qu'est le climat méditerranéen, tout en prenant en compte les singularités locales créées par la ville algérienne. Nous avons choisi la ville de Mostaganem comme cas d'étude. De là, nos résultats s'attachent à répondre à la question de départ suivante : **Comment aménager la végétation de manière à obtenir un meilleur rendement d'atténuation des ilots de chaleur urbains à Mostaganem ?**

### III. La problématique

Aujourd'hui, les villes n'échappent pas à l'influence des changements climatiques qui engendrent dysfonctionnements et inconfort. Devant la hausse des températures dans les centres par rapport à la périphérie, il est devenu incontournable de concilier la conception de l'urbain aux enjeux du climat. En effet, pour faire face aux problèmes causés par l'augmentation des vagues de chaleur urbaines, des stratégies d'adaptation et d'atténuation ont fait l'objet de plusieurs recherches par le milieu scientifique. En 1962, une première proposition de recherche sur l'effet rafraichissant de la végétation urbaine a été explorée par Chandler (1962). Depuis, cette thématique a suscité un intérêt considérable en tant que méthode potentielle pour atténuer

les vagues de chaleur en ville (Park et al., 2012 ; Sodoudi et al., 2018). Nombreuses sont les études qui ont prouvé que les espaces verts peuvent réduire la température de l'air ambiant et ajuster l'humidité des zones environnantes (Spronken et Oke, 1998 ; Chang et al., 2007 ; Bowler et al., 2010 ; Bounoua et al., 2015), formant un « effet d'oasis » qui est qualifié comme îlot de fraîcheur urbain (IFU) (Jauregui, 1991 ; Shashua-Bar et Hoffman., 2002 ; Cao et al., 2010 ; Imhoff et al., 2010 ; Bounoua et al., 2015 ; Duarte et al., 2015). L'amplitude de ces IFU dépend largement des propriétés de l'espace vert. Cette corrélation entre les propriétés d'espace vert et amplitude des IFU a été discutée par plusieurs recherches (Jauregui, 1991 ; Chang et al., 2007 ; Spronken-Smith and Oke, 1998 ; Sodoudi et al., 2018). De même pour l'effet rafraichissant par type d'espace vert ; comme par exemple McPherson (1994), Kjellgren et Montague (1998), Spronken-Smith et Oke (1998), Hamada et Ohta (2010), Rahman et al (2011), et Armson (2012) ont étudié l'effet d'arbre sur le microclimat. En revanche, Nichol (1996), Ca et al (1998), et Takebayashi et Moriyama (2009) ont analysé l'effet des sols et pelouses. Aussi Takebayashi et Moriyama (2007), Alexandri et Jones (2008), Feng et al (2010), Pérez et al (2011), Mazzali et al (2013), et De Munck (2013) se sont intéressés à l'impact des toits et des façades végétalisés sur le microclimat. En fin, Oliveira et al (2011), Armson (2012) et de nombreuses autres recherches ont porté sur l'impact climatique des parcs urbains.

En contrepartie, l'effet de la configuration spatiale<sup>2</sup> de la végétation dans le milieu urbain a été très peu manifesté (Sodoudi et al., 2018). Pourtant, Il a été constaté que la configuration spatiale d'une zone verte peut affecter de manière significative l'intensité de l'IFU et l'atténuation des ICU (Patton, 1975 ; Cao et al., 2010 ; Li et al., 2012). Dans ce sens, il est suggéré que des études sur l'influence de la configuration des espaces verts soient menées à l'avenir (Zhang et al., 2009 ; Li et al., 2012 ; Middel et al., 2015). Et pour reprendre les paroles de Musy et al (2014) : « ...Cependant, nous n'avons pas trouvé dans la bibliographie d'étude sur l'impact de la répartition spatiale de la végétation, qui nous permettra de statuer sur un intérêt à regrouper la végétation en grandes surfaces ou au contraire à la disperser ». A partir de ces déclarations et mis à part le travail de Duarte et al (2015), nous n'avons pas trouvé dans la littérature en la matière des études qui s'intéressaient à la notion de l'influence de la configuration spatiale de la végétation urbaine sur le microclimat local. Partons de ce constat, notre recherche a trouvé

---

<sup>2</sup> La configuration spatiale est définie par la forme, l'agencement et la disposition des espaces verts (Wilmers, 1990, Sodoudi et al., 2018).

tout son champ d'investigation et essaye d'apporter d'avantage des éléments de réponse à la thématique de l'effet de la configuration spatiale de la végétation sur le microclimat urbain.

En effet, de par sa situation dans le bassin méditerranéen, l'Algérie est comptée parmi les zones très vulnérables aux changements climatiques et aux catastrophes naturelles (Boucherf, 2010). Au XX<sup>ème</sup> siècle, la hausse des températures a été de l'ordre de 0,74 °C au niveau mondial, cependant celle sur l'Algérie a été comprise entre 1,5 et 2 °C, soit plus du double de la hausse moyenne planétaire (Tabet-Aoul, 2010). Quant à la ville de Mostaganem, La projection de son futur climat prévoit une augmentation de sa température moyenne de l'air de 2,4 °C, et une baisse sur le taux des précipitations de l'ordre de 21%. Une telle augmentation de la température de l'air peut participer dans l'intensification des ICU de la ville, et avoir un effet sur la vulnérabilité des citoyens et sur leur santé.

Les espaces verts dans la majorité des villes algériennes sont présents principalement sous forme de jardins publics et d'alignements d'arbres dans les centres coloniaux. Dans les extensions postcoloniales, ces espaces sont souvent le résultat de certains aménagements, et ne constituent pas un élément fort de la composition urbaine pouvant être renforcé pour faire face aux températures élevées de l'été. Il est donc nécessaire d'introduire la végétation d'une manière correcte et la plus adaptée aux microclimats qui sont créés dans les tissus urbains, pour lutter contre les îlots de chaleur. La ville de Mostaganem ne fait pas exception à cette situation. Avec sa façade maritime, elle possède un potentiel touristique appréciable. L'étude du confort thermique extérieur apporté par la végétation dans la ville peut jouer un rôle important dans l'épanouissement de son identité touristique.

Les limites trouvées dans la littérature en la matière et le constat fait sur la présence de la végétation dans la ville de Mostaganem et sur son climat nous ont mené à poser la question de recherche suivante : **Quelle est la configuration spatiale de la végétation la plus adaptée pour obtenir un meilleur rendement d'atténuation des îlots de chaleur urbains à Mostaganem ?**

#### **IV. L'hypothèse de travail**

Le but de ce travail de recherche est d'étudier, de manière expérimentale, le rôle de la végétation dans l'atténuation des ICU à Mostaganem, pour aboutir à un meilleur confort

thermique extérieur en période estivale. Dans ce cadre, cette recherche repose sur l'hypothèse suivante :

*Une distribution spatiale homogène d'une végétation non stressée (alignement d'arbres le long des rues), accompagnée d'un choix et d'une quantité d'espèces végétales adéquate, joueraient un rôle important dans l'atténuation des îlots de chaleur urbains dans la ville de Mostaganem.*

### **V. Objectif de la recherche**

L'objectif de la présente thèse est de démontrer que la présence d'une végétation soigneusement choisie et répartie (alignée le long des rues), participe à diminuer l'ICU dans la ville de Mostaganem en Algérie. Ce qui permettrait de proposer une configuration spatiale de la végétation, qui maximise l'effet d'atténuation des îlots de chaleur dans la ville. Cette configuration va être accompagnée par des types d'espèces d'arbres ; qui dans un climat méditerranéen offre une importante capacité de dissiper la chaleur par l'évapotranspiration en été. En effet, nous prétendons que nos résultats attendus peuvent être généralisés sur les villes algériennes côtières qui partagent les mêmes caractéristiques physiques et climatiques avec la ville de Mostaganem ; voir même sur d'autres villes du bassin méditerranéen.

### **VI. La méthodologie de recherche**

Le présent travail de thèse est organisé en quatre phases :

1. La première phase concerne une étude bibliographique exhaustive qui nous a permis de dresser un état de l'art et une analyse des publications autour de la thématique étudiée.
2. La deuxième phase consiste à présenter le contexte climatique détaillé de la ville de Mostaganem, ainsi qu'un état des lieux de l'évolution des espaces verts présents dans la ville.
3. Après avoir réalisé un état des connaissances autour du thème et une lecture du contexte climatique de la ville de Mostaganem ainsi que la végétation présente, la troisième phase tente de localiser les ICU dans la ville en se basant sur la technique de la télédétection. Cette étape est préliminaire dans notre démarche. Elle nous a aidé d'une part à détecter les ICU de surface à l'échelle de la ville, qui représentent les points

chauds en été nécessitant une stratégie d'atténuation. Et d'autre part, quantifier la végétation active<sup>3</sup> présente et analyser les températures de surfaces à cette même échelle. Parmi les ICU détectés, un a été choisi pour la réalisation des simulations du rôle de la végétation dans l'atténuation des températures urbaines.

4. Enfin, la quatrième phase comprend la réalisation de la simulation numérique d'un cas d'étude qui représente l'ICU choisi dans la troisième phase, afin d'étudier et confirmer l'hypothèse proposée. Nos simulations sont réalisées en se basant sur l'outil numérique de simulation « ENVI-met ». Cette phase est effectuée en trois parties :
  - Une campagne de mesure in-situ des paramètres microclimatiques de l'ICU étudié.
  - La calibration du logiciel.
  - La réalisation des scénarios de végétalisation et extraction des résultats.

## VII. Structure de la thèse

Le travail de cette thèse s'articule autour des points suivants (figure 1) :

**Le chapitre 01** constitue une étude bibliographique détaillée du phénomène d'ICU : ses causes, ses facteurs, sa genèse, ses échelles et ses conséquences sont développés tout en détaillant la notion du bilan radiatif urbain et du confort thermique extérieur. Ensuite, nous exposerons l'effet de la végétation sur le microclimat et son rôle dans l'atténuation des ICU. Ce chapitre se termine par la présentation de quelques stratégies de végétalisation adoptées par quelques métropoles à travers le monde.

Dans **le chapitre 02** nous aborderons dans une première partie une lecture du climat global de la ville de Mostaganem (pluviométrie, températures, vent et tempêtes) et de son évolution future. En deuxième partie, une analyse de l'évolution de la place de la végétation à travers le développement urbain de la ville est réalisée.

**Le chapitre 03** présente l'analyse des températures de surface LST (Land Surface Temperature) et l'indice de végétalisation par différence normalisé NDVI de la ville de

---

<sup>3</sup> La végétation active est relative à l'activité chlorophyllienne du végétal. Cet indice donne des informations sur la verdure et l'état de la végétation.

Mostaganem à l'aide de la télédétection. Dans ce chapitre, la carte du LST nous a permis de localiser les ICU dans la ville. Vers la fin, un ICU a été choisi comme cas d'étude.

Ce travail de thèse s'appuie sur la simulation numérique du rôle joué par la végétation dans l'atténuation des ICU. L'outil de simulation « ENVI-met » et les sous-modèle physiques de cet outil sont présentés dans **le chapitre 04**. A la fin de ce chapitre, la présentation de quelques études sur l'ICU qui ont utilisé l'outil ENVI-met est exposée.

Dans **le chapitre 05**, nous entamerons la simulation de l'ICU choisi situé dans une partie de la cité EL-Houria à Mostaganem. Tout au long de ce chapitre, nous effectuerons une calibration du logiciel, puis nous analyserons le comportement des paramètres météorologiques diurnes et nocturnes de l'ICU, à savoir la température de l'air, la température de surface, la moyenne radiante et l'indice de confort thermique PMV.

Enfin **le chapitre 06**, et après la calibration du logiciel, porte en premier lieu sur la simulation de l'impact de la répartition spatiale de la végétation urbaine sur le microclimat d'un milieu urbain. Puis en second lieu, nous nous intéresserons à la question de l'effet du choix des espèces d'arbres sur le refroidissement de l'air. Parmi les résultats, les indices PMV et PPD sont analysés afin d'évaluer l'effet de la configuration spatiale et du choix du type d'arbres sur le confort thermique humain.

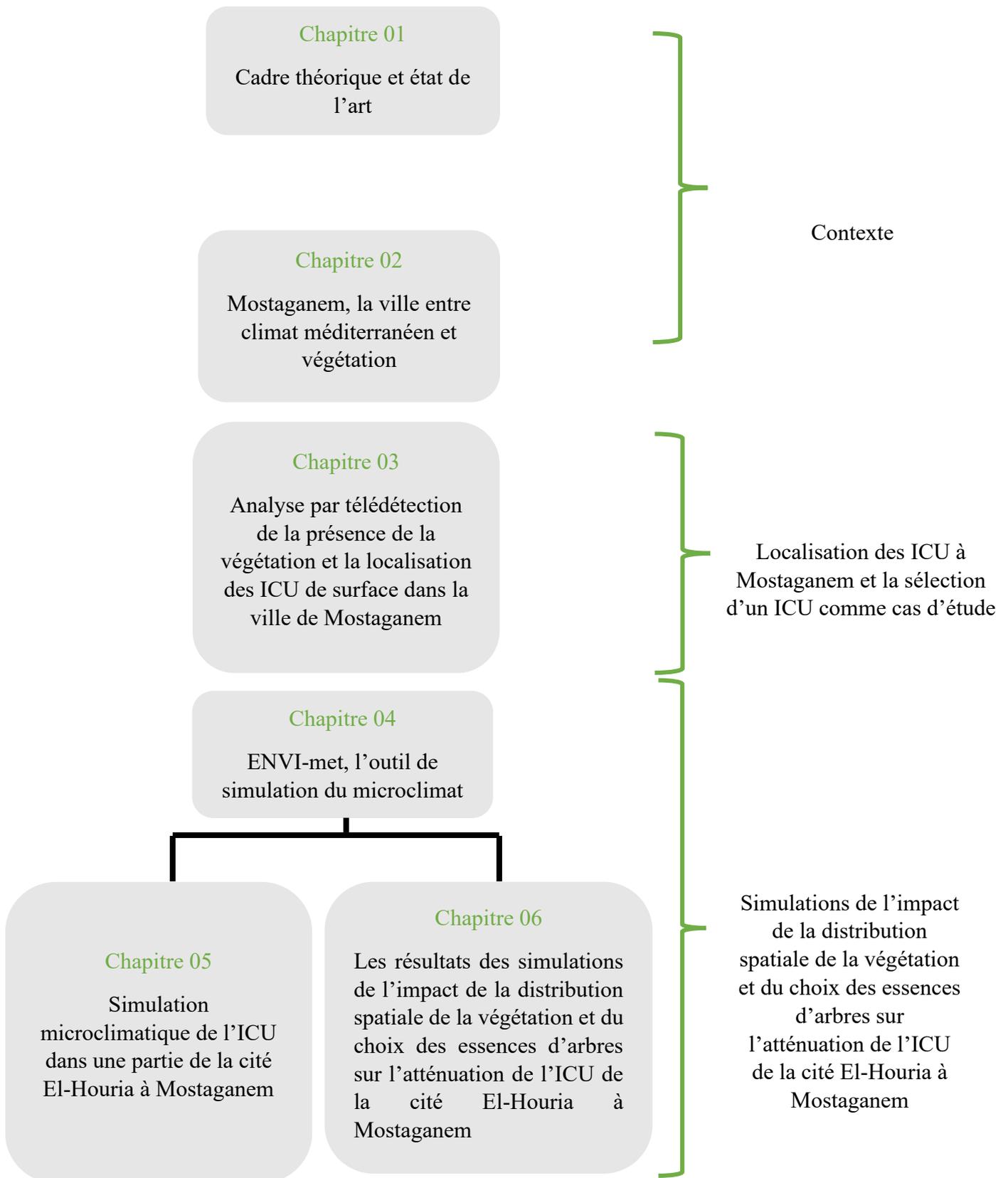


Figure 1 : Structure de la thèse.

# CHAPITRE 01

## CADRE THEORIQUE ET ETAT DE L'ART



*« Le rôle des parcs est important en fonction du réseau et de l'aura. On est là dans une stratégie qui peut être très locale, sur la qualité, et c'est une des rares stratégies que l'on peut regarder de façon globale, sur les questions de climat mais aussi de biodiversité... ». Anne Peré, 2014.*

## Introduction

La lutte contre les effets du réchauffement climatique sur la ville, loin d'être résorbé, risque de devenir un des principaux enjeux des milieux urbains pour les prochaines décennies. Les conséquences du réchauffement global renforcent la formation du phénomène d'îlot de chaleur urbain qui en exacerbent les effets négatifs. Face au défi d'atténuation des ICU, les villes élaborent des stratégies transdisciplinaires à différentes échelles spatiales et temporelles. Cependant, la végétation agit comme un puissant modulateur du bilan énergétique de la surface de la ville (Bounoua et al., 2015 ; Bachir et al., 2021).

Ce premier chapitre propose une rétrospective des phénomènes microclimatiques urbains. Dans un premier temps, il s'agit d'introduire la question de la confrontation de la ville au climat. En second lieu, la notion d'îlots de chaleur urbains est présentée. Ses causes, ses facteurs, sa genèse de formation, ses échelles et ses conséquences sont développés, tout en détaillant la notion du bilan radiatif urbain et du confort thermique extérieur. Une bibliographie non exhaustive des recherches scientifiques relatives aux ICU est précisée. Ensuite, une attention particulière est dédiée à la présentation détaillée de la thématique centrale de la thèse qui est le rôle de la végétation dans l'atténuation des ICU. Enfin, un état de l'art au tour des recherches sur l'effet de la végétation sur le microclimat urbain est traité, avec quelques stratégies de végétalisation adoptées par quelques métropoles à travers le monde.

### 1.1 Villes sous influence du changement climatique global

Depuis longtemps, les villes ont su se protéger contre la chaleur. Chaque région dans le monde possède un habitat traditionnel conçu en adéquation avec les conditions climatiques locales (Givoni, 1978). L'urbanisme vernaculaire méditerranéen, l'architecture des maisons arabes, les protections solaires dans les médinas<sup>4</sup> ou encore l'urbanisme classique avec des rues arborées et des immeubles relativement hauts, nous offrent des exemples d'une maîtrise des ambiances thermiques dans les espaces publics et privés. Ces réflexes bioclimatiques ont disparu dans la ville moderne. Cela a conduit vers une crise qui a été affirmée par Alberto Magnaghi (2014) : « Le divorce entre nature et culture, entre la culture et l'histoire caractérise

---

<sup>4</sup> Dans ce contexte, on peut citer aussi l'exemple de l'architecture des maisons mozabites, qui joue de système de ventilation sophistiqués avec patio, moucharabiehs, salsabils et fontaines. Ou encore les capteurs ou les tours des vents « Badguir » qu'on peut trouver en Irak, en Iran et en Egypte conduisent l'air frais dans les villes jusqu'au cœur des habitations, cette technique est reprise récemment dans le projet écologique urbain « Masdar City » à Abou Dhabi.

l'évolution de la pensée mécaniste et réductionniste moderne ». L'urbanisme contemporain a ainsi été mis en cause avec l'apparition des risques écologiques et sanitaires provoqués par le réchauffement climatique.

Aujourd'hui, les effets du réchauffement climatique global et la hausse des températures dans les milieux urbains ont pris des proportions inquiétantes. Selon le 5<sup>ème</sup> rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont actuellement plus élevées que jamais. Leurs effets, alliés à ceux d'autres facteurs anthropiques, sont probablement la cause principale du réchauffement global (GIEC, 2014). Ce même rapport, affirme que le réchauffement moyen à la surface du globe vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2081–2100) par rapport à la période 1986–2005, sera probablement compris entre 0,3 °C et 1,7 °C selon le RCP2,6, et entre 2,6 °C et 4,8 °C selon le RCP8,5<sup>5</sup> (Figure 1.1).

En revanche, les villes sont considérées comme les grands responsables des émissions anthropiques du moment qu'elles représentent plus de 75% de la consommation globale de l'énergie<sup>6</sup>. En effet, la population urbaine ne cesse d'augmenter de façon significative, parallèlement les villes s'étalent de plus en plus, et par leurs matériaux, leurs minéralités, leurs densités, leurs activités émettrices de chaleur et d'air pollué, leurs formes et leurs déficits en végétation et en eau, influencent leurs climats en réchauffant l'atmosphère (Erwan Cordeau, 2014). Ces hausses des températures dans les milieux urbains ont un impact sur la vulnérabilité des personnes sensibles aux épisodes de fortes chaleurs et sur leur santé.

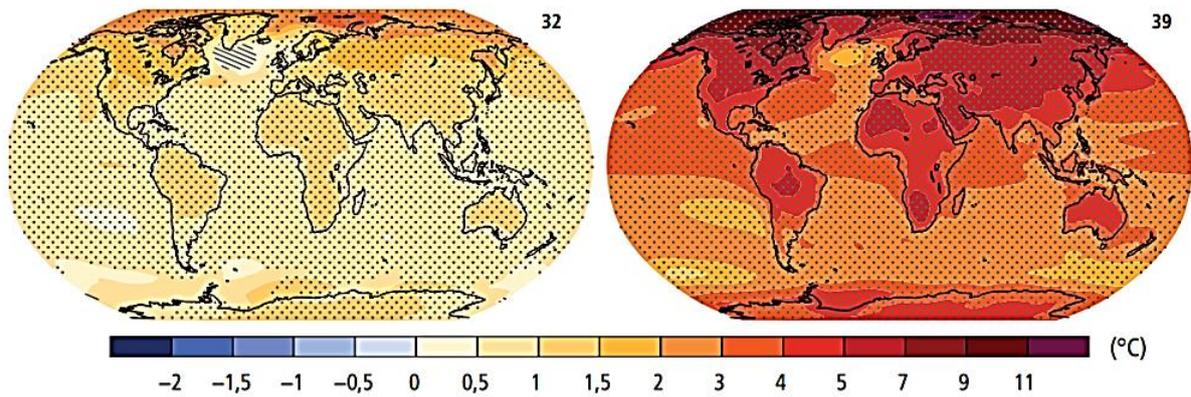
Les villes méditerranéennes n'échappent pas au phénomène d'urbanisation « galopante »<sup>7</sup>. Les zones littorales de cette région abritent des villes regroupant environ 160 millions d'habitants, dont 85 millions sur la rive sud et 75 millions sur la rive nord (Hubert., 2015). Dans un tel contexte, la demande de la ville en termes d'énergie, de services, d'emplois, de ressources, etc. ne cessera d'augmenter. Cela contribue à l'intensification du changement climatique. En effet, le territoire méditerranéen est considéré comme une « zone sensible » au

---

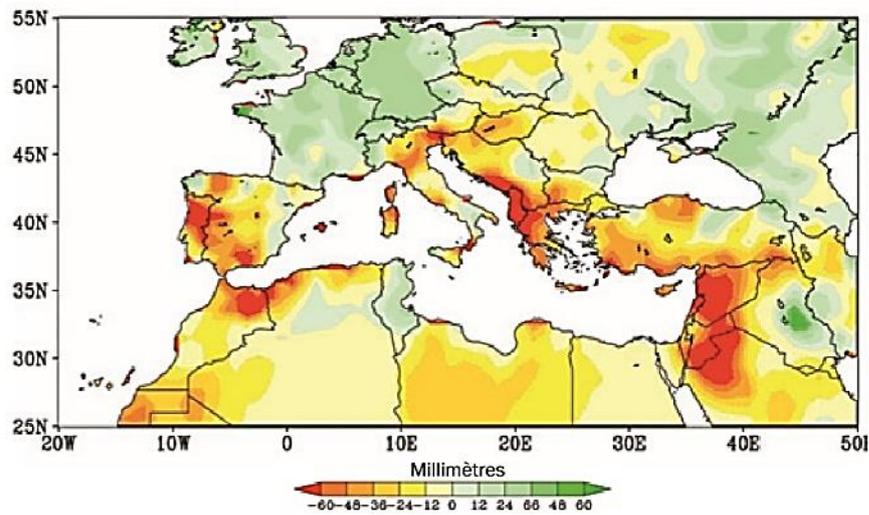
<sup>5</sup> Les RCP (Représentative Concentration Pathway), sont des scénarios de trajectoire du forçage radiatif, établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat pour son 5<sup>ème</sup> rapport. Le RCP2, 6 est un scénario strict d'atténuation. Le RCP8, 5 représente un scénario d'émissions très élevées de gaz à effet de serre.

<sup>6</sup> Selon Onu « World urbanisation prospects », Progress in planning, 2011, AIE & PNUE. In Villes et changement climatique, Ilots de chaleur urbains.

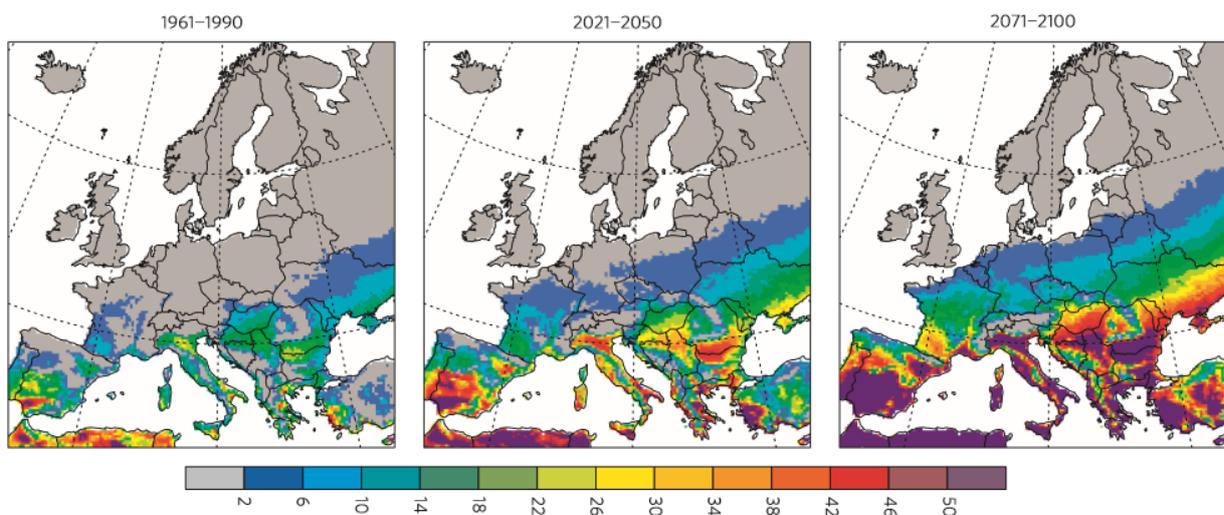
<sup>7</sup> En région méditerranéenne, L'exode rural, la croissance naturelle de la population ainsi que la modernité, incitent les personnes à rejoindre les villes. Aujourd'hui 70 % de la population méditerranéenne vie en ville (Hubert., 2015).



**Figure 1.1 :** Evolution de la température moyenne en surface fondées sur des projections multimodèles moyennes pour la période 2081–2100 par rapport à la période 1986–2005, selon les scénarios RCP2,6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite). Source : GIEC, 2014.



**Figure 1.2 :** Sécheresse en région Méditerranéenne. Les couleurs rouge et orange représentent les endroits autour de la Méditerranée qui ont connu des hivers nettement *plus secs* durant la période 1971-2010 en comparaison à la période 1902-2010, haute résolution. Source : GIEC, 2014.



**Figure 1.3 :** Nombre de nuits tropicales associées à des journées chaudes dans les conditions climatiques présentes et futures. Source : Fischer et Schar, 2010.

changement climatique avec un climat favorisant les sécheresses et les événements extrêmes tels que les crues éclair – appelées aussi « épisodes méditerranéens » (Hubert, 2015). En été, des sécheresses et des canicules (figure 1.2) sont provoquées par la forte variabilité spatiale et temporelle des températures et des précipitations. Sans action d'atténuation, la température augmentera de 2,2 °C dans la zone méditerranéenne d'ici 2040, ou encore de 3.8 °C dans certaines régions d'ici 2100 (Cramer et al., 2019). Dans ce contexte, les villes méditerranéennes enregistrent des fortes chaleurs estivales, avec des températures parfois supérieures à 40°C au sud. D'après la figure 1.3, on remarque une augmentation du nombre de nuits tropicales<sup>8</sup> (ou les températures minimales sont supérieure à 20 °C), associées à des journées chaudes (température maximale supérieure à 35 °C) selon des conditions climatiques présentes et futures.

En effet, les zones urbaines et industrialisées contribuent à un réchauffement des températures par rapport aux zones rurales ou naturelles environnantes, créant la formation d'îlot de chaleurs urbain (Oke, 1982 ; Bounoua et al., 2009, 2017, 2018). Ce phénomène représente aujourd'hui un des éléments les plus complexes à prendre en compte dans la conception des projets urbains.

## 1.2 Ilot de chaleur urbain

L'existence d'une différence de température entre l'air atmosphérique des villes et celui des zones rurales moins densifiées, est le principal constat fait par la communauté des chercheurs s'intéressant au climat urbain depuis le XIXe siècle (Mestayer et Anquetin, 1995). Ce phénomène est appelé îlot de chaleur urbain, il a été décrit pour la première fois en 1820 par le météorologue britannique Luke Howard, qui a observé une élévation de la température mesurée la nuit au cœur de Londres par rapport à celle de la campagne environnante (Landsberg, 1981). Par la suite, Oke a mis en évidence la transformation des caractéristiques radiatives, thermiques, d'humidité et aérodynamiques de la surface induite par le processus d'urbanisation (Oke, 1987). Selon le profil de la température de l'air de Oke (1987) illustré dans la figure 1.4, l'ICU est structuré autour du centre-ville dense et caractérisé par trois couronnes. A la transition entre la zone rurale et péri-urbaine, un intense gradient de température positif est dénommé « Falaise ». La deuxième couronne est marquée par un réchauffement progressif dans la même mesure que l'on s'approche du centre-ville, elle est nommée « Plateau ». Enfin, un « pic » est atteint dans

---

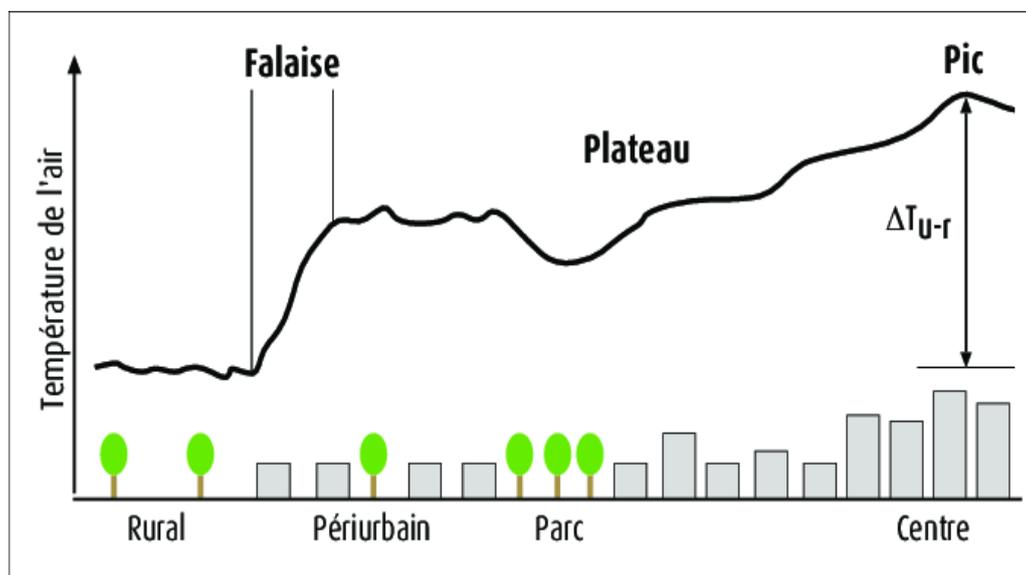
<sup>8</sup> A noter, le nombre de nuits tropicales dans l'année est lié directement à la hausse des températures moyennes. Il est considéré comme un indice important de l'évolution climatique.

la zone du centre-ville qui représente la référence pour le calcul de l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain.

Dans les centres des grandes métropoles, des différences de températures de cinq à dix degrés sont enregistrées par rapport aux zones situées à leurs périphéries (Cavayas et Baudouin, 2008). A Oran, l'étude d'Ibka (2013) a enregistré une augmentation de la densité de l'ICU en centre-ville de 5 à 6 °C en l'espace de 25ans.

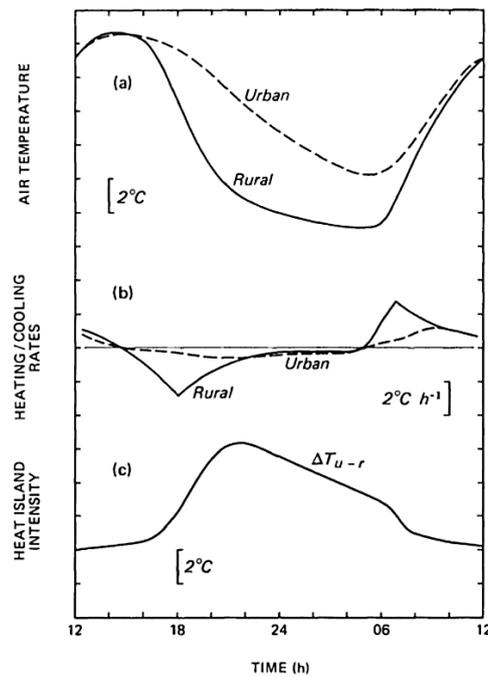
En effet, Les ICU sont particulièrement intense en début de nuit (De Munck, 2013) comme présenté dans la figure 1.5, et sont classés en différents types, chacun possède son échelle spatiale et temporelle et son mécanisme physique (Oke, 1976) :

- L'ICU souterrain, qui se caractérise par des températures du sous-sol urbain plus élevées par rapport au sous-sol des zones non urbanisées. Cette augmentation des températures est due par conduction.
- L'ICU de surface, qu'est la différence de températures de surface entre les villes et les zones rurales. Cet écart s'explique par la différence des matériaux urbains, caractérisés par leur imperméabilité et leur forte inertie thermique, et des matériaux ruraux, perméables et à faible inertie thermique<sup>9</sup>.



**Figure 1.4** : Profil de la température de l'air le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée. Source : dans Pigeon et al., 2008, adaptation de T. Oke (1987).

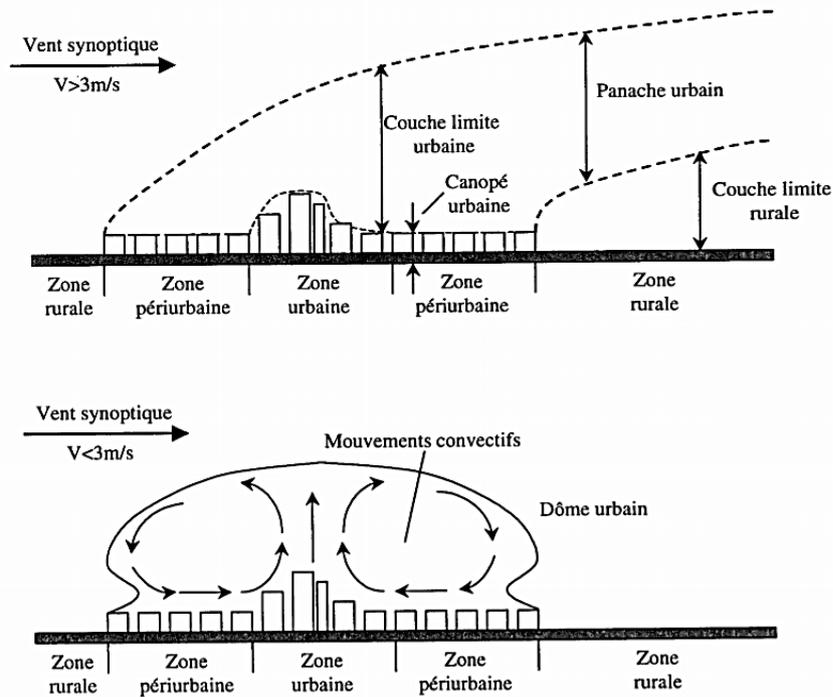
<sup>9</sup> A noter, 80 % de l'énergie produisant l'ICU provient de l'énergie solaire absorbée par les matériaux (APUR 2012).



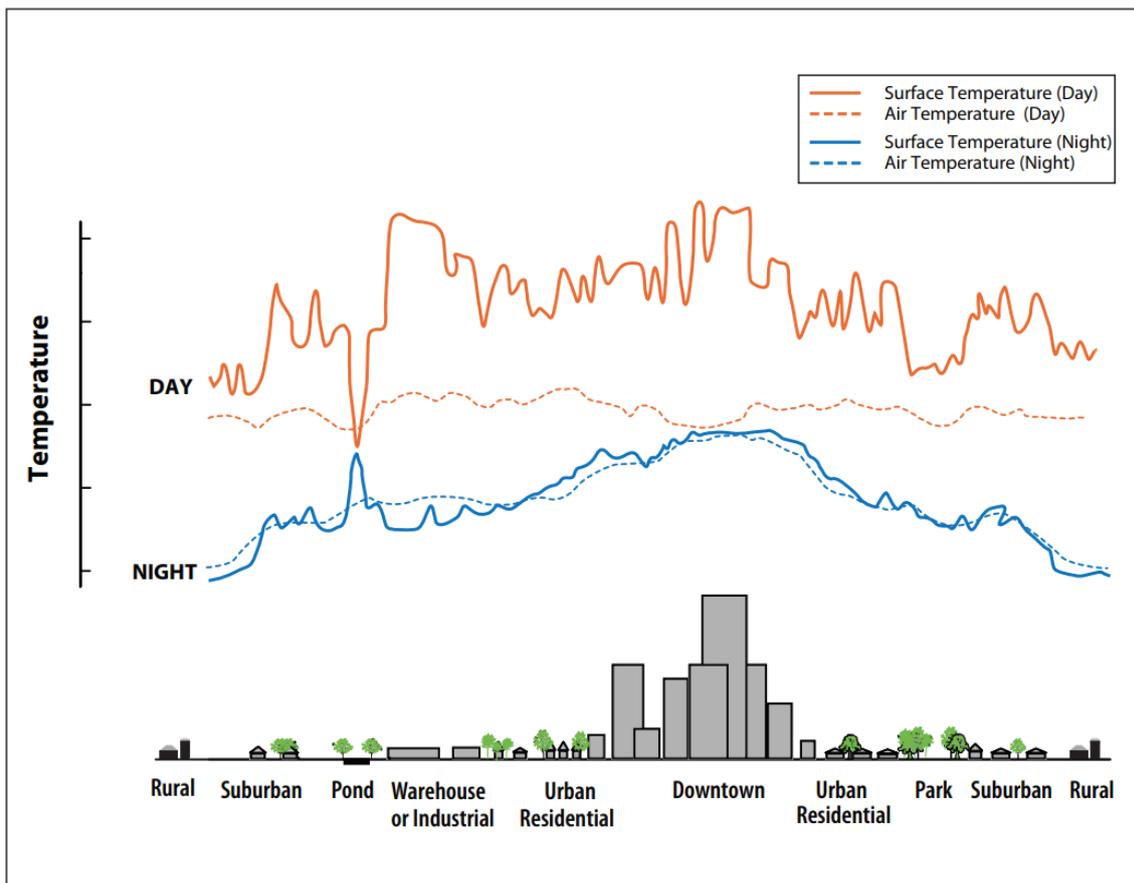
**Figure 1.5 :** (a) Différences des températures de l'air en milieu rural et urbain, (b) les taux de refroidissement et de réchauffement, et (c) l'intensité de l'îlot de chaleur. Source ; dans De Munck Cécile (2013), d'après Oke, 1987.

- Enfin, l'ICU atmosphérique dépend de la température de l'air et se divise en deux types : l'ICU de la couche limite urbaine, appelé « urban boundary layer » (Oke, 1978), et l'ICU de la couche limite de la canopée urbaine, appelé « urban canopy layer » (Oke, 1978). Le premier est la couche d'air chaud située au-dessus des zones urbaines. Il prend la forme d'un dôme d'air en période de vent régional faible, et lorsque le vent est plus fort, on remarque la formation du panache urbain, comme on peut le voir sur la figure 1.6. Le second type d'ICU atmosphérique se situe entre le niveau du sol et le niveau moyen des toits, il est influencé à la fois par les propriétés du micro-échelle ainsi que par les processus méso-échelle.

Les températures de surfaces ont une influence indirecte, mais significative, sur les températures de l'air, en particulier dans la couche de canopée, qui est la plus proche de la surface. Par exemple, les parcs et les zones végétalisées, qui ont généralement des températures de surface plus froides, contribuent à rafraîchir les températures de l'air. En revanche, les zones denses et bâties conduisent généralement à des températures de l'air plus chaudes. Cependant, étant donné que l'air se mélange dans l'atmosphère, la relation entre les températures de surface et de l'air n'est pas constante, et les températures de l'air varient généralement moins que les températures de surface, à travers une zone (U.S. Environmental Protection Agency. 2008.) (Figure 1.7).



**Figure 1.6 :** Composantes de l'atmosphère urbaine par des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s. Source : dans Ringenbach Nicolas ,2004. D'après Mestayer, Anquetin, 1995.



**Figure 1.7 :** Variations des températures de surface et atmosphériques. Source U.S. Environmental Protection Agency. 2008.

Les îlots de chaleur urbains sont formés principalement par le remplacement des sols végétalisés et perméables par des bâtiments et revêtements imperméables (Bounoua et al., 2009, 2015). Les processus physiques qui sont responsables de ce phénomène, sont appréhendés par la comparaison des bilans d'énergie des surfaces naturelles et urbanisées (De Munck, 2013).

### 1.2.1 Bilan énergétique des zones urbaines

La morphologie des rues ainsi que les propriétés thermiques et radiatives de ses matériaux caractérisent la ville par un bilan d'énergie différent de celui des surfaces naturelles (Oke, 1982). Ces matériaux artificiels stockent l'énergie solaire absorbée le jour, et la retransmettent la nuit sous forme de flux de chaleur et de rayonnement IR. En effet, le bilan énergétique d'une surface est obtenu à partir de l'équation 1.1 :

$$Q^* = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_S + (\Delta Q_A) \quad (1.1)$$

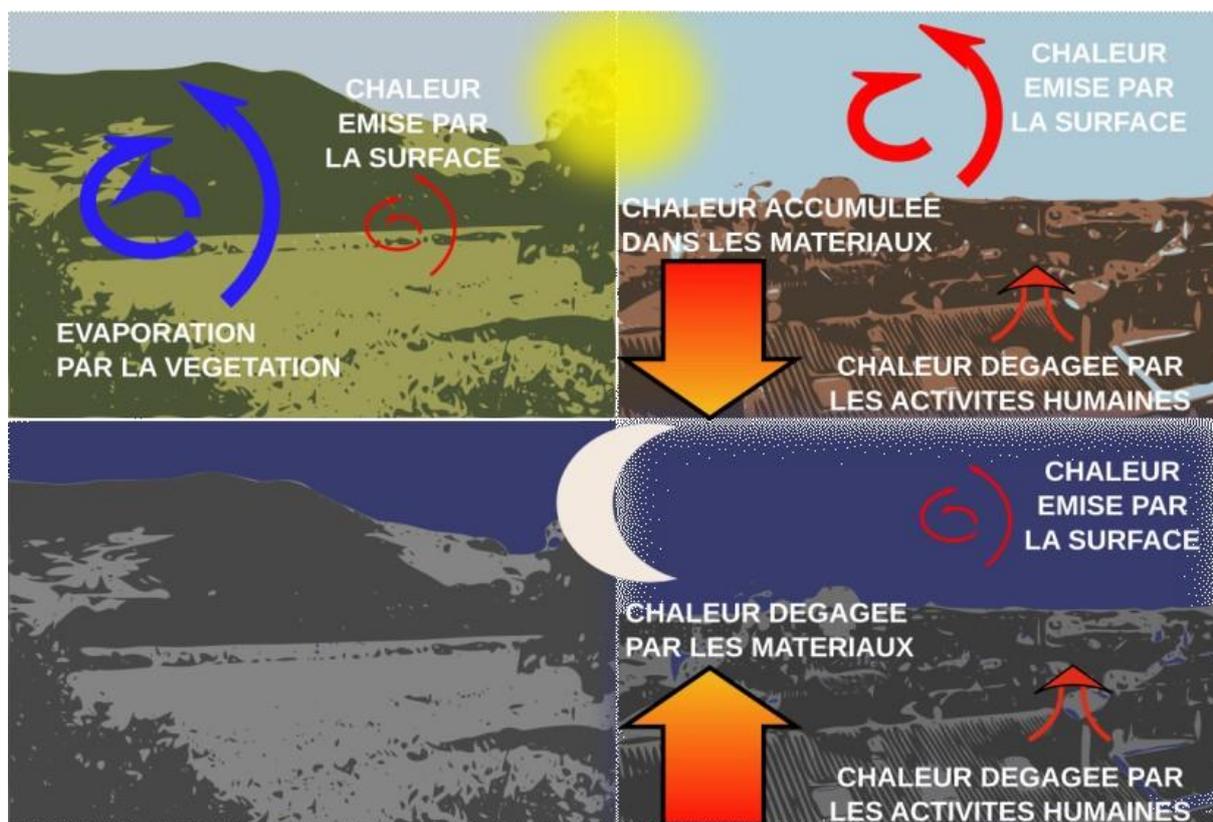
Où :  $Q^*$  représente le flux de rayonnement net, résultant du bilan radiatif dans le visible et l'infrarouge, il est exprimé en  $W.m^{-2}$ .  $Q_{LE}$  et  $Q_H$  sont respectivement les flux de chaleur latente et sensible.  $\Delta Q_S$  est le flux de chaleur stocké dans le sol. Enfin  $\Delta Q_A$  est l'advection moyenne de chaleur.

A cette équation Oke (1988) a ajouté l'apport de chaleur dégagé par les activités humaines (chauffage, climatisation, circulation automobile, industrie, etc.)  $Q_F$ , pour obtenir le bilan énergétique d'une surface urbaine (équation 1.2) :

$$Q^* + Q_F = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_S + (\Delta Q_A) \quad (1.2)$$

L'énergie nette responsable du réchauffement de l'air est exprimée par les termes de gauche, cependant les termes de droite représentent la manière de dissipation et de stockage de cette énergie.

La figure 1.8 montre la différence entre un bilan d'énergie d'une surface urbaine et celui d'une surface rurale fortement végétalisée ; sur un cycle journalier, le jour puis la nuit. Durant la journée, on remarque que le bilan d'énergie de la zone rurale se caractérise par un flux de chaleur latente élevé par rapport à celui de la surface urbanisée, cela est due à la transpiration et l'évaporation des plantes et le faible stockage de la chaleur. En ville le stockage de chaleur est élevé dans les matériaux à forte capacité thermique. Généralement le rapport  $Q_{LE}/Q^*$  est supérieur à 0,5 pour une zone rurale couverte de végétation, alors qu'il varie entre 0,1 et 0,2 pour une zone urbaine dense (Pigeon et al., 2008). La nuit, la chaleur stockée en journée dans les matériaux en ville est dissipée, ce qui réchauffe l'air urbain.



**Figure 1.8 :** Un bilan d'énergie d'une zone rurale à gauche et d'une zone urbaine à droite, en haut le jour, et en bas la nuit. Source : Pigeon et al., 2008.

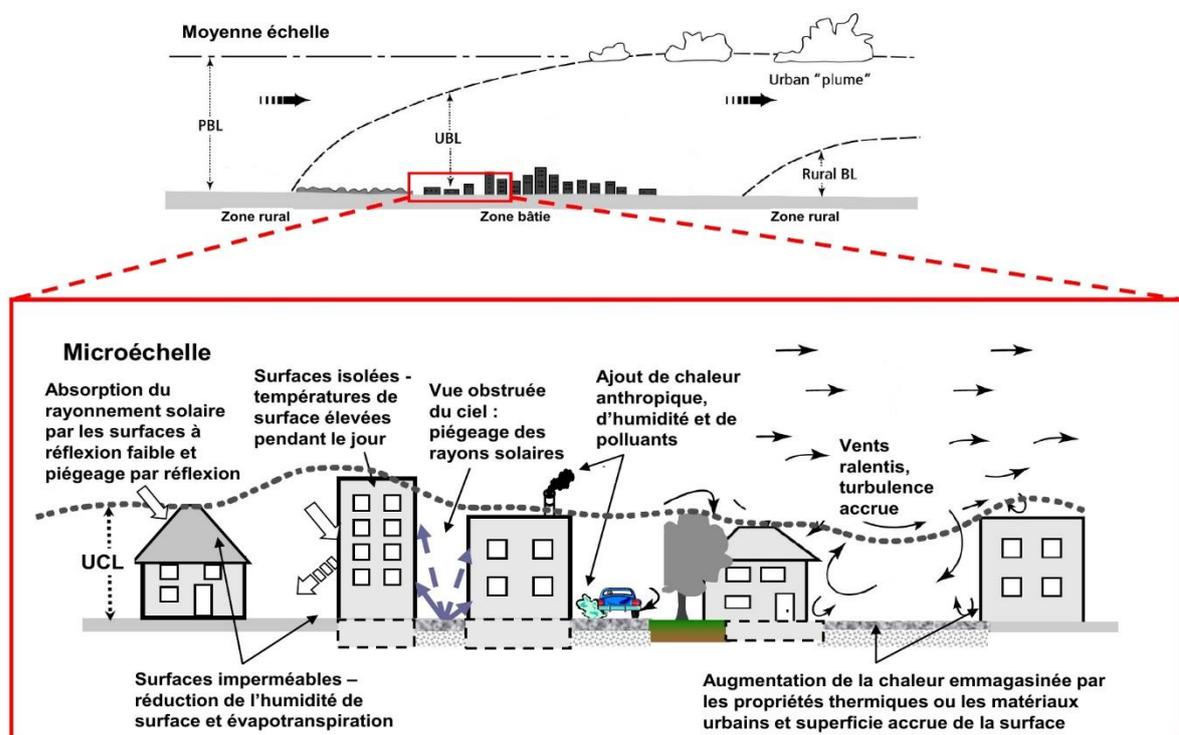
## 1.2.2 Facteurs de formation des ICU

L'îlot de chaleur urbain est considéré comme l'un des phénomènes les plus complexes et difficiles à prendre en compte dans la conception des projets d'aménagements urbains. Les causes de sa formation sont variées, mais principalement elles sont liées aux caractéristiques des aménagements des milieux de vie. La figure 1.9 résume les éléments qui peuvent contribuer à des hausses importantes des températures urbaines à une micro-échelle. Ces éléments peuvent être combinés à d'autres paramètres physiques urbains.

### 1.2.2.1 Réduction de la végétation dans les milieux urbains

Il existe un consensus scientifique clair selon lequel l'ICU est principalement causé par la réduction de la fraction de végétation présente dans les villes et la réduction conséquente du refroidissement par évaporation des plantes (Bounoua et al., 2009, 2015). La végétation par sa capacité d'évapotranspiration, son ombre, sa couleur et sa rugosité, modifie les propriétés radiatives, hydrologiques et aérodynamiques de l'environnement urbain et agit comme un puissant régulateur du bilan énergétique de la ville (Bounoua et al., 2015). Les plantes sont présentes dans la ville sous diverses formes et quantités (alignements d'arbres, jardins,

pelouses, parcs urbains, etc), leur effet rafraîchissant varie selon leur forme. Par exemple l'étude d'Armson (2012) a enregistré des températures des surfaces enherbées ombragées inférieure de 1 à 4 °C à la température de l'air (Musy, 2014). Cependant, Chen-Yi montre qu'un petit parc urbain de 0,5ha à Taipei (Taiwan) enregistre une diminution de la température de 1,5°C en moyenne et de 6,1°C au maximum par rapport à ses alentours (Musy, 2014). Enfin, les toits et les façades végétalisés ont des impacts sur la consommation énergétique et le confort thermique à l'intérieur des bâtiments (Musy, 2014). Le rôle de la végétation constitue l'intérêt principal de notre thèse et va être traité en détail dans la suite du chapitre.



**Figure 1.9** : Processus contribuant à la formation d'îlots de chaleur urbains à petite échelle et à l'échelle régionale. Source : Santé Canada, 2020. D'après Voogt, 2010 ; figure reproduite avec la permission du Dr. James Voogt.

### 1.2.2.2 L'imperméabilisation et propriétés thermiques des matériaux

Les matériaux urbains sont en grande majorité imperméables, et ne stockent l'eau qu'en surface qui s'évapore rapidement, cela modifie les cycles hydrologiques et géologiques de la ville. En revanche, en zone rurale, l'eau stockée dans les matériaux perméables est lentement reléguée par évaporation (Erell et al., 2011). Les ICU s'intensifient au fur et à mesure que les surfaces sont

imperméabilisées (Alberti, 2008 ; Gaston, 2010), ces surfaces urbaines ont un effet réchauffant qui remplace le refroidissement des surface végétales.

Les propriétés thermiques des matériaux (par exemple leur réflectivité et leur émissivité thermique) ont une incidence sur l'intensité des ICU (Rizwan et al., 2008), et elles affectent directement les températures de surface de la ville ainsi qu'indirectement les températures de l'air. Ces propriétés déterminent principalement le bilan thermique des surfaces. En effet, la surface urbaine, en fonction de son albédo<sup>10</sup> (indice de réflectivité lié à la couleur et à la porosité des matériaux), et de son inertie thermique, absorbe ou réfléchit le rayonnement solaire pendant la journée et restitue la chaleur la nuit. La multiplication des surfaces artificielles à faible albédo en milieu urbain, telles que l'asphalte, le goudron, le gravier et le béton, est l'un des facteurs contribuant à l'augmentation des températures dans les villes<sup>11</sup>. Selon l'étude de Taha (1997), la différence de température de surface peut atteindre 45 °C entre les revêtements en élastomère blanc ayant un albédo de 0,72 et les revêtements sombres classiques d'albédo 0,08.

Dans le cadre d'une étude expérimentale réalisée pendant l'été 2001, des mesures de température ont été réalisées par thermographie IRT sur des échantillons des revêtements urbain de sols mais aussi des façades exposées à l'ensoleillement (Doulos et al., 2004). Les résultats ont montré une différence de températures jusqu'à 25° entre les matériaux (figure 1.10).



**Figure 1.10 :** Thermographies IRT et photos des revêtement examinés dans l'étude de Doulos et al., 2004. Source : Doulos et al., 2004.

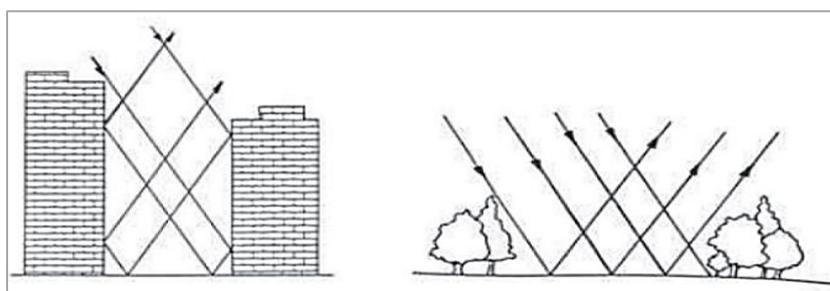
<sup>10</sup> L'albédo représente le rapport entre l'énergie solaire réfléchiée et l'énergie solaire reçue (Energie réfléchiée / Energie reçue). Sa valeur varie entre 0 et 1 ; ou 1 représenterait une surface qui réfléchirait de l'énergie à 100 % et 0 une surface qui absorberait entièrement les rayonnements.

<sup>11</sup> Bouyer affirme que l'albédo des villes européennes et américaines est entre 0,15 et 0,30, cependant celui des villes nord africaines varie de 0,45 à 0,60 (Bouyer, 2009).

### 1.2.2.3 La forme urbaine

La morphologie urbaine<sup>12</sup> tridimensionnelle : taille, hauteur, et forme des bâtiments, entraîne des modifications des débits d'air à des échelles locales et microclimatiques (Oke, 1987). De nombreux travaux scientifiques, notamment ceux de T. Oke ont démontré que les formes urbaines constituent des éléments clés dans le processus de la formation des îlots de chaleur urbains. Intervenir sur la forme urbaine exige de prendre en compte de multiples éléments simultanément, par exemple, l'orientation des rues, les textures urbaines, les zones d'ombrage, etc. Ces actions liées à la morphologie urbaine semblent parfois être contradictoires, comme limiter l'étalement urbain par la densification des centres. Certes la ville dense limite les déplacements et l'émission de gaz à effet de serre mais en même temps accroît le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Le piégeage radiatif est l'un des phénomènes remarquables en site urbain, il s'agit des flux radiatifs issus des multi-réflexion des rayons sur le sol et les parois des bâtiments qui ne sont pas systématiquement redirigés vers le ciel, mais absorbés progressivement par le bâti (figure 1.11). Les recherches sur ce phénomène se concentrent sur la notion de la configuration des canyons urbains (Oke, 1987), qui contribue à l'accumulation et à la rétention de la chaleur. Ce concept de rue canyon signifie une rue d'une longueur infinie entourée des deux côtés par des bâtiments. L'analyse de l'impact de la forme urbaine sur son microclimat se base sur deux critères (Erell et al., 2011) : le premier, concerne le rapport d'aspect H/W (hauteur/largeur), il représente une donnée morphologique liée à la section d'un canyon urbain. Le second est le facteur de vue du ciel (FVC) qui représente la portion de ciel observable à partir d'une surface considérée (Colombert, 2008). Plus le FVC est moins important, plus le flux de chaleur est dégagé difficilement.



**Figure 1.11** : Phénomène du piégeage radiatif en ville (à gauche) et en zone rurale (à droite). Source : Greuillet et Galsomiés, 2013. D'après : Griffiths, 1976.

<sup>12</sup> Selon les études du Martin Centre de Cambridge, la morphologie urbaine est définie comme l'association de la forme tridimensionnelle des bâtiments, de son étalement et de la volumétrie des espaces extérieurs qu'ils créent (Bouyer, 2009 ; Nikolopoulou, 2004).

#### 1.2.2.4 Augmentation des émissions de chaleur anthropique

La chaleur anthropique correspond à la chaleur induite par les activités humaines : chauffage, climatisation, éclairage, l'industrie, circulation automobile, etc. Ces facteurs augmentent les températures d'air dans les zones de concentration de population et d'activités en zone urbaine, particulièrement en zone industrielle. Ainsi, les rejets des polluants de ces activités participent indirectement par effet de serre sur le réchauffement de l'atmosphère. Le flux de chaleur anthropique  $Q_F$  est plus important en hiver qu'en été, en raison des dissipations de chaleur causées par le chauffage des bâtiments (Erell et al., 2011). En période estivale, ce flux a tendance à augmenter, grâce à la généralisation de l'utilisation de la climatisation.

#### 1.2.2.5 Climat et géographie

L'îlot de chaleur urbain est affecté par deux caractéristiques météorologiques : les vents et la couverture nuageuse. Il se forme pendant les périodes de vents calmes et de ciel dégagé, car ces conditions maximisent la quantité d'énergie solaire atteignant les surfaces des zones urbaines et minimisent la quantité de chaleur qui peut être évacuée par convection. A l'inverse, les vents forts et les couvertures nuageuses suppriment les îlots de chaleur urbains (U.S. Environmental Protection Agency. 2008).

La topographie, qui est en partie déterminée par la situation géographique d'une ville, influence la température urbaine. Par exemple, les grands plans d'eau régulent les températures et peuvent générer des vents qui éloignent la chaleur des villes. Les chaînes de montagnes voisines peuvent soit empêcher le vent d'atteindre une ville, soit créer des modèles de vent qui la traversent (U.S. Environmental Protection Agency. 2008).

#### 1.2.3 Le confort thermique extérieur

Selon Taleghani et al (2013), la notion du confort thermique a été étudiée depuis 1930. Fabbri (2015) a défini cette notion comme étant le résultat de l'interaction de nombreux paramètres : physiques, physiologiques, psychologiques, et sociaux culturels. Cependant, Ashrae détermine le confort thermique comme l'état de satisfaction du corps humain vis-à-vis de l'environnement. Une échelle a été développée par Ashrae (tableau 1.1) qui exprime les valeurs de l'indice de sensation thermique. Elle est appelée « ASHRAE thermal sensation scale » (ASHRAE, 2009).

**Tableau 1.1** : Echelle de sensation thermique d'ASHRAE. Source : ASHRAE, 2009.

+ 3	Chaud
+ 2	Tiède
+ 1	Légèrement tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

Benharkat et Rouag-Saffidine (2016) ont indiqué qu'il existe deux types d'approche du confort thermique :

- *Le modèle de Fanger* :

Fanger (1972) a introduit une démarche basée sur l'équilibre thermique du corps humain en développant deux indices : le PMV (le vote moyen prévisible) et le PPD (le pourcentage prévisible d'insatisfaits), qui sont utilisés dans la norme ISO 7730. Cette approche prend en considération quatre facteurs environnementaux : la température ambiante de l'air, l'humidité relative, la température radiante et la vitesse de l'air, et deux facteurs humains : l'habillement et le métabolisme.

- *Le modèle adaptatif* :

L'approche adaptative est dénoncée par Humphreys et Nicol. Selon ces auteurs : « si une modification des conditions climatiques se produit et provoque de l'inconfort, les personnes entreprendront des actions visant à rétablir leur confort ». Cette approche diffère de celle de Fanger par l'ajout de deux aspects : la capacité d'interaction dans un environnement inconfortable et l'adaptation climatique (Fahed, 2019). De Dear et Brager définissent trois catégories d'actions d'adaptation : comportementales, physiologique et psychologique.

En effet, la température moyenne radiante est considérée comme le facteur le plus important affectant la chaleur humaine. L'équation de l'équilibre thermique humain basé dans la modélisation est comme suit (Fahed, 2019) :

$$M + W_u + R_m + Q_c + Q_l + Q_{re} + Q_{Tr} + S_e = 0 \quad (1.3)$$

Où M représente le métabolisme du corps ( $W/m^2$ ),  $W_u$  le travail utile ( $W/m^2$ ),  $R_m$  le flux radiatif ( $W/m^2$ ) qui correspond de la température moyenne radiante,  $Q_c$  le flux convectif entre le corps et son entourage ( $W/m^2$ ),  $Q_l$  le flux de chaleur latente par diffusion de vapeur d'eau au travers

de la peau ( $W/m^2$ ),  $Q_{re}$  est le flux de chaleur sensible et latente causé par la respiration ( $W/m^2$ ),  $Q_{Tr}$  est le flux de chaleur latente causé par la transpiration ( $W/m^2$ ), enfin  $S_e$  est le stockage d'énergie dans le corps humain ( $W/m^2$ ).

Fanger a développé l'indice PMV (Predicted Mean Vote) en 1972 (Fanger, 1972). Cet indice exprime l'avis moyen d'un groupe de personnes qui donneraient un vote de sensation de confort thermique en se basant sur l'échelle suivante (énergie plus, 2007) :

- PMV avec une valeur de zéro manifeste une sensation de confort thermique optimale
- PMV avec une valeur négative exprime que la température est plus basse que la température idéale qui correspond au confort.
- PMV avec une valeur positive signifie que la température est plus élevée.

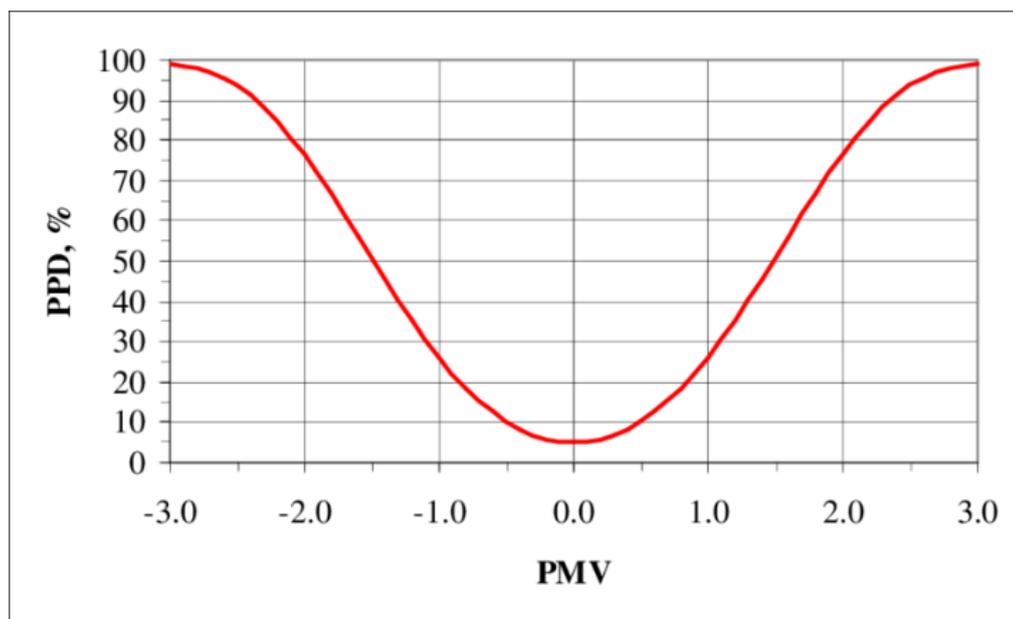
Fanger a développé une équation pour décrire le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, plus tard, cette équation a été développée pour les milieux extérieurs (Jendritzky et Nübler, 1981). Cette nouvelle équation est exprimée selon ASHRAE (ASHRAE, 2009) comme :

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)S_e \quad (1.4)$$

Afin de mieux caractériser le confort thermique, un autre indice est utilisé : le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Cet indice indique le pourcentage des personnes insatisfaites de l'ambiance thermique. Le PPD est directement lié au PMV par l'équation suivante de Fanger (Fanger, 1982) :

$$PPD = 100 - 95 e^{[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)]} \quad (1.5)$$

La figure 1.12 illustre la correspondance entre les indices PMV et PPD. On remarque que lorsque le PMV atteint sa valeur optimale ( $PMV=0$ ), le taux d'insatisfaction est d'environ 5%. Ce taux augmente lorsque le PMV s'éloigne de zéro vers le froid et vers le chaud. Pour atteindre une situation de confort thermique, il est recommandé que le PMV soit compris entre -0,5 et +0,5, ce qui correspond à un PPD inférieur à 10%.



**Figure 1.12 :** Variation du PPD selon le PMV. Source : ASHRAE, 2009.

#### 1.2.4 Conséquences des ICU en ville et stratégies d'atténuation

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le réchauffement global pourrait augmenter de 1,1 à 6,4 °C d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Les villes ne sont pas épargnées par les effets de ce réchauffement, qui créent des îlots de chaleur urbains. En effet, la population urbaine croît de façon significative, et dans les pays en voie de développement, les zones urbanisées autour des agglomérations de plus de 100 000 habitants en 2000 pourraient être multipliées par 2,5 d'ici 2030 et par 4 d'ici 2050 en suivant une projection modérée de l'évolution de la démographie (Seto et al., 2011). Cette population urbaine est exposée à la fois à deux perturbations thermiques : l'une est globale et est due au changement climatique, tandis que l'autre est locale et est liée au phénomène d'îlot de chaleur urbain (Redon, 2017).

Selon les études épistémologiques de Basu et Samet, Curriero et al, Koppe et Jendritzky dans Parlow (2011), plusieurs facteurs météorologiques ont une influence sur le bilan thermique humain : la température et l'humidité de l'air, le rayonnement de courtes longueurs d'onde et l'émission terrestre de grandes longueurs d'onde, ainsi que la vitesse du vent. Pendant les épisodes de forte canicule, les îlots de chaleur urbains sont responsables de la hausse du taux de mortalité (Smargiassi et al., 2009). Les nuits chaudes d'été, également appelées « tropicales », sont généralement caractérisées par des températures supérieures à 20°C, ce qui perturbe le repos thermo-physiologique des gens pendant leur sommeil. Cette cause a été considérée

comme l'un des facteurs de l'augmentation de la mortalité lors de la vague de chaleur de l'été 2003 en Europe (Schar et Jendritzky, 2004).

En effet, La climatisation constitue l'une des réponses à l'adaptation au changement climatique, cependant, elle provoque une élévation de la consommation énergétique d'un bâtiment. De plus, les rejets de chaleur de la climatisation augmentent la température de l'air et affectent le confort thermique à l'extérieur (Hsieh et al., 2007).

Pour lutter contre le réchauffement climatique global il existe différentes stratégies et mesures urbaines qui sont mise en œuvre. De Munck (2013) définit trois échelles d'intervention :

- Au niveau de l'aménagement urbain à travers la requalification urbaine : formes urbaines, augmentation des espaces verts, etc.
- Au niveau du bâti, en agissant par exemple sur le choix des matériaux de construction.
- Au niveau des individuelles, par la réduction de leur consommation d'énergie.

Les acteurs et les professionnels de l'urbanisme sont aujourd'hui conscients de la difficulté de prendre en compte le phénomène d'ICU dans la conception des projets d'aménagement. Durant l'élaboration des stratégies et des projets urbains, des démarches transdisciplinaires doivent être prises en compte en même temps : programmation urbaine, conception architecturale, météorologie, sciences de l'environnement, tout en impliquant les citoyens. Jean-Baptiste Marie (2015) détermine trois paradoxes qui s'impose aux villes pour la lutte contre le réchauffement climatique : Le paradoxe des formes urbaines et de la densité, le paradoxe du rôle de l'eau et de la végétation, et enfin le paradoxe des outils de planification et d'urbanisme. En effet, les villes et les métropoles adoptent les différentes stratégies qui conduisent au renouvellement de projets architecturaux, urbains et paysagers à différentes échelles tout en tenant compte des caractéristiques climatiques des lieux.

A Barcelone, au cours de la phase de planification, les aspects qui peuvent réduire l'effet potentiel de l'ICU sont pris en considération, comme le rapport plancher-sol ou terrain, le canyon urbain et même l'ouverture au ciel. Les zones de surfaces sont également traitées : d'une part, l'albédo des matériaux est accentué par les techniques dites de « cool roof » pour les toits, trottoirs et chaussées ; d'autre part, la quantité de végétation est augmentée dans le tracé urbain. En outre, le gouvernement a adopté une mesure pour l'exploitation des toits sur un plan social et environnemental. Les avantages de cette mesure sont nombreux pour la biodiversité, le paysage urbain, le contrôle thermique ainsi que l'efficacité énergétique des bâtiments.

A Marseille, le projet Euroméditerranée qui représente une opération de renouvellement urbain et de développement économique majeur. Il repose sur des principes fondamentaux de l'aménagement durable, considérés comme des facteurs de lutte contre l'îlot de chaleur urbain (Franck et Yves, 2015) :

- L'inscription du projet dans son assise géographique.
- L'approche bioclimatique dans les projets d'urbanisme et d'architecture.
- Une mobilité organisée.
- La production d'énergie renouvelable qui permet la réduction des consommations énergétiques.

Ces différentes stratégies employées dans ces deux villes méditerranéennes représentent des exemples parmi les solutions d'atténuation des îlots de chaleur urbains adoptées par diverses villes dans le monde. Cependant, la végétation est généralement considérée comme l'une des réponses les plus avancées.

### **1.3 La végétation, une des stratégies d'adaptation aux ICU**

La végétation a toujours été un moyen d'atténuer la chaleur. Les jardins du Généralife de l'Alhambra à Grenade, qui servaient autrefois de lieux de rafraîchissement pour les princes nasrides, nous en donnent un exemple. En plus de son rôle de régulateur thermique, elle présente de nombreux avantages environnementaux, socio-culturels et économiques. Elle est souvent qualifiée de stratégie d'aménagement « sans regret » (Mills et al., 1991 ; Redon, 2017)."

#### **1.3.1 L'évolution de la présence de la végétation en ville**

La croissance des villes est une dérivée du temps (Da Cunha, 2009). L'aménagement et la gestion des espaces verts dans les villes accompagnent le développement urbain et ses temporalités (Stefulesco, 1993). La ville médiévale a connu peu d'espaces verts. On trouve des jardins potagers privés et quelques arbres majestueux dans les places publiques (Anquetil et al., 2014). Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la révolution industrielle a entraîné un important exode rural (Carmona et al., 2003), ce qui a modifié les formes urbaines pour répondre à l'afflux important des travailleurs. Après l'ouverture des fortifications des villes, les espaces verts ont été structurés sous forme de promenades plantées, reliant l'ancien cœur de ville aux faubourgs. Ces espaces ont assaini et aéré la cité, répondant ainsi à l'apparition de nombreuses épidémies (par exemple l'apparition du choléra en 1849). A cette époque, la végétation était un moyen de rendre la ville viable et vivable (Anquetil et al., 2014). Vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, des jardins familiaux

proches des logements des travailleurs apparaissent. Ils avaient une fonction d'hygiéniste mais aussi une référence à la « valeur du travail agricole » (Werquin et Demangeon, 1995 ; Anquetil et al., 2014).

Les cités jardins imaginées par Howard en 1898, utilisaient la végétation comme un rappel à la ruralité, et une structure des espaces privés et collectifs. Ces espaces créaient un rapport de voisinage entre les habitants et les nouveaux quartiers (Choay, 1965).

Suite à la deuxième guerre mondiale, les principes de l'urbanisme moderne sont apparus dans la charte d'Athènes, reprises plus tard par le Corbusier. Il s'agissait d'un urbanisme progressiste basé sur le principe du zonage fonctionnel : « travailler, habiter, se divertir, se déplacer ». Les formes urbaines étaient standardisées, ce qui a donné naissance à une architecture de style international. Les immeubles des grands ensembles créés durant cette période étaient suffisamment éloignés pour laisser circuler l'air et la lumière, et de vastes espaces ont été laissés libres pour la circulation automobile et la verdure (Choay, 1965 ; Anquetil et al., 2014). En effet, l'urbanisme moderne avait comme souci d'augmenter les surfaces plantées pour créer une « ville verte ». Le terme « espace verts » désignait en 1960 les espaces libres entre les constructions qui ont été végétalisés. Les références culturelles et artistiques ainsi que l'art des jardins ont été éloignés de ce vocabulaire, et l'ambiance végétale était surtout recherchée pour diminuer les nuisances provoquées par la forte mobilité de la population (Anquetil et al., 2014). Au début des années 1970 les principes de l'urbanisme moderne ont été mis en cause. Devant cette situation, l'habitat pavillonnaire apparaît comme une solution à la crise de la ville moderniste, et le développement urbain devient extensif (Da Cunha, 2009 ; Anquetil et al., 2014), les citadins aspirant à trouver plus de végétation dans ces habitations. En 1990, la dégradation de la qualité de l'environnement urbain a été mise en évidence. En 1994, des villes signaient la charte d'Aalborg et approuvent les principes de la « ville durable » (Gaudillière, 2005 ; Anquetil et al., 2014). Ces principes se positionnent en contraste avec l'urbanisme moderne et fonctionnaliste. La végétation est considérée comme un élément de composition du paysage urbain et d'amélioration du cadre de vie, et adopte de multiples fonctions : préservation de la biodiversité, esthétique des espaces publics, la recherche du bien-être (Da Cunha, 2009 ; Anquetil et al., 2014).

Aujourd'hui, les espaces verts urbains sont planifiés pour s'adapter à un contexte de densité. A une petite échelle, la végétation est intégrée aux bâtiments (tel que les façades et toits végétalisés) ; à la grande échelle, la conception d'un maillage vert qui mettraient en connexion

les espaces de proximités comme les squares et les grands parcs urbains seraient une solution aux carences en espaces verts dans les zones urbaines (Anquetil et al., 2014).

### **1.3.2 Les principales formes du végétal en ville**

La végétation est présente en ville principalement sous forme de parcs, d'alignement d'arbre, de bois, de jardins familiaux, terrains de jeux et de sport, et récemment les façades et les toitures végétalisées. Selon la modélisation urbaine, De Munck (2013) définit quatre classes de végétation selon leurs échelles urbaines :

- Façade et toiture végétale à l'échelle du bâtiment.
- Surfaces végétalisées telles que les pelouses et les alignements d'arbres à l'échelle de la rue.
- Parcs, bois urbains, squares, terrains de jeux, noues végétalisées et jardins familiaux à l'échelle du quartier ou de la ville.
- En fin, l'échelle du paysage pour les forêts péri-urbains.

### **1.3.3 Les qualités multiples de la végétation urbaine**

La végétation bénéficie de multiples avantages en contexte urbain. Elle ajoute des nouveaux paramètres, tant dans les phénomènes physiques qui sont plus difficiles à caractériser, que dans la perception et la représentation de la végétation en lien avec l'espace construit (Guillaume et al., 2014). Dans son étude, Vinet propose une analyse multi-sensorielle pour évaluer les qualités de la végétation en milieu urbain (Vinet, 2010) ;

- En effet, le changement de couleurs, de textures, de formes et de densité des plantes en ville enrichit le paysage urbain. Et les différentes couleurs apportées par les multiples essences d'arbres et de fleurs à travers les saisons (figure 1.13) réjouit le cadre de vie urbain ; elles sont appréciées pour leur esthétisme (Klemm et al., 2015).
- L'impact acoustique du végétal est dû par l'atténuation des fréquences du spectre sonore (Robinette 1972 ; Vinet, 2010), ces effets sont parfois directs et parfois indirects à plusieurs échelles spatiales (de la rue, du quartier, et de la ville) (Guillaume et al., 2014). Vinet ajoute aussi les différentes sensations dues au jeu du vent à travers les feuillages : en été, le bruissement des feuilles prévient d'un courant d'air et donne une sensation de rafraîchissement. Et en hiver, le sifflement

du vent dans les branches nous renseigne sur les conditions météorologiques défavorables (Vinet, 2010)

- L'odorat est sollicité par la qualité olfactive des végétaux, dont certains souvenirs liés à une période de l'année ou à une région sont attachés à l'odeur des essences présentes.



**Figure 1.13** – Les couleurs d'un arbre à travers les différentes saisons.

<https://science.howstuffworks.com/nature/climate-weather/atmospheric/climate-change-four-seasons-redefine.htm>.

La végétation apporte des effets bénéfiques sur la santé des personnes et leur bien-être. Les milieux urbains dotés d'espaces verts offrent aux habitants une meilleure santé physique globale, ces espaces motivent à l'exercice physique (Akpınar, 2016 ; Redon, 2017). Vu que la végétation contribue à réduire la pollution<sup>13</sup>, elle a un effet thérapeutique indirecte pour les personnes ayant des maladies respiratoires ou les personnes sensibles à la pollution atmosphérique (document APPA Nord-Pas de Calais – 2014). En l'occurrence, la végétation a aussi une incidence psychologique positive : elle représente des espaces de méditation, d'apaisement et de détente<sup>14</sup>.

<sup>13</sup> Dans ce contexte, il faut noter aussi que les espèces végétales émettrices de COV (composés organiques volatils), comme les isoprènes ou les monoterpènes aggravent la pollution de l'air (in Document APPA Nord-Pas de Calais – 2014).

<sup>14</sup> Certaines études montrent que Les patients après une opération chirurgicale qui sont dans une chambre qui bénéficie d'une vue sur un espace végétalisé, ont besoin de moins d'antidouleurs, que les autres patients ayant une fenêtre donnant sur un mur en briques (in Document APPA Nord-Pas de Calais – 2014).

Les flux de chaleur et de vapeur d'eau qui impactent le confort thermique d'un individu et son entourage sont influencés par la végétation par différents phénomènes : l'ombrage, l'augmentation de l'humidité relative de l'air et les modifications des caractéristiques de l'écoulement de l'air (Guillaume et al., 2014). La végétation a un impact direct et indirect sur le confort thermique d'une personne ; l'effet direct est lié au fait que la personne échange avec une surface végétale au lieu d'une surface construite. Cependant, l'effet indirect est défini par la manière dont la présence de la végétation modifie l'environnement où se trouve la personne (Guillaume et al., 2014)<sup>15</sup>.

L'élément végétal peut favoriser aussi l'attractivité d'un lieu à des fins touristiques ou commerciales (Redon, 2017). En fin, les bâtiments dotés d'un toit ou façade végétalisée, ou de la présence de la végétation dans la rue sous forme de pelouse ou arbre bénéficient d'une diminution de la demande énergétique (Dania et al, 2015 ; Redon, 2017).

### **1.3.4 Les grandeurs et les formes de l'arbre en ville**

Les arbres sont généralement classés selon leur grandeur ou leur développement : petit, moyen et grand (Le Gourrièrec, 2012). Les hauteurs des arbres selon Larue (1996) sont présentées dans la figure 1.14. En effet, les hauteurs présentées dans les catalogues sont souvent les hauteurs à la maturité et dans des conditions optimales. En ville certains arbres n'arrivent pas à cette hauteur (Le Gourrièrec, 2012). Didier Larue (1996) distingue neuf types de port<sup>16</sup> d'arbre (figure 1.15). Le port d'arbre est choisi selon le type d'espace à aménager. Par exemple, Oujour (2020) indique que les formes fastigiées ou colonnaires sont utilisées dans les espaces urbains (le long des voiries et des rues). Cependant, les arbres avec des ports évasés ou étalés sont plutôt trouvés dans les espaces dégagés.

### **1.3.5 Effet de la végétation sur le microclimat urbain**

L'impact physique de la végétation en milieu urbain affecte l'environnement thermique, la qualité de l'air et les niveaux sonores (Dimoudi et Nikolopoulou, 2003). En effet, Kurn et al (1994) affirment dans leur étude que la végétation atténue l'îlot de chaleur non pas en

---

<sup>15</sup> A ce titre, L'échange radiatif de l'individu avec des surfaces à températures moindres car ombragées ainsi qu'un effet d'îlot de chaleur urbain réduit sont des éléments des effets indirects de la végétation (Guillaume et al., 2014).

<sup>16</sup> On distingue sous le nom du port d'arbre la forme qu'un arbre prend naturellement.

refroidissant l'air, mais en le réchauffant moins. La végétation modifie les propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques du milieu urbain (De Munck, 2013), et

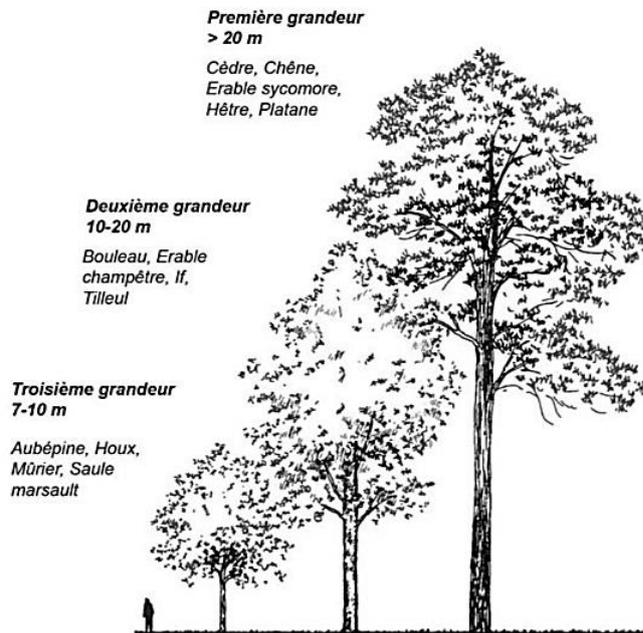


Figure 1.14 – Les hauteurs et grandeurs des arbres. Source : Le Gourrièrec, 2012, selon Larue, 1996.

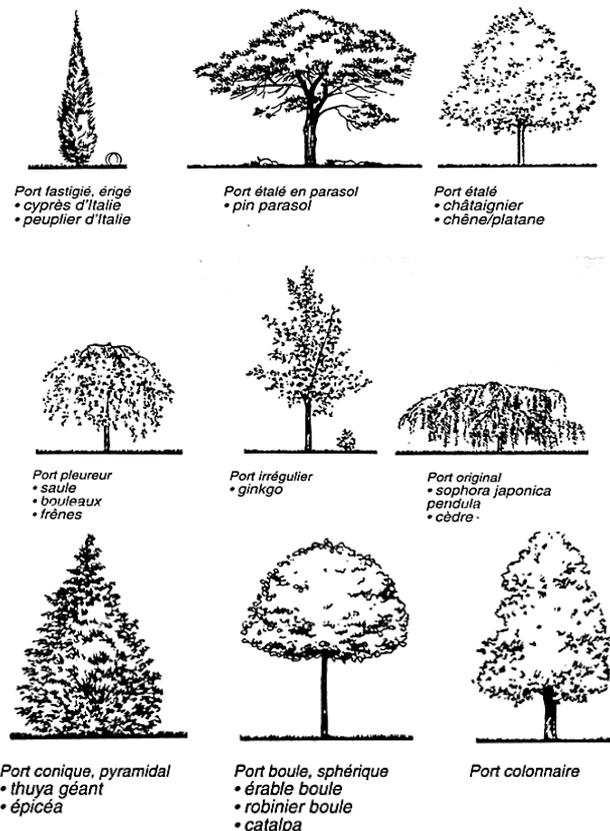


Figure 1.15 – Phénomène du piégeage radiatif en ville (à gauche) et en zone rurale (à droite). Source : GREUILLET et GALSOMIÈS, 2013. D'après : Griffiths, 1976.

peut être considérée comme une des solutions d'adaptation des villes au changement climatique.

Les végétaux contribuent à diminuer la température en milieu urbain principalement en combinant trois processus physiques (De Munck, 2013) (Figure 1.16) :

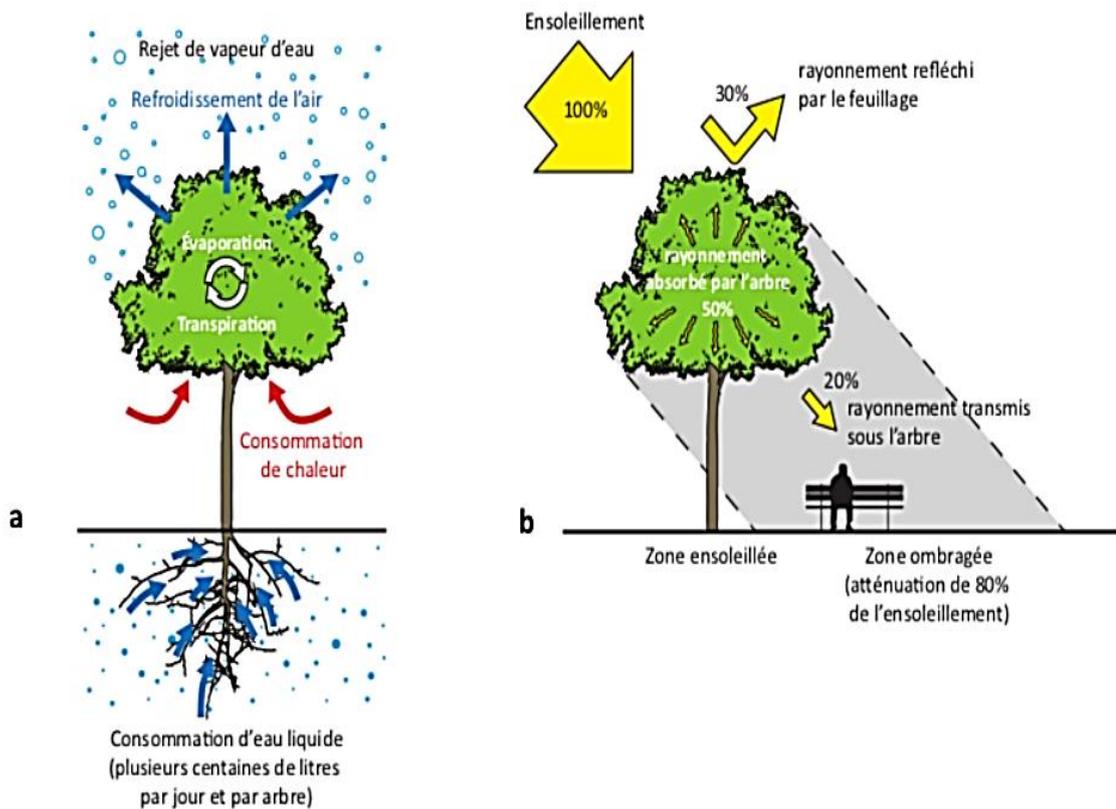
- L'évaporation de l'eau présente dans le sol et captée par le feuillage des végétaux constitue le premier processus. Elle peut se produire de jour comme de nuit (De munck, 2013).
- Deuxièmement, il s'agit de la transpiration des plantes, qui intervient en journée au cours de la photosynthèse. Cette action transforme l'eau liquide en vapeur d'eau, et rafraîchit l'environnement immédiat des plantes (De Munck, 2013). Ce phénomène de transpiration est effectué au niveau des stomates des plantes, qui sont utiles à la photosynthèse et captent aussi les polluants et gouvernent les échanges gazeux (figure. 1.16 et 1.17).
- Le troisième processus est l'ombre portée par la végétation sur les surfaces artificielles qui diminue la chaleur emmagasinée dans ces surfaces et limite leur réchauffement (Oke et al., 1989). Cette action dépend principalement de la hauteur de la végétation ainsi que de la densité foliaire (LAI) du houppier (De Munck, 2013).

La présence d'arbres dans la ville modifie le bilan énergétique des surfaces urbaines représenté dans l'équation 1.2 par des voies différentes. Comme illustré dans la figure 1.18, la présence de la géométrie tridimensionnelle (3D) des arbres à l'intérieur d'un canyon urbain peut intercepter et réfléchir efficacement les rayonnements à ondes courtes (solaire) et à ondes longues (terrestres), ce qui entraîne des effets d'ombrage et de piégeage radiatifs respectivement (Wang et al 2018).

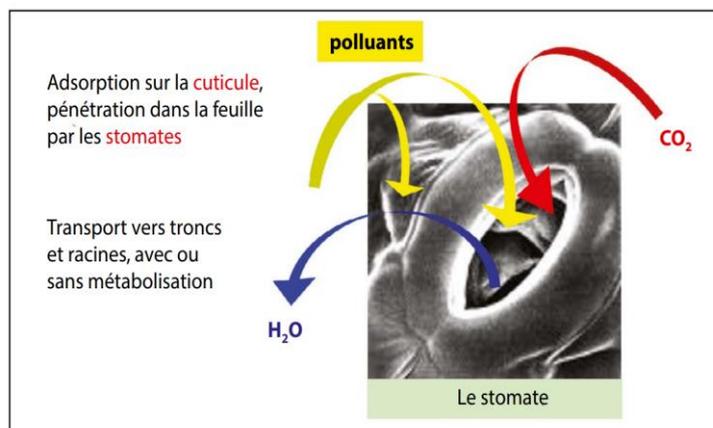
Brunet (2016) a comparé, dans son étude, deux scènes extrêmes : une où seule la végétation est présente, et une autre où seul le bâti est présent (voir figure 1.19). Ses résultats ont identifié cinq processus à l'origine de l'îlot de chaleur urbain :

- L'évapotranspiration (E) est faible en milieu urbain, caractérisé par des surfaces artificielles, contrairement aux surfaces végétales qui transpirent une grande partie de l'eau qu'elles absorbent dans le sol.
- L'interception de l'énergie radiative causée d'un côté par le faible albédo des matériaux urbains, et d'un autre côté « le piège radiatif » dans les canyons urbains.

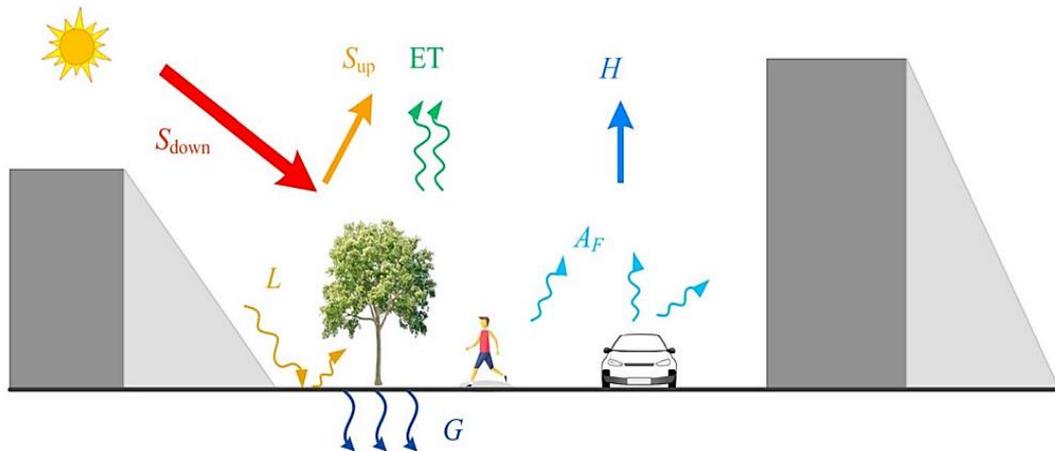
- Un stockage de chaleur élevé ( $\Delta S$ ) par les matériaux urbains qui ont une grande inertie thermique.
- L'existence de sources de chaleur anthropiques dans la ville ( $Q$ ), qu'on ne trouve pas dans une scène végétale.
- Enfin, la faible vitesse des vents dans la ville diminue les échanges thermiques avec l'atmosphère.



**Figure 1.16 :** Les processus d'évapotranspiration et d'ombre fournies par la végétation. Source : APURE, 2012.

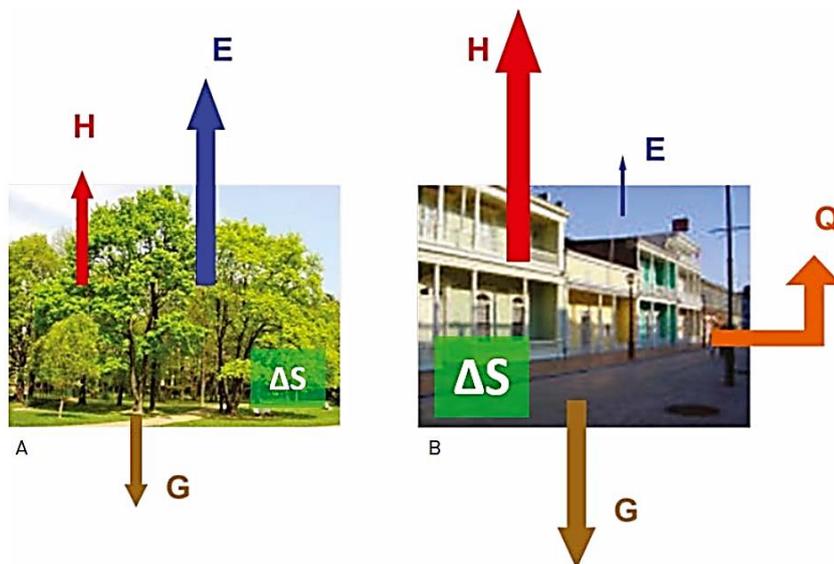


**Figure 1.17 :** Le rôle des stomates des plantes dans la photosynthèse et l'interception des polluants. Source : Brunet, 2016.



**Figure 1.18 :** Schéma du rôle participatif des arbres urbains dans le bilan énergétique des surfaces terrestres urbaines.  $S_{down}$  est le rayonnement descendant à ondes courtes,  $S_{up}$  est le rayonnement ascendant à ondes courtes,  $L$  est le rayonnement à ondes longues,  $ET$  est l'évapotranspiration,  $H$  est le flux de chaleur sensible,  $G$  est le flux de chaleur du sol et  $A_F$  est la chaleur anthropique. Source : Wang et al 2018.

En effet, l'effet d'oasis engendré par la végétation crée des îlots de fraîcheur urbains grâce à l'évapotranspiration de l'eau interceptée par le feuillage et la transpiration des plantes. L'énergie prélevée contribue au refroidissement de l'environnement tout en créant une source d'humidité locale et en améliorant le confort thermique extérieur.



**Figure 1.19 :** Bilan d'énergie pour une scène végétale (A) et une scène de bâti (B). (E) représente l'évaporation, (Q) les sources internes, et ( $\Delta S$ ) le stockage d'énergie. Source : Brunet, 2016.

### 1.3.6 Etat de l'art autour des recherches sur l'effet de la végétation sur le microclimat urbain

Sugawara et al. (2006) ont mené une étude sur les températures de l'air dans l'un des plus grands parcs de Tokyo (Japon) et ont obtenu une différence moyenne de température d'environ 1°C entre le parc et les zones construites avoisinantes entre 9h et 15h. Une différence similaire a également été observée par Armson (2012) dans le parc Whitworth à Manchester (Royaume-Uni).

Bowler et al. (2010) ont effectué une méta-analyse montrant que les parcs urbains rafraîchissent légèrement plus l'air la nuit que le jour. En présence d'arbres, l'impact du rafraîchissement des parcs est deux fois plus important qu'en présence de pelouse (Monteiro et al., 2016).

Le travail d'Oliveira et al. (2011) étudie l'effet climatique d'un parc de 0,24 ha situé dans le quartier de Campo de Ourique, à l'ouest de Lisbonne (Portugal). Les auteurs ont réalisé une campagne de mesure in situ pendant six jours en été, en 2006 et 2007. L'objectif de l'étude était d'analyser l'influence de la végétation sur les températures de l'air et les températures moyennes radiantes. La différence maximale de température de l'air enregistrée était de 6,2°C entre le parc et les rues voisines. Cette différence était moins importante avec les rues les plus proches du parc. En ce qui concerne les températures moyennes radiantes (TMR) mesurées dans des endroits ombragés, l'écart variait entre 3°C et 5°C, avec les valeurs maximales enregistrées dans les rues.

L'étude de Chen-Yi (2012) analyse l'effet rafraîchissant d'un petit parc urbain de 0,5 ha situé dans la ville de Taipei, à Taiwan. Deux stations de mesure ont été installées dans le parc et sept autres ont été placées dans les rues environnantes pendant une journée de juin. Les données recueillies ont permis de constater une diminution moyenne de la température de l'air de 1,5°C dans le parc, et une diminution maximale de 6,1°C par rapport aux rues voisines.

Plusieurs études se sont intéressées au rôle des arbres dans l'atténuation des îlots de chaleur urbains. Selon McPherson (1994), l'effet direct des arbres sur la température de l'air en ville est moins important que leur effet indirect grâce à l'ombrage qu'ils génèrent sur les surfaces minérales.

Spronken-Smith et Oke (1998) ainsi que Hamada et Ohta (2010) ont constaté que l'effet rafraîchissant des arbres dans un parc est dû à une combinaison de deux processus : l'ombrage et l'évapotranspiration. Kjelgren et Montague (1998), après avoir comparé la transpiration de différents arbres selon leur lieu de plantation, qu'il s'agisse d'une surface enherbée ou pavée, ont conclu que l'évapotranspiration est directement liée au type de sol. En effet, la fermeture des stomates de certaines espèces (voir Figure 1.16) est due à l'atteinte du seuil de différence de pression de vapeur d'eau entre l'air et les feuilles, ce qui entraîne une augmentation de la température du feuillage. Plus la température du sol est élevée, plus l'arbre transpire (Marjorie et al., 2014). Il est donc possible qu'un arbre planté au-dessus d'une surface d'asphalte transpire davantage que le même arbre planté au-dessus d'une surface enherbée (Marjorie et al., 2014). Du point de vue du confort thermique des usagers en ville, les houppiers des arbres sont intéressants dans la mesure où ils représentent des surfaces radiatives et convectives fraîches (Marjorie et al., 2014). Dans ce sens, Rahman et al. (2011) ont mené une étude sur la physiologie des feuilles d'arbres de type poirier d'ornement (*Pyrus calleryana*) dans les rues de Manchester (Royaume-Uni). Ces arbres ont poussé dans différents types de sols. Les chercheurs ont conclu que les paramètres physiologiques des feuilles des arbres qui avaient poussé au-dessus d'un sol drainant avaient une meilleure performance.

Dans la ville de Manchester, Armson (2012) a comparé les températures de surfaces composées de pelouse ou de béton. Les surfaces enherbées pleinement ensoleillées présentaient des températures légèrement inférieures à celle de l'air, cependant, les surfaces enherbées ombragées étaient de 1 à 4 °C inférieures à la température de l'air. Les surfaces de béton ombragées ont enregistré des températures supérieures à celle de l'air de quelques degrés, et celles exposées au soleil étaient supérieures de plus de 19°C.

Selon Dimoudi et Nikolopoulou (2003), la végétation offre des gains de fraîcheur importants. Les auteurs affirment qu'une rangée d'arbres peut réduire la température de l'air environnant d'environ 1 °C. Cependant, remplacer des bâtiments par un parc en centre-ville peut générer une baisse de température de l'air environnant allant de 2 °C à plus de 6 °C.

Akbari et Taha (1992), afin de lutter contre les îlots de chaleur urbains (ICU), ont examiné le potentiel d'utilisation de la végétation et de matériaux à haut albédo dans quatre villes canadiennes. Les résultats montrent que l'augmentation de l'albédo des matériaux de

construction de 20% et du taux de végétation de 30% peut économiser jusqu'à 35% d'énergie liée au chauffage et jusqu'à 10% d'énergie liée à la climatisation.

Aussi, dans un parc à Tama New Town à l'est de Tokyo, Ca et al. (1998) ont mesuré les températures de l'air au-dessus d'une surface enherbée et ont enregistré des températures inférieures de 2°C à celles mesurées au-dessus des surfaces en bitume.

À Montréal, Lachance et al. (2006) ont observé qu'un secteur situé en bordure d'une zone végétalisée dans l'arrondissement de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve est caractérisé par une température de surface plus fraîche de 6°C par rapport à un secteur situé en bordure d'une zone industrielle sans végétation.

Ces dernières années, plusieurs études se sont basées sur les toitures végétales, qui ont principalement un impact sur la consommation énergétique des bâtiments et le confort intérieur. La distribution des flux de chaleur impliqués dans le bilan de surface est l'élément le plus important dans l'étude de l'impact des toitures végétalisées sur le climat urbain (Marjorie et al., 2014). En effet, lors d'une journée ensoleillée de 26 °C, un toit foncé peut atteindre jusqu'à 80 °C, un toit blanc 45 °C et un toit végétalisé 29 °C (Fischetti, 2008 ; Liu et Bass, 2005).

De Munck (2013), qui a réalisé des études à Paris, insiste sur la présence de la végétation au sol avec des arbres, qui permet de réduire la température dans les rues au niveau du piéton, alors que les toitures végétales ont peu d'impact à cette hauteur.

Feng et al. (2010) ont étudié le bilan énergétique des toitures extensives<sup>17</sup>. Leurs résultats montrent que seulement 1,2 % de l'énergie est stockée par les plantes et le sol, et transférée vers les espaces du dernier étage du bâtiment. Dans ce cas, l'énergie est absorbée par la toiture végétale, et ne contribue ni au réchauffement du bâtiment ni à celui de l'atmosphère. D'autre part, De Munck (2013) a rapporté que, selon ses résultats, une toiture végétale peut économiser environ 7% de l'énergie annuelle d'un bâtiment grâce à son pouvoir isolant.

Les façades végétales ont des comportements différents de ceux des toitures végétales, selon Marjorie et ses collaborateurs (Marjorie et al., 2014). Ces façades ont trois effets sur le microclimat :

---

<sup>17</sup> La toiture extensive désigne une toiture végétalisée constituée de végétaux de plus petite taille telle que les pelouses de sédums, graminées, plantes endémiques... Elle nécessite un support de culture relativement fin (de l'ordre de 10 cm), dans ce sens, elles sont moins lourdes à mettre en œuvre. Généralement, elles sont utilisées pour leurs performances thermiques, hydrologiques et énergétiques (Wark et Wark, 2003).

- Un effet radiatif : pendant la journée, les feuilles protègent le mur du soleil. Grâce à leur capacité à transpirer, les feuilles absorbent une grande partie du rayonnement solaire sans augmenter en température.
- Un effet conductif : la végétation a la capacité d'isoler le mur et de modifier son inertie thermique.
- Un effet convectif : les plantes limitent les échanges énergétiques de la paroi par convection, en réduisant la vitesse de l'air près des murs.

Les façades végétales sont classées en trois familles (Marjorie et al., 2014) :

- Les façades constituées de plantes grimpantes disposées sur une structure isolée de la paroi.
- Les façades avec des plantes grimpantes directement sur la paroi.
- Les murs vivants, composés par les plantes et leur substrat.

Une étude réalisée par Pérez et al. (2011) en Espagne a examiné le comportement climatique d'une façade végétalisée par des plantes grimpantes déposées sur une structure isolée de la paroi, à travers une simulation numérique et des mesures in situ. Les résultats ont montré que les façades minérales sans la deuxième peau végétale présentaient une hausse de température moyenne de 5,5°C, avec une valeur maximale de 15,2°C. La température dans l'espace intermédiaire entre le végétal et le bâtiment était inférieure de 3,8°C à celle de l'air en période estivale, et supérieure de 1,4°C en période froide.

Dans une étude menée par Alexandri et Jones (2008), le comportement des façades végétalisées composées de plantes grimpantes directement sur la paroi a été analysé sous différents climats. Les résultats ont montré que ces façades ont une capacité importante à réduire les températures de l'air dans les rues. À Riyad (Arabie Saoudite), la température de l'air dans un canyon est réduite en moyenne de 9,1 °C grâce à l'effet des murs végétaux. Dans le cas d'un climat humide à Hong Kong (Chine), la réduction de température atteint 8,4 °C grâce à la présence de murs et de toits végétalisés. Selon les auteurs, l'effet de la végétation est essentiellement lié à sa quantité et à la géométrie des rues.

### 1.3.7 Quelques exemples des stratégies de végétalisation à travers le monde face au changement climatique

#### 1.3.7.1 Le patrimoine vert à Montréal

Le patrimoine vert d'une ville représente une variété de bienfaits aux citoyens, il est composé de milieux naturels, d'espaces verts, de grands arbres, d'arbustes et de plantes herbacées. À Montréal, on a choisi de miser sur la stratégie de la présence accrue de végétation et le renforcement du patrimoine vert (comme le parc du Mont Royal illustré dans la figure 1.20) pour lutter contre les îlots de chaleur urbains.



**Figure 1.20 :** Mont Royal et centre-ville à gauche. Source : <https://avenues.ca/partir/infos-voyage/15-choses-mont-royal-montreal>. L'intérieur du parc Mont Royal à droite. Source : <https://www.ledevoir.com/societe/587684/le-stationnement-du-mont-royal-de-nouveau-ferme>.

Une étude menée par des universités montréalaises a révélé qu'entre 1984 et 2005, la présence des îlots de chaleur urbains était associée à la perte de couverture végétale dans la grande région de Montréal. L'étude a également montré que le comportement thermique suit la transformation de l'occupation du sol, et que la chaleur est accrue au-dessus des surfaces minéralisées qui ont remplacé la végétation (telles que les aires de stationnement).

Comme de nombreuses villes nord-américaines, Montréal a élaboré un indice de canopée afin d'établir une référence pour suivre la progression du verdissement au fil du temps. La ville s'est fixé pour objectif de passer de 20% à 25% de cet indice. Pour y parvenir, le Plan d'action Canopée (PAC) 2012-2021 a été mis en place. Ce plan prévoit la conservation de la canopée existante et la plantation de 300 000 arbres sur les terrains publics et privés. D'autres initiatives de la ville complètent également le PAC, ce qui a permis d'identifier des moyens innovants pour verdir les quartiers densément peuplés. Ces actions s'inscrivent dans le contexte de réduction de la circulation automobile et de promotion des modes de transport actifs tels que la marche et

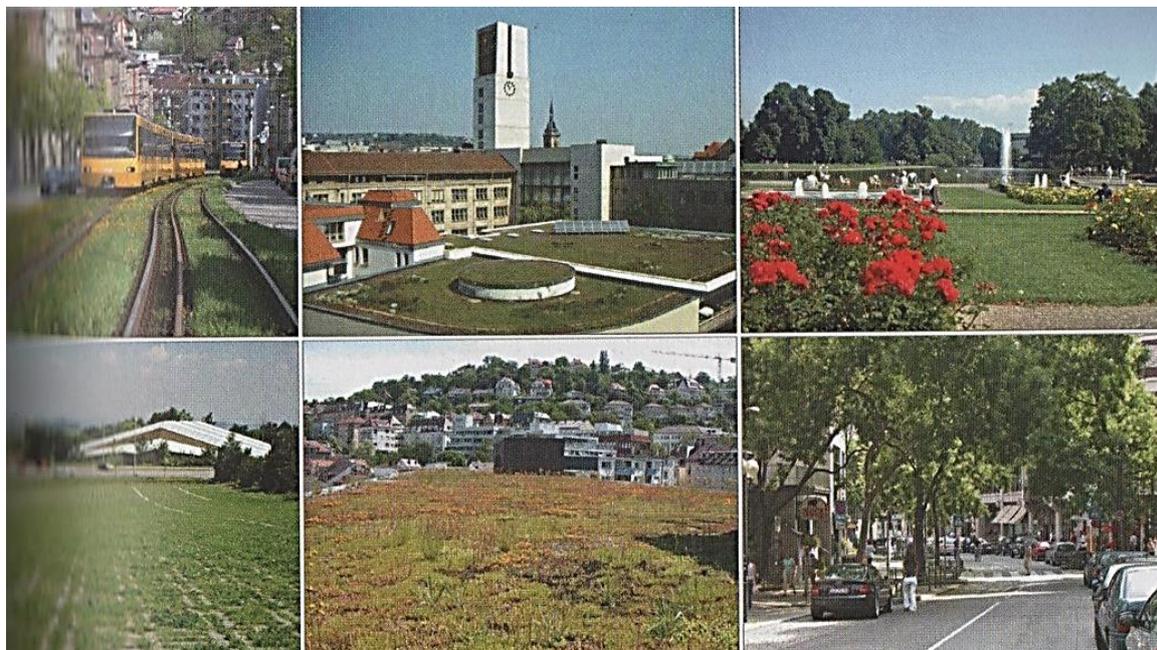
le vélo. Le PAC est un outil puissant qui contribuera à faire du verdissement un élément structurant de la ville de Montréal.

### 1.3.7.2 La ville verte de Stuttgart

La promotion des espaces verts est une mesure prometteuse en matière de lutte contre le réchauffement climatique. La conception d'espaces verts et d'espaces ouverts contribue à l'attractivité d'une ville et à son climat. Stuttgart a tout mis en œuvre pour introduire la verdure dans ses projets urbains, grâce aux plans d'aménagement urbain dans les nouveaux projets. L'intensification de la végétalisation des voies de circulation, des façades et des toitures constitue également une action précieuse dans les quartiers existants.

Les voies ferrées urbaines vertes sont une particularité de Stuttgart (figure 1.21). Environ 50 kilomètres sur 250 de rails sont déjà engazonnés. Dans un contexte de confort thermique, l'ombre générée par les arbres est prise en considération lors de l'aménagement des places publiques. En effet, la ville possède environ 38 000 arbres, un nombre qui ne cesse d'augmenter.

Stuttgart accorde une importance particulière à la végétalisation des toitures, car cela présente des avantages pour le climat local ainsi que pour l'équilibre hydraulique. Entre 1986 et 2009, un programme d'aide communale a encouragé le financement et la réalisation de 65 000 m<sup>2</sup> de toitures végétalisées.



**Figure 1.21 :** Espaces verts à Stuttgart. Source : Reuter (2015).

### 1.3.7.3 Plan stratégique de végétalisation de la ville de Genève

Pour atténuer les effets du réchauffement climatique, la ville de Genève a opté pour la végétalisation de l'espace public. Le service des espaces verts de la ville de Genève (SEVE) a planté 965 arbres entre 2013 et 2018 et a installé 1,5 million de plantes fleuries dans l'espace public, selon les propos de Guillaume Barazzone, conseiller administratif en charge du Département de l'environnement urbain et de la sécurité, cité dans le Plan stratégique de végétalisation en ville édité par la Ville de Genève. Le plan stratégique de végétalisation 2030 vise à renforcer le maillage vert dans les quartiers, en passant d'une logique de poches de verdure à une trame verte sur l'ensemble du territoire. Il est considéré comme un outil d'aide à la décision pour définir les lignes directrices de végétalisation. Les espaces libres sont aménagés en fonction de leurs particularités fonctionnelles et esthétiques (voir figure 1.22). Chacun de ces espaces peut suggérer une composition végétale spécifique.



**Figure 1.22 :** Vision stratégique de Genève, Projeter selon les espaces de référence. Source : Daniel Kunzi, blvdr, 2019.

## Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse bibliographique a été présentée, ce qui nous a permis d'identifier les indicateurs liés à la formation des îlots de chaleur urbains (ICU) et de souligner l'importance du rôle de la végétation dans leur atténuation. En effet, les ICU ont fait l'objet de nombreuses études depuis les travaux de Oke T.R., qui ont marqué le début de cette recherche en 1981.

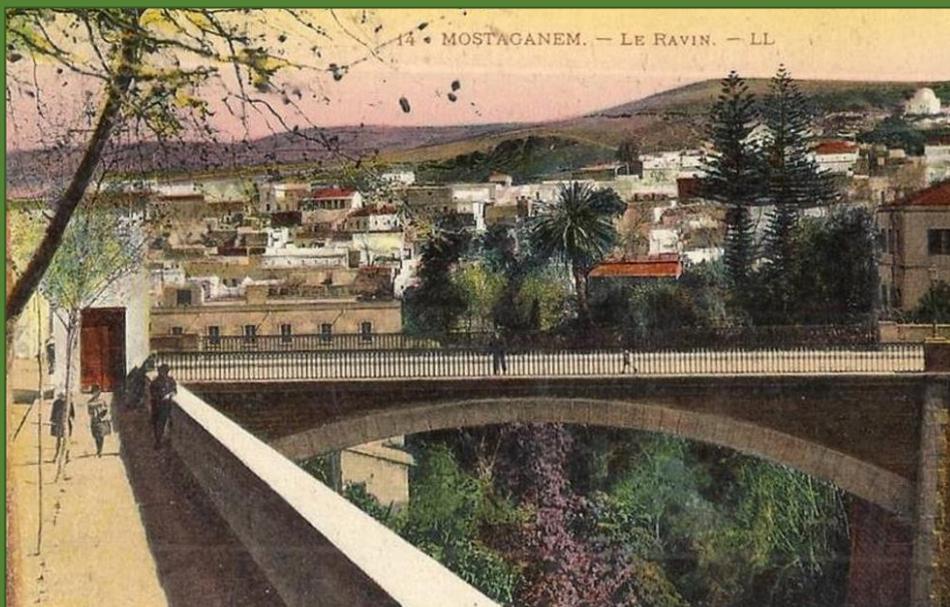
L'analyse des ICU a progressé grâce à l'évolution des outils de mesure et a porté sur plusieurs villes du monde.

La réduction de la présence de la végétation en ville agit sur le bilan énergétique et radiatif et est considérée comme l'un des principaux facteurs de la variation spatiale des ICU. Cependant, notre analyse de l'état de l'art dans ce chapitre concernant l'influence de la végétation sur le microclimat urbain a révélé un manque d'études sur le rôle de la répartition spatiale de la végétation dans l'atténuation des températures estivales élevées en milieu urbain.

Il convient de rappeler que l'objectif de cette thèse est d'étudier l'effet de la végétation sur le microclimat et l'atténuation des ICU dans la ville de Mostaganem. Ainsi, il est important de prendre connaissance des concepts d'ICU et de végétation qui seront utilisés tout au long de notre travail. Sur la base de ces notions développées dans ce chapitre, notre prochaine étape consistera à analyser le climat de la ville de Mostaganem ainsi que son évolution future d'une part, et l'évolution spatio-temporelle de la végétation dans la ville d'autre part.

# CHAPITRE 02

## MOSTAGANEM, LA VILLE ENTRE CLIMAT MEDITERRANNEEN ET VEGETATION



Mostaganem, le ravin en 1951

*« ...Malgré tous les progrès de son développement, son centre était toujours resté la place de la république, ou les platanes de 1864 sont maintenant centenaires... on reproduira cette description touchante que faisait M. Thireau de notre jardin public, en 1912 et qui même maintenant, conserve toute sa valeur et évoquera la nostalgie de tous ceux qui l'ont quitté... » Arnaud, 1968, pour Mostaganem.*

## Introduction

L'îlot de chaleur urbain est engendré par la ville, ses matériaux, sa morphologie, ses activités, ainsi que ses conditions climatiques et météorologiques. Par conséquent, il affecte le confort des citoyens, les éléments naturels urbains et le climat de la ville (Valette et Cordeau, 2010). Comme Mostaganem est une ville méditerranéenne par excellence, elle subira de fortes chaleurs estivales dépassant parfois les 40°C, selon les projections futures. Par conséquent, le phénomène d'îlot de chaleur urbain s'intensifiera. Dans cette région méditerranéenne, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain peut varier de 2°C pour une ville de 1000 habitants jusqu'à 12°C pour les villes dépassant les 1 million d'habitants (Hubert, 2015).

Avant d'entamer l'analyse des îlots de chaleur urbains (ICU) de la ville de Mostaganem et l'étude de l'impact de la végétation dans l'atténuation de ces ICU, ce chapitre est dédié à une présentation du climat global de la ville ainsi que de l'évolution de sa végétation.

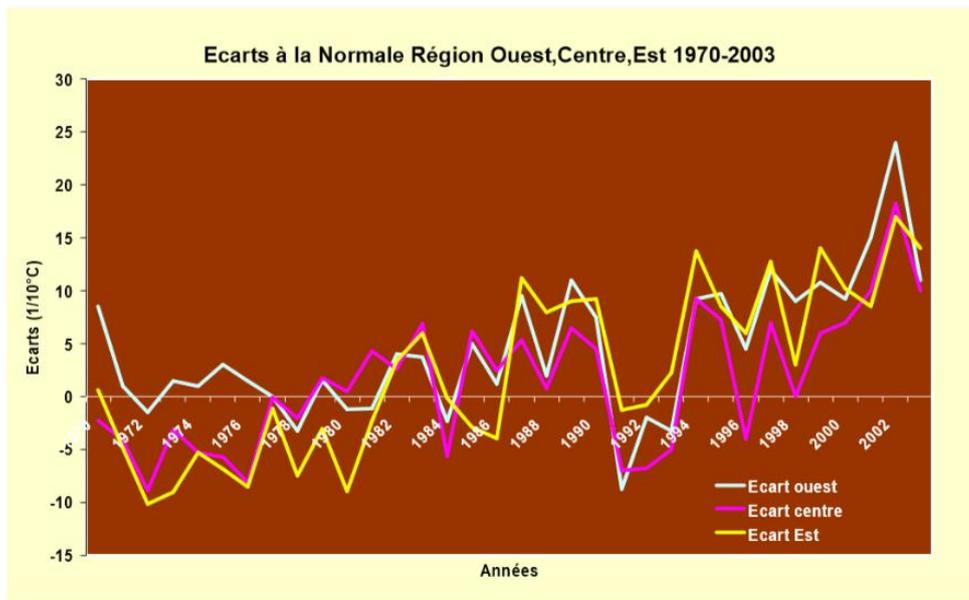
Une première partie du chapitre est consacrée à la notion du changement climatique et d'ICU (îlots de chaleur urbains) en Algérie, suivie par une présentation générale de la ville de Mostaganem. Ensuite, une autre partie de ce chapitre est dédiée à la description détaillée de son climat (pluviométrie, températures, vents et tempêtes) ainsi qu'à sa projection future. Après cet aperçu, les conséquences du changement climatique à Mostaganem, en particulier l'augmentation du nombre de jours de canicule et de la consommation énergétique, sont examinées. Enfin, une analyse de l'évolution de la place de la végétation à travers le développement urbain de la ville est réalisée.

## 2.1 Changement climatique et ICU en Algérie

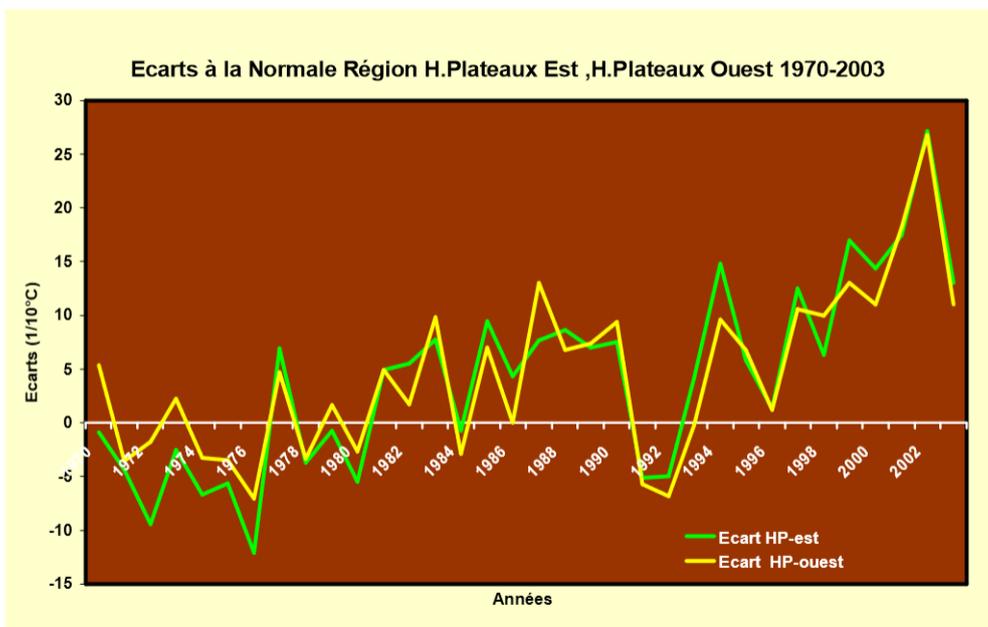
### 2.1.1 Changement climatique en Algérie

Le continent africain émet seulement 4% des émissions mondiales de GES, mais subit le plus les conséquences du changement climatique (Kairé et al., 2015). En raison de sa situation géographique en Afrique du Nord et de son appartenance à la région méditerranéenne, l'Algérie est particulièrement exposée à ces conséquences, notamment la diminution des ressources en eau, la dégradation des écosystèmes, l'assèchement des oueds, la diminution des rendements agricoles, les inondations, les températures élevées et la sécheresse (Achour-Bouakkaz 2006 ; Farah Abdelhafid, 2014). La majeure partie de l'Algérie est désertique, ce qui la rend particulièrement vulnérable aux effets du climat hyper-aride, aride et semi-aride. L'étude menée par Boucherf (2004) affirme qu'il y a une augmentation des écarts annuels de pluie et de

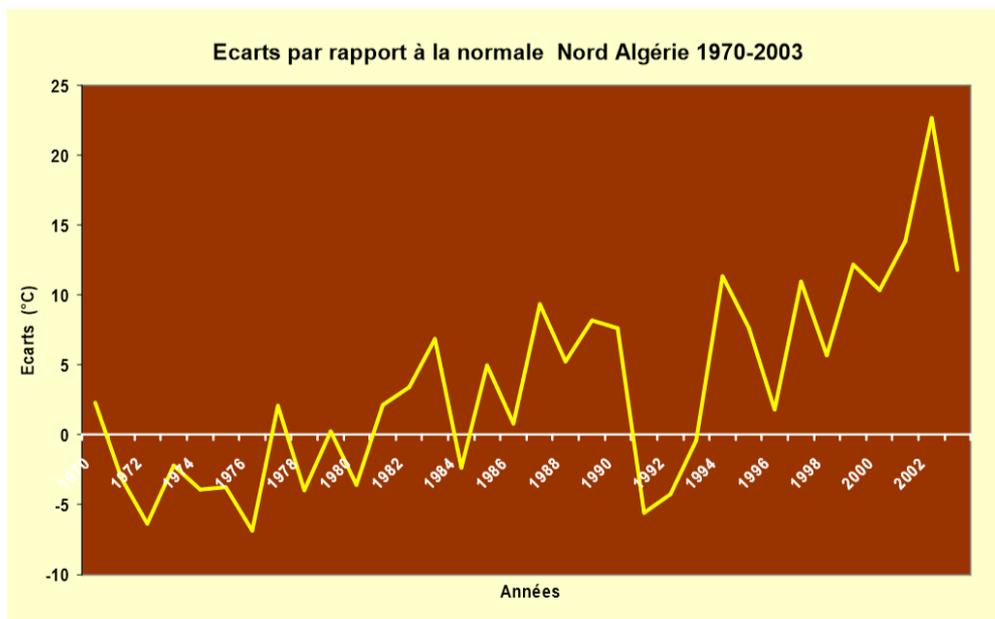
température sur l'ensemble du territoire national. Cette augmentation varie en fonction de l'année et de la ville concernée (Ibka, 2013). L'étude porte sur trois régions de l'Algérie: la région Ouest, Centre et Est; la région des Hauts plateaux Est et Ouest; et la région du nord. Les écarts de température par rapport à la normale de ces régions sont présentés dans les figures 2.1, 2.2 et 2.3. Selon les graphiques, on peut distinguer deux périodes: la première allant de 1970 à 1983, et la seconde allant de 1984 à 2003.



**Figure 2.1 :** Ecart par rapport à la normale des températures des régions : Ouest, Centres, et Est de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : D.Boucherf, ONM Alger 2004.



**Figure 2.2 :** Ecart par rapport à la normale des températures des régions : Hauts plateaux Est et Hauts plateaux Ouest de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : D.Boucherf, ONM Alger 2004.



**Figure 2.3 :** Ecart par rapport à la normale des températures des régions Nord de l'Algérie entre 1970 et 2003. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : D.Boucherf, ONM Alger 2004.

Durant la première période, de 1970 à 1983, des écarts négatifs ont été enregistrés, variant entre 0 et -10 °C. À partir de 1981, les valeurs sont devenues positives pour la région du Nord, et à partir de 1983 pour les Hauts plateaux, ainsi que pour les régions Est, Ouest et Centre (Ibka, 2013 ; Achour-Bouakkaz, 2006).

Cependant, la deuxième période, de 1984 à 2003, est caractérisée par des valeurs positives des écarts de température jusqu'en 2002, variant de 0 à 15 °C, avec une valeur maximale de 25 °C enregistrée en 2003. Entre 1992 et 1994, on observe un léger retour vers des valeurs négatives (Ibka, 2013 ; Achour-Bouakkaz, 2006).

Pour l'ensemble des régions, les écarts de températures ont atteint des valeurs positives à partir de 1981. Par la suite, ces valeurs ont augmenté pour atteindre un maximum de 25 °C en 2003 (Ibka, 2013 ; Achour-Bouakkaz, 2006). À partir de ces résultats, une tendance au changement climatique à long terme en Algérie est clairement établie (Achour-Bouakkaz, 2006).

À partir des variations saisonnières des données climatiques présentées dans le tableau 2.1, une simulation des scénarios climatiques a été réalisée afin de projeter l'évolution du climat algérien pour l'année 2020. Les deux paramètres analysés dans cette étude sont l'évolution des températures et des précipitations à l'échelle nationale (Achour-Bouakkaz, 2006). La simulation

a été effectuée en utilisant le modèle MAGICC et en adoptant le scénario IS92a<sup>18</sup> du GIEC. Les résultats des facteurs climatiques traités par saison sont présentés dans le tableau 2.2.

**Tableau 2.1 :** Variation saisonnière de températures T, des précipitations de l’ETP (E) et de l’indice hydrique (h) entre 1931-1960 et 1961-1990. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D’après : ONM Alger 2004.

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Année
Oran	T: +0,7°C P: -16 mm E: +36mm H: +52 mm	+0,9°C -43mm +11mm 54mm	0°C +25mm +12mm -13mm	+0,2°C +12mm +51mm +39mm	0,45°C -22mm +110 mm +132mm
Alger	+0,3°C +2mm +8mm +6mm	+0,8mm -32mm -2mm +30mm	-0,3°C +16mm -19mm -35mm	-0,2°C +9mm +37mm +28mm	0,15°C -5mm +24mm +29mm
Annaba	+0,2°C -52mm -20mm +32	+0,8°C -35mm -22mm +13mm	+0,3°C -20mm +25mm -5mm	+0,2°C +2mm +33mm +31mm	0,4°C -105mm -34mm +71mm

**Tableau 2.2 :** Résultats obtenus par le modèle MAGICC pour la projection climatique en Algérie à l’horizon 2020. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D’après : ONM Alger 2004.

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
T : Température	T : hausse de 0,7 à 1,1 °C	T : hausse de 0,65 à 0,8 °C, un max de +0,8°C au sud	T : hausse de 0,85 à 0,95 °C, un max de +0,95 °C au sud	T : hausse de 0,85 à 1,05 °C
P : Précipitations	P : baisse de 6 à 8%	P : baisse de 10%	P : baisse de 5 à 9%	P : baisse de 8 à 13%

Au cours de l’année, les deux paramètres ont subi des changements considérables. On observe une augmentation moyenne des températures de 0,8°C à 1°C, ainsi qu’une diminution des précipitations pouvant atteindre 13% en été (Achour-Bouakkaz, 2006).

### 2.1.2 Les engagements de l’Algérie pour la lutte contre le changement climatique

L’Algérie fait partie des pays signataires des déclarations du Sommet de la Terre à Rio en 1992 et de celui de Johannesburg en 2002. À partir des années 2000, elle a commencé à mettre en œuvre les principes du développement durable (Berezowska-Azzag, 2011). En 2010, elle a

<sup>18</sup> Six scénarios alternatifs du GIEC (IS92a à f) ont été publiés dans le rapport complémentaire de 1992 à l’évaluation du GIEC. Ces scénarios contenaient un large éventail d’hypothèses affectant la façon dont les futures émissions de gaz à effet de serre pourraient évoluer en l’absence de politiques climatiques au-delà de celles déjà adoptées. IS92a a été largement adopté comme scénario standard à utiliser dans les évaluations d’impact, bien que le scénario original du GIEC recommande que les six scénarios d’émissions IS92 soient utilisés pour représenter l’étendue de l’incertitude dans les émissions (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>).

adopté par la loi n°10-02 du 29 juin 2010 le Schéma National du Territoire SNAT 2030, qui repose largement sur les principes du développement durable. Les principes du SNAT 2030 ont ensuite été intégrés dans les différentes politiques sectorielles par des schémas opérationnels tels que l'industrie, l'énergie, les ressources hydriques, les transports, l'agriculture, le tourisme, etc. (Berezowska-Azzag, 2011). Selon Berezowska-Azzag, l'Algérie est encore novice dans le domaine du développement durable, il n'est donc pas surprenant de constater ses faiblesses sur le terrain (Berezowska-Azzag, 2011). L'accord de Paris, adopté par 196 pays lors de la COP 21 du 30 novembre au 12 décembre 2015, vise à limiter le réchauffement climatique à un niveau inférieur à 2°C et à poursuivre les efforts pour ne pas dépasser 1,5°C par rapport au niveau préindustriel. En 2016, l'Algérie a ratifié l'accord de Paris et a défini des objectifs ambitieux pour lutter contre les changements climatiques (Ghezloun, 2021). Tout d'abord, des mesures d'atténuation (tableau 2.3) ont été proposées par l'Algérie en se référant au scénario Business As Usual (BAU) du 4ème rapport du GIEC (2007) (Berezowska-Azzag, 2016). Ces mesures avaient pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) de 7 à 22% d'ici 2030.

**Tableau 2.3 :** Principales actions d'atténuation par secteurs. Source : Berezowska-Azzag, 2016. D'après : CPDN, Algérie, 2015.

<b>4 Piliers d'atténuation Secteur de gouvernance</b>	De conception et de recherche (ANCC)
	De coordination et de suivi (CNC)
	De planification (Plan National Climat PNC, MEAT)
	De vérification (système MRV)
<b>Secteur de l'Energie</b>	27% d'intégration des Energies renouvelables dans l'électricité à 2030
	Généralisation de l'éclairage performant (HPE)
	Isolation thermique de logement
	Augmentation des parts du GPL et du GN dans les carburants Réduction du volume des gaz torchés à moins de 1% à 2030
<b>Secteur des Déchets</b>	Valorisation des déchets
	Compostage des déchets organiques et verts
	Valorisation énergétique du méthane des centres d'enfouissement technique et des stations de traitement des eaux usées
<b>Secteurs des Forêts</b>	Boisement et reboisement
	Prévention des incendies de forêts
	Modernisation des moyens de lutte contre les incendies
<b>Secteurs d'information, d'éducation et de formation</b>	Information, sensibilisation et communication sur les enjeux climatiques
	Programme national d'éducation, de formation et de recherche sur les changements climatiques

Deuxièmement, pour s'adapter au changement climatique, l'État prend des mesures (tableau 2.4) en accordant la priorité à la préservation des ressources naturelles face aux risques des phénomènes extrêmes, ainsi qu'à la protection des populations (Berezowska-Azzag, 2016).

Cependant, les villes qui sont considérées comme les principaux responsables du réchauffement climatique car elles représentent plus de 75 % de la consommation globale d'énergie (Terrin, 2015), ne sont pas encore considérées comme des acteurs d'adaptation.

**Tableau 2.4 :** Résultats obtenus par le modèle MAGICC pour la projection climatique en Algérie à l'horizon 2020. Source : Achour-Bouakkaz, 2006. D'après : ONM Alger 2004.

<b>Institutionnelles</b>	Adaptation du cadre institutionnel
	Renforcement des capacités institutionnelles et humaines pour la lutte contre les CC
<b>Réglementaires</b>	Adaptation du cadre réglementaire de planification et de gestion de la résilience des écosystèmes
	Mise en place des moyens de financement des mesures d'adaptation spécifiques
<b>Opérationnelles</b>	Elaboration de plans régionaux et locaux d'adaptation aux CC
	Mise en place d'un dispositif de veille et d'alerte
	Renforcement des capacités pour la gestion des événements climatiques extrêmes

Dans ce contexte de lutte contre le changement climatique, Ghezloun a mis en évidence quatre stratégies adoptées par l'Algérie dans sa lutte contre les changements climatiques (Ghezloun, 2021) :

- 1- Le Plan d'Action du Gouvernement du 06 février 2020.
- 2- Le cadre législatif encadrant le domaine des énergies renouvelables en Algérie.
- 3- Le Plan National Climat (PNC) de l'Algérie (Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables, septembre 2019).
- 4- L'adoption du Programme des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique à l'horizon 2030.

### 2.1.3 Etudes sur le confort thermique et l'ICU en Algérie

En Algérie, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la question des microclimats en ville ainsi qu'à la notion d'îlot de chaleur urbain. Ali-Toudert (2006) a étudié la contribution de la conception des rues, c'est-à-dire le rapport d'aspect (ou rapport hauteur/largeur, H/L) et de l'orientation solaire, au développement d'un microclimat confortable au niveau de la rue pour les piétons à Ghardaïa, une région caractérisée par un climat chaud et sec. Les résultats montrent que l'heure et la période de la journée pendant lesquelles le stress thermique extrême se produit dépendent fortement du rapport d'aspect et de l'orientation de la rue. Ces deux facteurs urbains étudiés peuvent atténuer le stress thermique extrême s'ils sont combinés de manière appropriée (Ali-Toudert et Mayer, 2006). Toujours à Ghardaïa, Boukhelkhal et Bourbia (2016) ont évalué l'impact de la géométrie urbaine et de l'ombre des arbres sur le microclimat des espaces ouverts à Ksar Tafilelt. Leurs résultats indiquent qu'en milieu chaud et aride, le confort thermique d'un

piéton peut être significativement modifié par la géométrie de la rue, l'orientation, la végétation et l'albédo. Les variations de la température de l'air ambiant, de la température de surface, de l'humidité et de la vitesse du vent peuvent être modérées selon plusieurs caractéristiques, telles que les matériaux utilisés, la couleur, la géométrie, ainsi que les éléments naturels tels que la végétation et les surfaces d'eau (Boukhelkhal et Bourbia, 2016).

À Constantine, Merrouche (2010) a effectué une recherche sur l'impact de la végétation sur le microclimat de certains espaces publics. Elle conclut que la température de l'air au centre-ville est plus élevée que celle de la banlieue représentée par la station météorologique. Cela est principalement dû au manque de végétation, aux activités anthropiques intenses, aux matériaux de construction qui restituent la chaleur stockée le jour la nuit, et au faible albédo de l'asphalte (0,05). Merrouche (2010) affirme également que la végétation influe sur la température de l'air enregistrée, le taux d'humidité relative et la vitesse de l'air. Dans la même ville, Boucheriba et Bourbia (2011) ont analysé le confort thermique dans un canyon urbain. Selon leurs résultats, un canyon urbain avec un rapport hauteur/largeur (H/W) élevé est plus avantageux pour le confort thermique des usagers en été, tout en veillant à choisir une orientation offrant plus de ventilation pendant la période estivale pour diminuer la chaleur piégée dans les canyons. Pour le climat de Constantine, l'orientation Nord est recommandée (Boucheriba et Bourbia, 2011).

À Jijel, et à travers des simulations, Bouketta et Bouchahm (2012) ont mis en évidence l'effet de la géométrie urbaine sur le flux de vent et la ventilation extérieure naturelle dans la ville. L'étude a montré que la géométrie du plan de sol et la disposition des bâtiments déterminent et modèlent le flux de vent. En raison du climat humide et des vents forts, une géométrie compacte est recommandée pour un site à haute altitude. En revanche, elle conviendra moins aux zones basses (Bouketta et Bouchahm, 2012).

Ibka (2013) a mené une étude sur l'évolution des îlots de chaleur urbains à Oran sur une période allant de 1987 à 2010, en se basant sur l'analyse diachronique d'une série d'images satellites Landsat (à haute résolution). Il a montré que l'étalement urbain à partir des années 90, réalisé au détriment des terres agricoles, et la diminution de la surface plantée ont contribué au réchauffement de la ville. Quand le couvert végétal diminue, la température moyenne augmente, ce qui est dû à la réduction du phénomène d'évapotranspiration et du taux de surfaces ombragées (Ibka, 2013).

À Biskra, Boukhabla (2015) a analysé l'effet de la géométrie de la rue sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. L'étude a enregistré une température de l'air plus élevée dans les rues orientées

N-S que dans les rues canyon orientées NO-SE. Ceci confirme une fois de plus l'importance de l'effet de l'orientation des canyons sur les températures de l'air.

La mise en œuvre d'une relation entre un paramètre climatique, qui est la température, et un facteur urbanistique représenté par la densité du plan bâti, a été réalisée par Achour-Bouakkaz (2006) en choisissant la ville d'Alger comme cas d'étude. L'étude a révélé qu'en 1998, une température maximale de 33,3°C a été enregistrée à Dar El Beida pour le mois d'août. En revanche, à Bouzaréah, qui bénéficie d'un important pourcentage de végétation, la température enregistrée pour la même année était de 28°C, ce qui donne une différence de température de l'ordre de 5,3°C (Achour-Bouakkaz, 2006).

## **2.2 Climat de la ville de Mostaganem**

### **2.2.1 Présentation générale de la ville**

Ville des Mimosas, capitale du Dahra ou encore Ville des Quarante-quatre marabouts telle que décrite par Yamani et Brahim (2009), Mostaganem est une ville côtière de la Méditerranée, située au Nord-Ouest du territoire national, à 80 km à l'est d'Oran (Figure 2.4). Elle couvre une superficie de 50 km<sup>2</sup> et s'étend sur une façade maritime d'une longueur de 21,6 km (Yamani et Brahim, 2009). Depuis 1988, la ville a connu une croissance élevée de sa population ; elle est passée de 101 600 habitants en 1977 à 145 960 en 2008 (ONS, Algérie), avec un taux de croissance annuelle considéré comme l'un des plus importants en Algérie, soit de l'ordre de 1,6 % pour la période entre 1998 et 2008 (Bentekhici et Yousfi, 2013). Cette population est majoritairement rurale. Durant les années 1990, la ville a reçu une importante migration de la population des villages ruraux avoisinants (Moumene, 2011).

La ville de Mostaganem bénéficie d'une situation géographique stratégique, grâce à son port de commerce important et à sa connexion à plusieurs wilayas du pays par des voies de communication, lui conférant ainsi une influence régionale. La wilaya offre un paysage contrasté exceptionnel, avec ses plages rocheuses, sablonneuses et boisées.

L'agriculture, la pêche et le tourisme (notamment balnéaire) occupent une place prépondérante dans le développement économique et la spécificité de la ville. En effet, la wilaya de Mostaganem est considérée comme l'un des premiers producteurs agricoles du pays. Sa surface agricole utile (SAU) représente 58 % de son territoire (Senouci et Trache, 2014).



Figure 2.4 : Situation de la ville de Mostaganem. Source : Bachir et al, 2021.

### 2.2.2 Mostaganem, la ville au climat méditerranéen

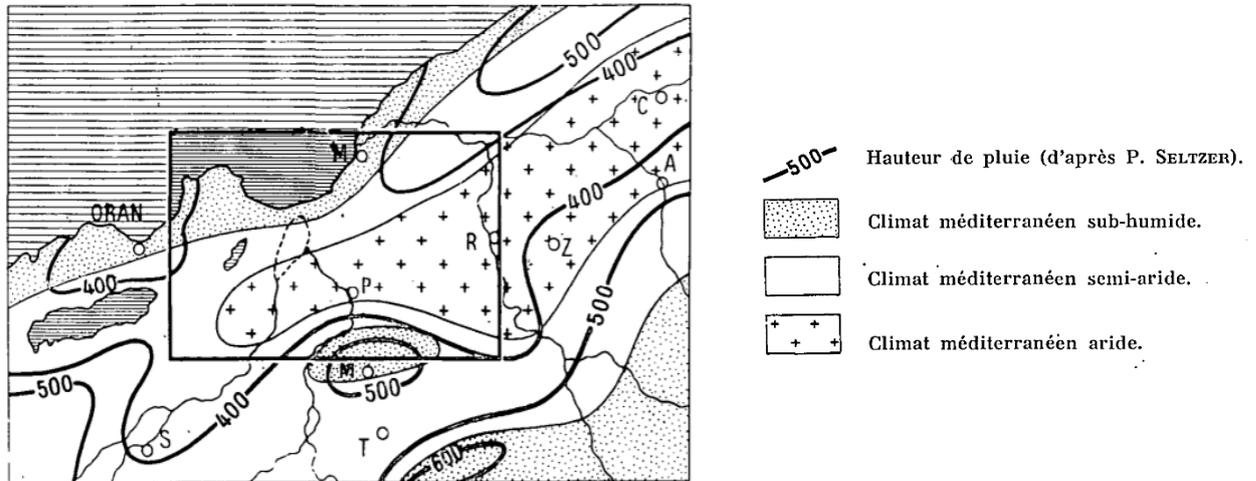
La ville de Mostaganem bénéficie d'un climat méditerranéen avec des caractéristiques semi-arides (Senouci et Trache, 2014). Selon J. Boulaïne (1955), la ville s'inscrit dans une région au climat méditerranéen sub-humide (Figure 2.5), qui se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux.

Dans leur étude sur la vulnérabilité aux changements climatiques de la wilaya de Mostaganem, Senouci et Trache (2014) ont présenté les paramètres météorologiques de la wilaya. Ils se sont basés sur les données de la station météorologique de Mostaganem et de l'Office National de la Météorologie pour la période de 1977 à 2012. Cette période correspond à l'émergence du phénomène de changement climatique global dans les années 70.

En effet, de par sa situation géographique, la ville de Mostaganem présente toutes les caractéristiques des régions méditerranéennes qualifiées de "hot spot"<sup>19</sup> du changement climatique. Dans ce contexte, elle est exposée à l'augmentation des températures, à l'évolution des vents et du régime des précipitations, aux variations dans les paramètres marins tels que la température et la salinité, ainsi qu'à l'élévation du niveau de la mer, ainsi qu'à l'augmentation

<sup>19</sup> Une zone est désignée de « hot-spot » du changement climatique lorsque les effets attendus de ce changement sont particulièrement marqués ou ses impacts sur l'environnement ou différents secteurs d'activité risquent d'être très accentué. Source : <http://www2.cnrs.fr/sites/communique/fichier/mediterranee.pdf>

des phénomènes extrêmes tels que la sécheresse, les tempêtes, les canicules et les pluies torrentielles (Senouci et Trache, 2014).



**Figure 2.5 :** Carte climatique sommaire. Source : J. Boulaine « Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie au 1/200.000 ». Feuille de Mostaganem n°21, Pédologie – CS, n°6 Alger, 1955.

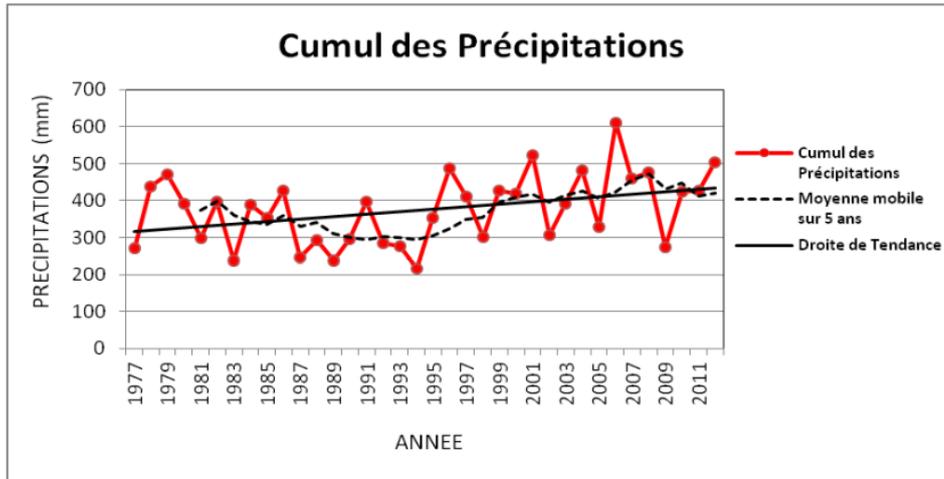
### 2.2.2.1 La pluviométrie

La hauteur des précipitations a atteint 377 mm à Mostaganem selon Boulaine en 1955. Senouci et Trache ont enregistré une moyenne annuelle de 376 mm sur la période 1977-2012, avec une tendance à la hausse de l'ordre de 3,2 mm par an. Cette tendance est illustrée dans la figure 2.6.

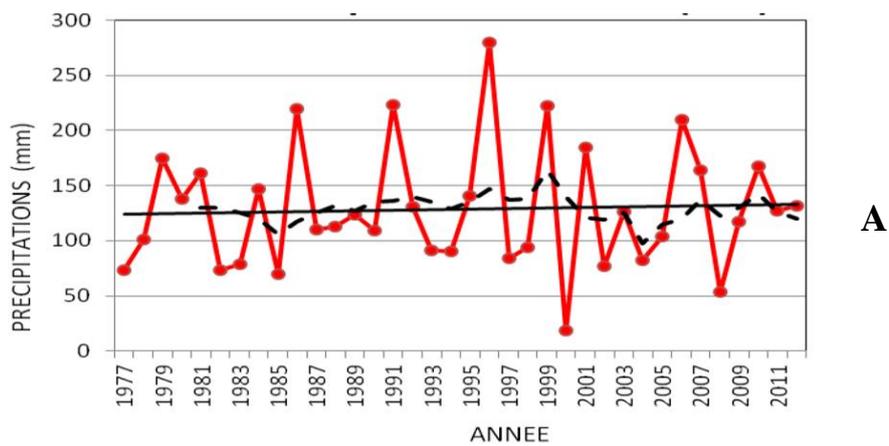
À l'échelle saisonnière, l'automne est considéré comme la saison la plus pluvieuse avec une moyenne de 156 mm par an, suivie de l'hiver (128 mm/an), puis du printemps (68 mm/an) et enfin de l'été avec 23 mm/an (Senouci et Trache, 2014) (voir Figure 2.7).

La période entre 1997 et 2013 a été caractérisée par des pluies torrentielles (voir Figure 2.8). Avec une moyenne de 398 mm, elle est considérée comme plus arrosée que la période entre 1987 et 1997 (Megherbi, 2015).

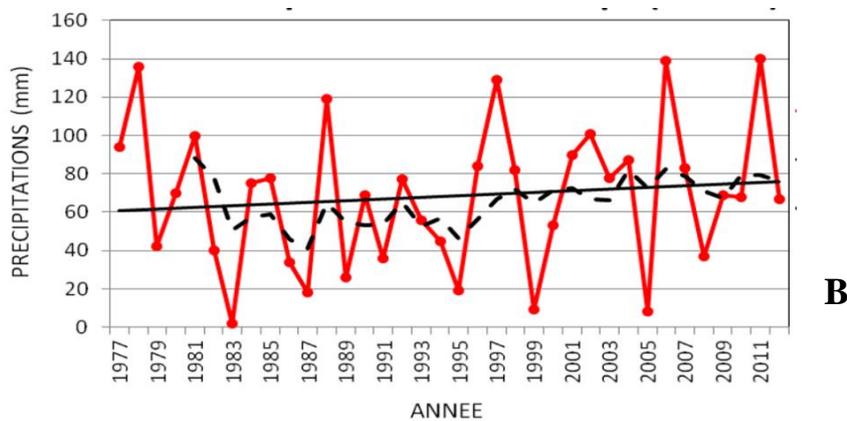
Dans la nuit du 27 novembre 1927, Mostaganem a vécu une crue de l'Oued Ain Séfra qui a failli emporter près de la moitié de la ville (voir Figure 2.9). Selon les témoignages, l'Oued était sorti de son lit et le quart des habitants du vieux quartier de Tjidditt avait péri. Pour les habitants de Suika Tahtania, cette nuit fut l'une des plus terrifiantes.



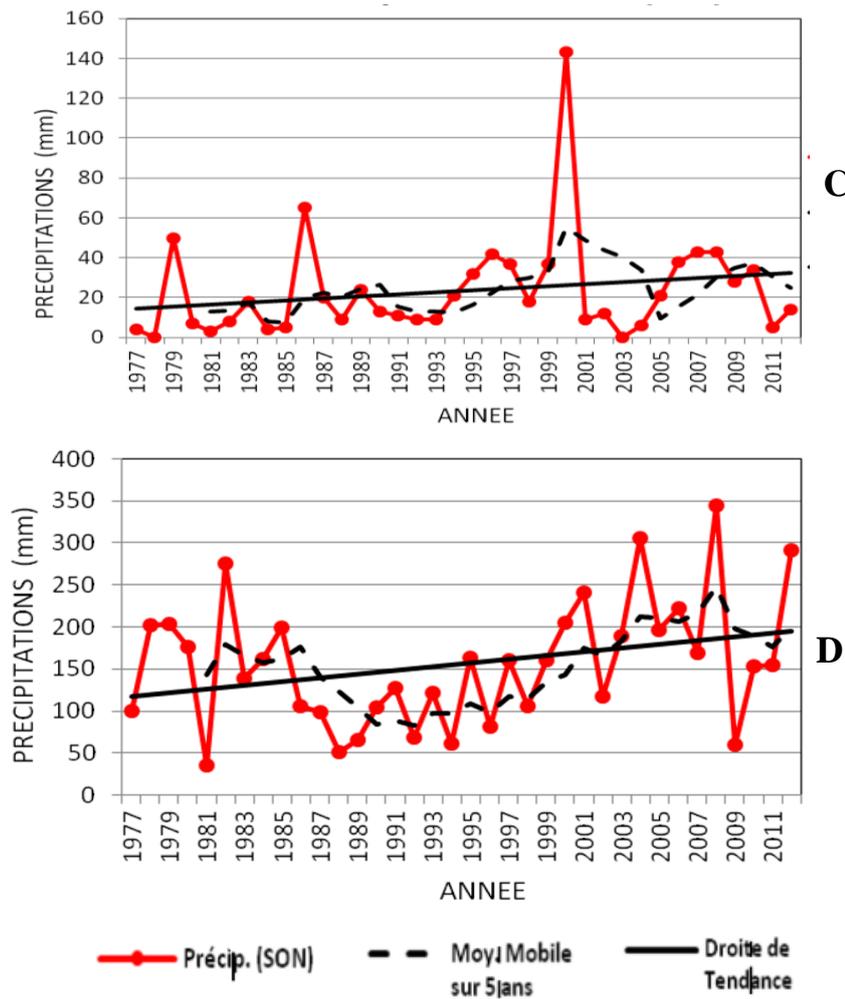
**Figure 2.6 :** Les précipitations annuelles de la wilaya de Mostaganem - la station de Mostaganem au cours de la période 1977-2012. Source : ONM. Dans Snouci et Trache, 2014.



A

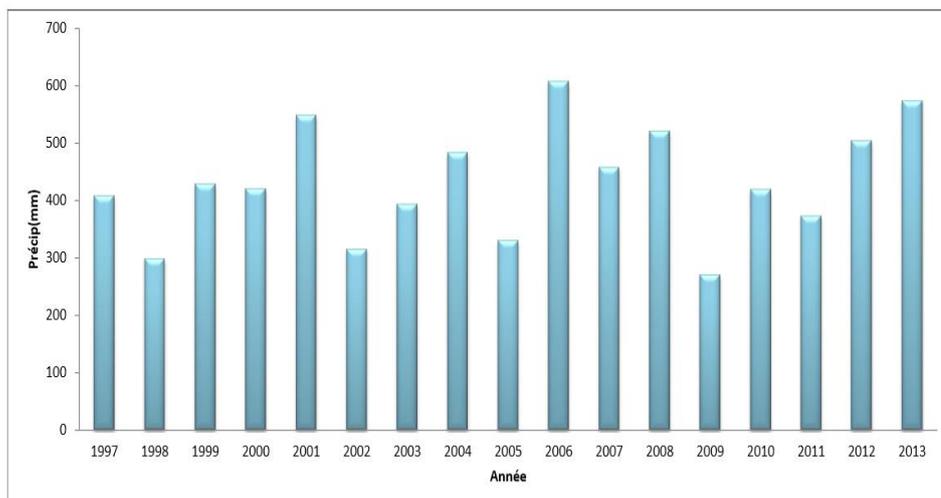


B

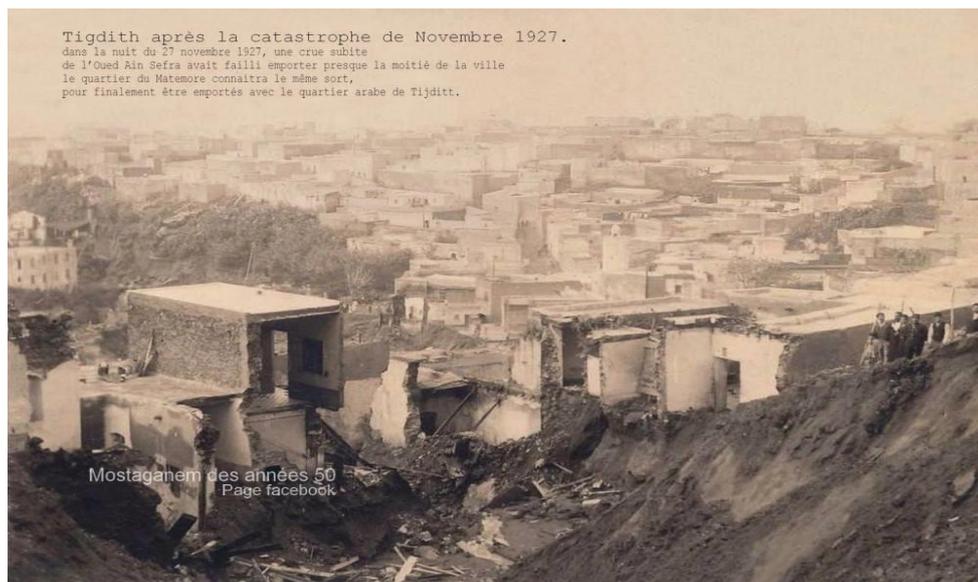


**Figure 2.7** : Evolution saisonnière de la moyenne des précipitations à la station de Mostaganem - la station de Mostaganem au cours de la période 1977-2012. Source : ONM, dans Snouci et Trache. 2014.

**A** : Précipitations hiver (DJF), **B** : Précipitation Printemps (MAM), **C** : Précipitations ETE (JJO), **D** : Précipitations Automne (SON).



**Figure 2.8** : Précipitations à l'échelle de la région de Mostaganem entre 1997 et 2013. Source : Megherbi, 2015.



**Figure 2.9** : La crue de l'Oued Ain Séfra de la nuit du 27 Novembre 1927. Source : <https://fr-fr.facebook.com/379416508756013/photos/linondation-de-1927-%C3%A0-tigiditil-y-a-de-cela-plus-de-86-ans-la-ville-de-mostagane>.

Cette catastrophe a touché de nombreuses familles (plus de 300 morts) et un nombre considérable de vestiges en témoignent, tels que l'ancien moulin en ruine qui se trouve en face du mausolée de Sidi Allel El Ksouri (Benejam, 1977).

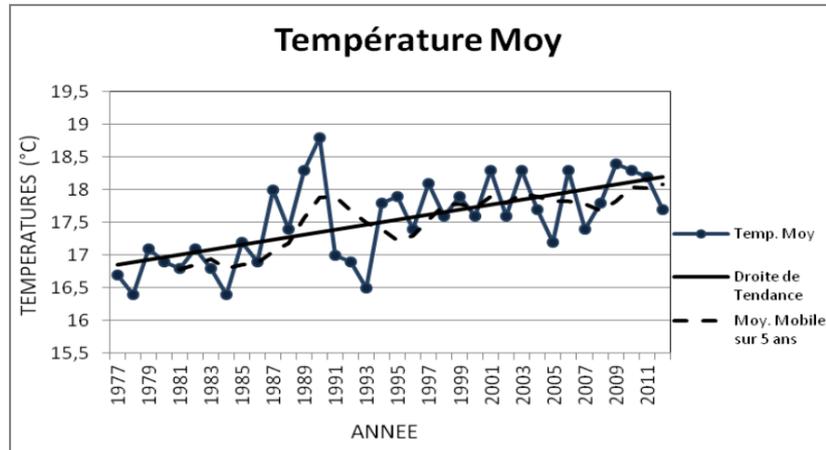
### 2.2.2.2 Les températures

J. Boulaïne a noté que la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud était de 28,4 °C à Mostaganem, tandis que la moyenne des températures minimales du mois le plus froid était de 9 °C (Boulaïne, 1955). La mer a une influence sur le climat de la ville en produisant des températures hivernales plus élevées et des températures estivales plus faibles (Boulaïne, 1955). La figure 2.10 illustre l'évolution des températures moyennes annuelles de Mostaganem. La température moyenne enregistrée entre 1977 et 2012 était de 17,5°C (Senouci et Trache, 2014). La moyenne des températures maximales pour la même période est de 23,2°C, avec une hausse de l'ordre de 0,4 °C par décennie selon le test de tendance de Mann-Kendall<sup>20</sup> sur la période de l'étude considérée (Senouci et Trache, 2014) (Figure 2.11).

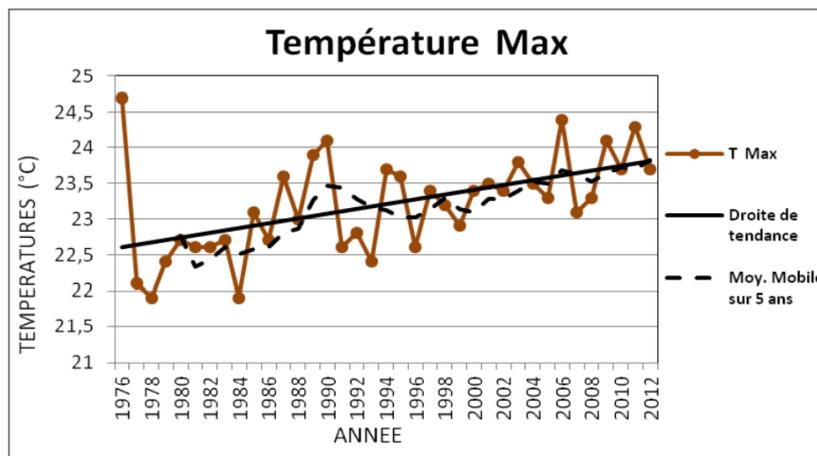
Cependant, Les températures maximales et minimales prises en compte dans l'étude de Kuhn sont les suivantes (Kuhn, 2020):

<sup>20</sup> Le test de tendance de Mann-Kendall sert à définir par un test non paramétrique si une tendance est identifiable dans une série temporelle qui comprend éventuellement une composante saisonnière. (<https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/tests-de-tendance-de-mann-kendall>).

- Température maximale : + 45 °C
- Température minimale : - 5 °C



**Figure 2.10** : Evolution des températures moyennes annuelles de Mostaganem. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.



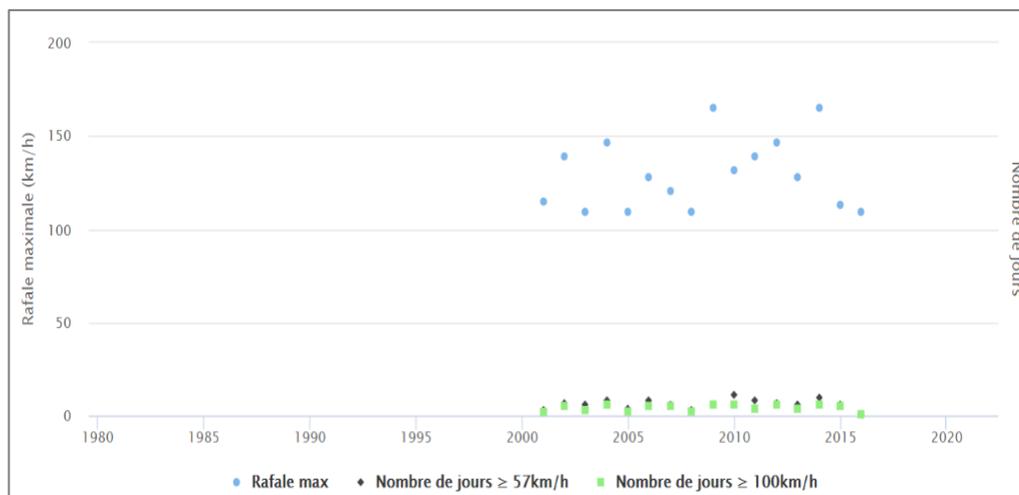
**Figure 2.11** : Evolution des températures maximales annuelles de Mostaganem. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.

### 2.2.2.3 Vent et tempêtes

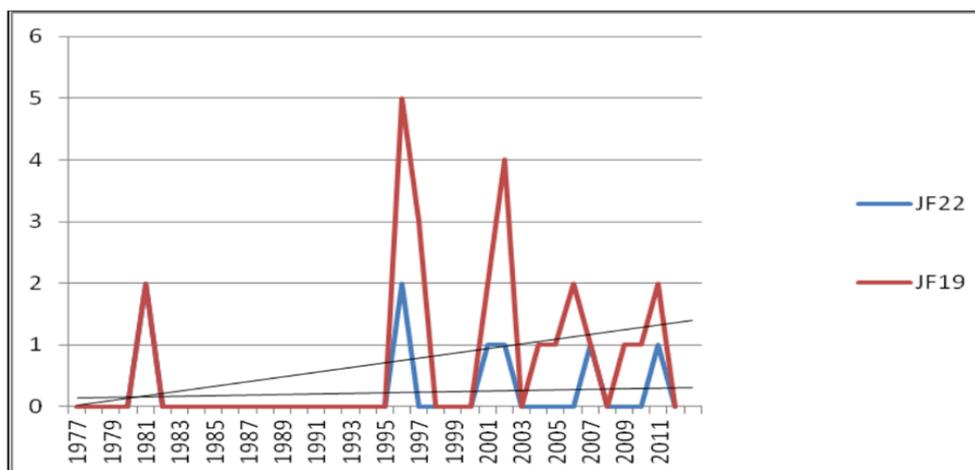
L’histogramme de la Figure 2.12 représente l’évolution des vents et des rafales à Mostaganem. On remarque qu’en 2009, il y a eu six jours avec un vent supérieur à 57 km/h, six jours avec un vent supérieur à 100 km/h et des rafales de vent allant jusqu’à 164,8 km/h. En 2014, on constate dix jours avec un vent supérieur à 57 km/h et six jours avec un vent supérieur à 100 km/h (Kuhn, 2020).

Pour les deux catégories de tempêtes (modérées avec une vitesse maximale du vent supérieure à 19 m/s et fortes avec une vitesse maximale du vent supérieure à 22 m/s), on remarque une

augmentation de la fréquence de tempêtes, avec une augmentation plus marquée pour les tempêtes modérées (Senouci et Trache, 2014) (Figure 2.13).



**Figure 2.12** : Evolution des vents et rafales à Mostaganem. Source : Kuhn, 2020.



**Figure 2.13** : Les tempêtes ayant affecté Mostaganem entre 1977-2012. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.

### 2.2.3 Projections futurs du climat de la wilaya de Mostaganem

Les simulations du climat futur de la wilaya de Mostaganem, présentées dans l'étude de Snouci et Trache (2014), sont basées sur les données du projet régional Euro-méditerranéen CIRCE. Les auteurs ont utilisé les données du modèle climatique régional IPSL<sup>21</sup> de l'Institut

<sup>21</sup> Le modèle climatique régional IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace de France), est un système couplé océan-atmosphère de 30 Km de résolution dans lequel le point de coordonnées géographiques qui coïncide au plus près avec la station météorologique de Mostaganem a été sélectionné (Snouci et Trache, 2014).

Pierre-Simon Laplace de France pour cette étude (Senouci et Trache, 2014). La simulation couvre la période de 1951 à 2050.

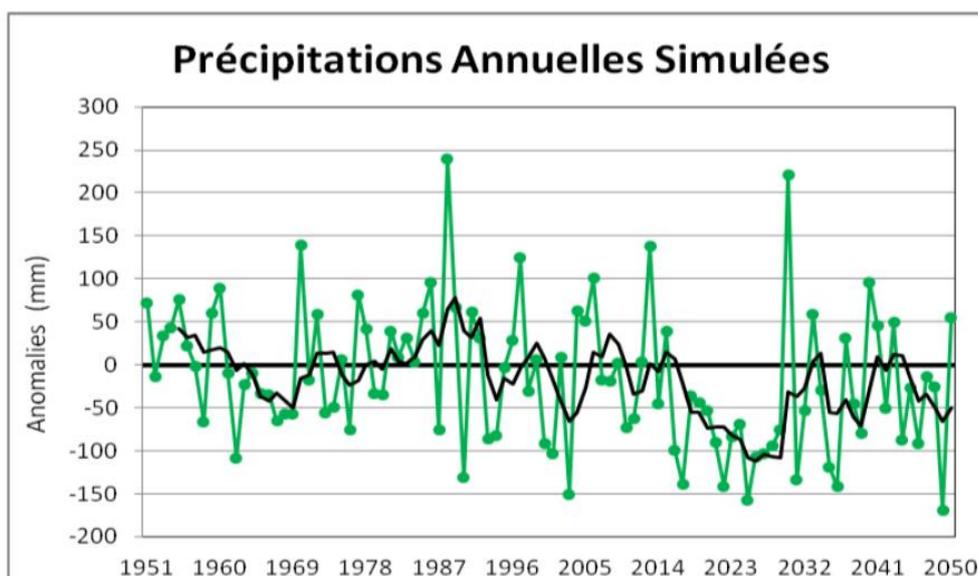
Les paramètres simulés sont :

- Les précipitations annuelles et saisonnières,
- Les températures moyennes, maximales et minimales.

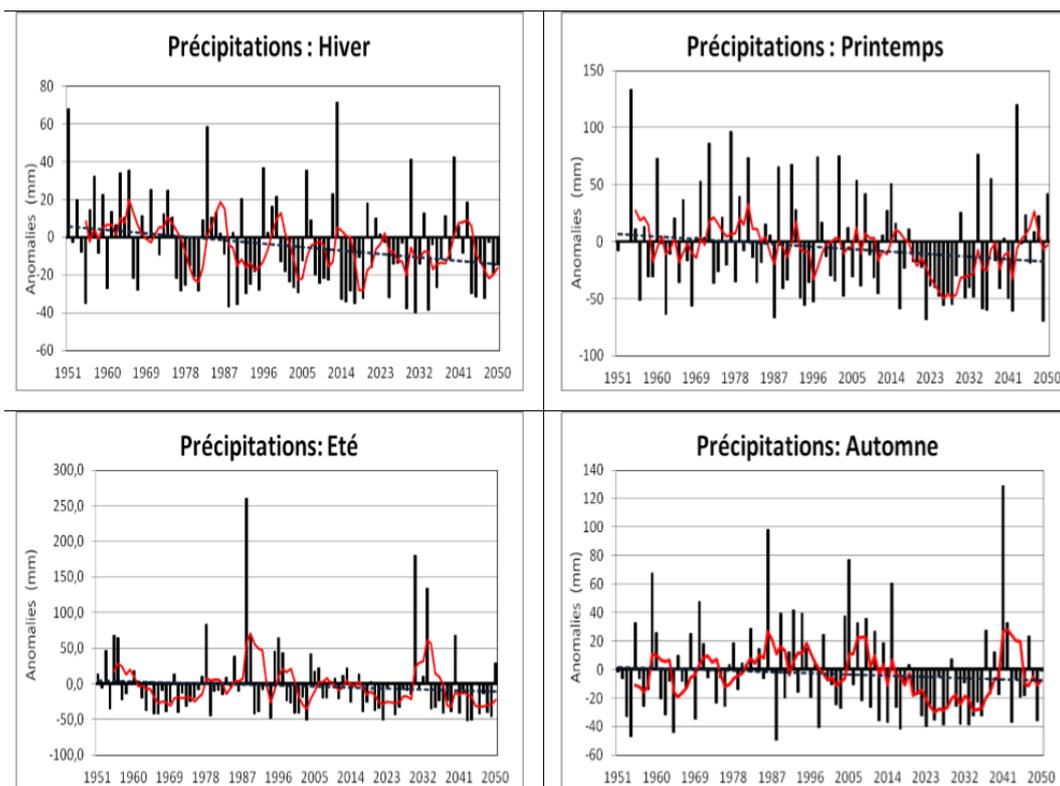
### 2.2.3.1 Les précipitations

Selon la figure 2.14, on remarque une baisse du régime pluviométrique durant la période 2010-2050, avec en moyenne une diminution du taux de précipitations d'environ 21% au cours de la période 2021-2050. Entre 2010 et 2030, la baisse s'accroît, et le minimum sera atteint en 2025. Entre 2030 et 2050, une légère tendance à la hausse est observée, cependant elle n'atteint pas les quantités observées entre 1961 et 1990 (Senouci et Trache, 2014).

Si on compare l'évolution saisonnière des précipitations à la période 1961-1990 qui est la normale climatologique de référence, on note une baisse sensible des précipitations pour toutes les saisons, en particulier à partir des années 2015. Cette diminution est d'environ 3 mm par décennie pour toutes les saisons (figure 2.15) (Senouci et Trache, 2014).



**Figure 2.14** : Précipitations annuelles simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.



**Figure 2.15** : Précipitations saisonnières simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.

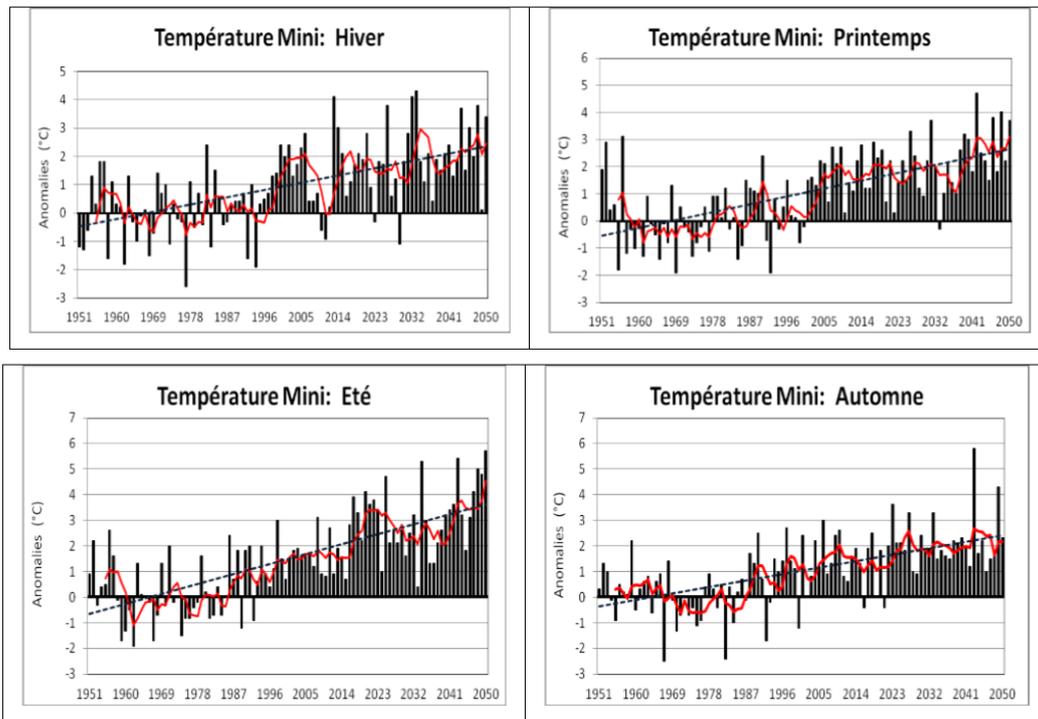
### 2.2.3.2 Les températures

Les simulations indiquent qu'entre 2021 et 2050, les températures moyennes devraient augmenter de  $+2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  par rapport à la période 1961-1990. Pour les températures minimales, la hausse prévue est de  $+2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  et de  $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour les températures maximales. Une augmentation est remarquée pour toutes les saisons, en particulier l'été et le printemps, des températures minimales, maximales et moyennes (Figures 2.16, 2.17), comparativement à la période 1961-1990. Les hausses peuvent atteindre  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en été et de  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour le reste des saisons. L'été est considéré comme la saison la plus touchée par cette hausse. À partir de 2015, la température maximale du mois d'août sera régulièrement supérieure à  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Senouci et Trache, 2014).

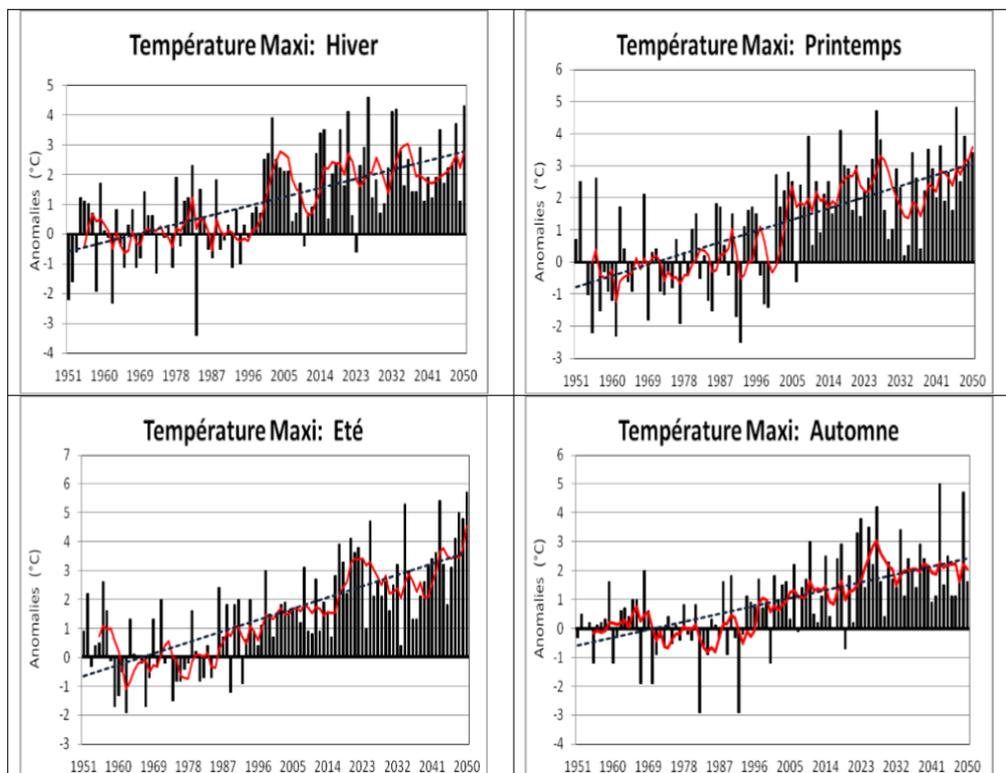
## 2.2.4 Conséquences du changement climatique sur la ville

### 2.2.4.1 L'augmentation du nombre de jours de canicule

Au cours de la période analysée, on observe une nette augmentation des jours de canicule. Entre 1987 et 1991, on constate une hausse importante de ces valeurs, cependant un pic est enregistré entre 2005 et 2007.

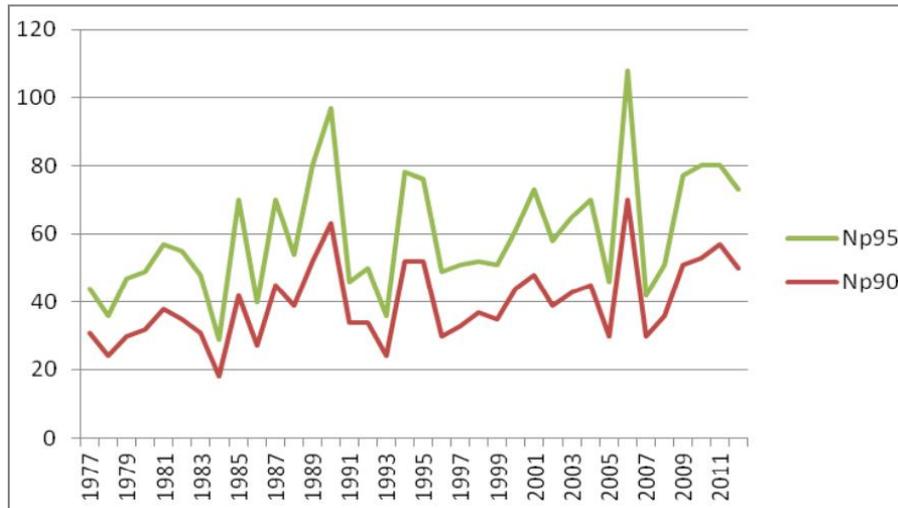


**Figure 2.16 :** Précipitations saisonnières simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.

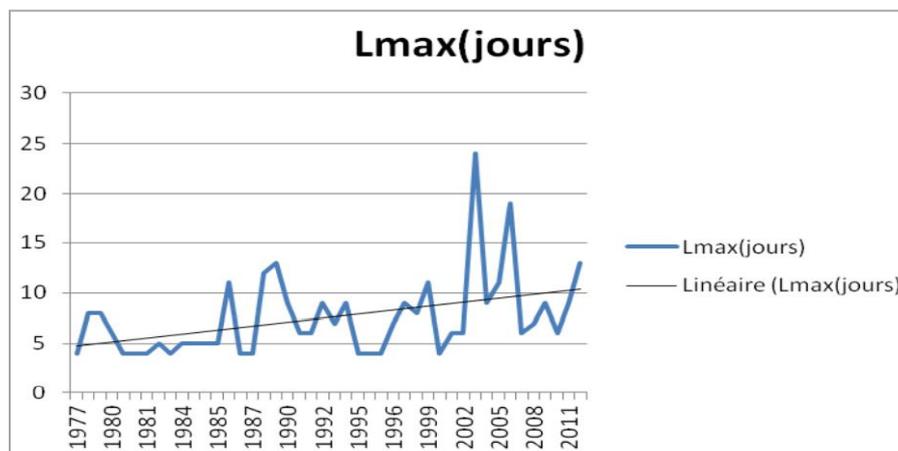


**Figure 2.17 :** Précipitations saisonnières simulées par le modèle IPSL sur la région de Mostaganem pour la période 1951-2050. Source : ONM. Dans Senouci et Trache, 2014.

En effet, l'Algérie a connu des vagues de chaleur intenses en juillet 2009 et août 2012, qui étaient les plus intenses depuis les deux dernières décennies, et Mostaganem n'a pas fait exception à cette situation (figure 2.18). En ce qui concerne la durée des canicules, elle est passée de 5 jours au début de la période de 1977 à 2012 à plus de 10 jours (Figure 2.19).



**Figure 2.18** : Nombre annuel de jours Tmax>90 percentile et Tmax>95 percentiles pour Mostaganem 1977-2012. Source ONM, dans Senouci et Trache, 2014.

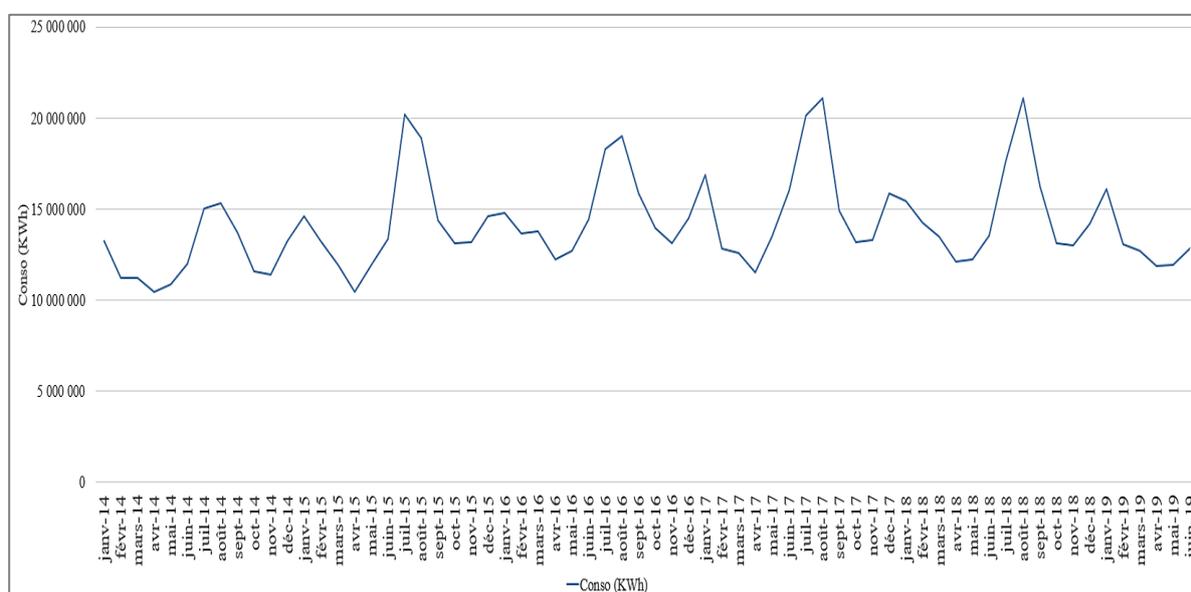


**Figure 2.19** : Longueur des canicules observées à Mostaganem durant la période 1977-2012. Source : ONM, dans Snouci et Trache, 2014.

### 2.2.1.2 Conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments

La hausse des températures est l'une des conséquences du changement climatique, ce qui entraîne une augmentation des besoins en climatisation et en chauffage. Pendant les périodes estivales, la multiplication des mécanismes de climatisation entraîne une prolifération des pics de demande énergétique.

D'après les données de la consommation électrique de la ville de Mostaganem entre 2014 et 2019, fournies par SONELGAZ (unité de la wilaya de Mostaganem) et illustrées dans la figure 2.20, la demande en électricité est plus élevée entre juin et septembre de chaque année, avec des pics de valeurs en août. Cette augmentation est due à l'utilisation massive de la climatisation pendant les périodes estivales. La valeur de la consommation électrique pour le mois d'août 2014 était de 15 343 063,4 kWh. Cependant, celle du mois d'août 2018 était de 21 106 000 kWh. Entre ces deux années, on observe une augmentation de 5 762 936,6 kWh, soit un taux de croissance de la consommation électrique de 38%. Selon le graphique, la demande d'électricité est en augmentation constante, ce qui contribue à l'intensification de la chaleur anthropique.



**Figure 2.20 :** L'évolution de la consommation électrique de la ville de Mostaganem entre 2014 et 2019. Source : SONELGAZ, siège de Mostaganem.

### 2.3 Evolution de la place de la végétation à travers le développement urbain de la ville

La présence de la végétation en ville est liée à l'histoire de sa construction (Anquetil et al., 2014). Au cours de son évolution spatiale, Mostaganem a connu différentes formes de végétation, dont l'Oued Ain-Sefra qui constituait une importante source d'irrigation.

#### 2.3.1 La ville précoloniale

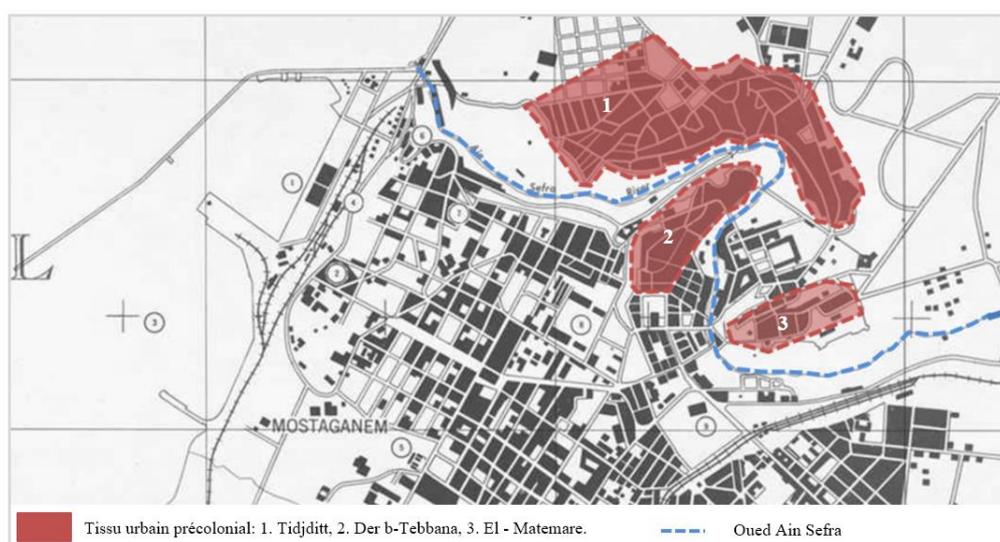
La ville précoloniale adjacente à l'Oued Ain-Sefra était située sur un site qui permettait la défense et le contrôle du secteur ouest (Yamani et Brahim, 2009). Elle était constituée principalement de trois quartiers (figure 2.21) :

- Derb-Tebbana : situé sur le côté gauche de l'Oued, le quartier constituait le noyau de la ville traditionnelle (Yamani et Brahim, 2009). Il avait deux vocations : administrative et commerciale (Benyagoub, 2011).
- El-Matmar : situé sur le côté droit de l'Oued, le quartier était occupé par des Maures. Il se caractérisait par le commerce des grains et la présence de silos d'approvisionnement de céréales (Yamani et Brahim, 2009).
- Tijditt : situé sur le même côté qu'El-Matmar, ces deux quartiers formaient un arc épousant la forme de l'Oued et la déclivité des terrains (Yamani et Brahim, 2009).

À ces quartiers, Arnaud (1968) ajoute Dijdida situé au Sud qui fut appelé par la suite : village des citronniers. En effet, le tissu précolonial était composé d'un tracé irrégulier et de maisons introverties (Yamani et Brahim, 2009). L'Oued Aïn-Sefra représentait pour les habitants une source d'eau pour actionner les moulins et irriguer les jardins (Yamani et Brahim, 2009). Selon cette description, les espaces verts existaient sous forme de jardins de maisons.

### 2.3.2 La ville coloniale

La ville coloniale a été créée à côté du tissu initial. Durant la première période d'urbanisation coloniale, la ville moderne a été conçue sur la base d'un plan d'alignement des rues, marqué par des places et des carrefours (Yamani et Brahim, 2009). Les quartiers se sont développés autour du centre sous une forme radioconcentrique, en suivant deux éléments régulateurs : le port et l'oued vers le Sud-Est (Yamani et Brahim, 2009).



**Figure 2.21** : Les trois quartiers de la ville précoloniale de Mostaganem. Fond de carte : [http://alger-roi.fr/Alger/mostaganem/pages/0\\_petit\\_plan\\_mostaganem\\_texas.htm](http://alger-roi.fr/Alger/mostaganem/pages/0_petit_plan_mostaganem_texas.htm). Elaboration : N. Bachir.

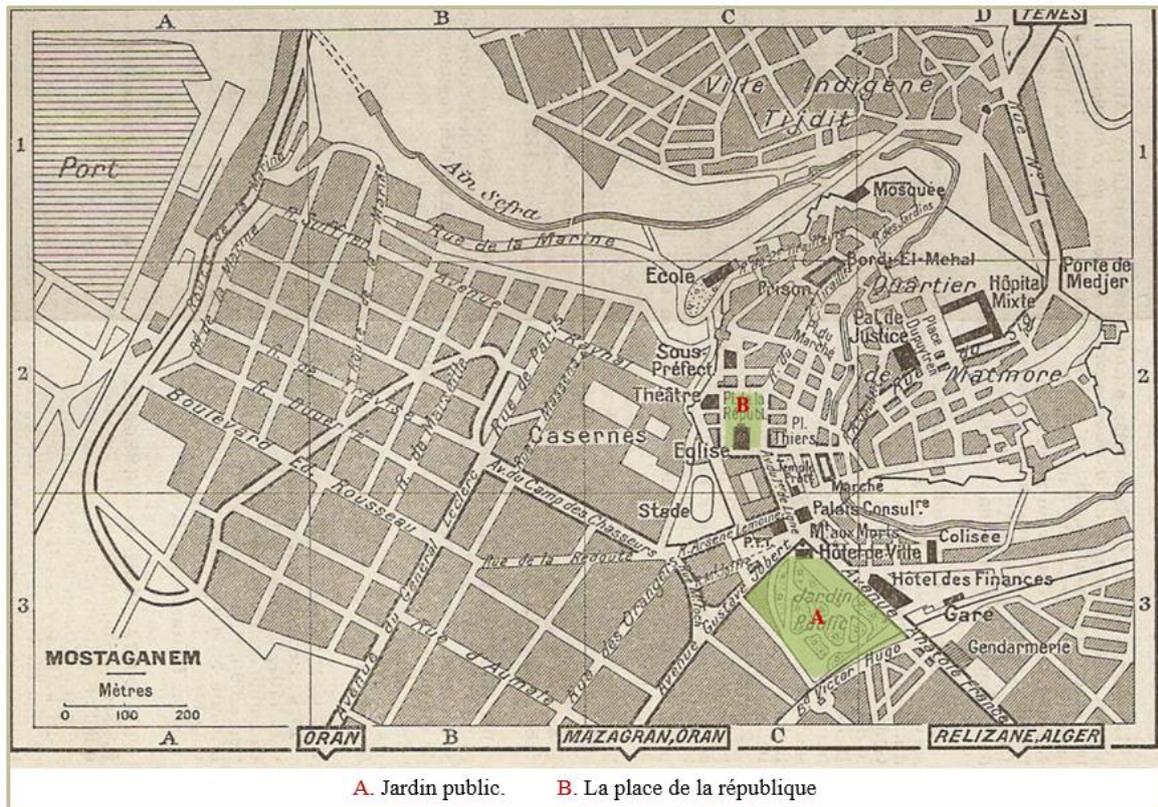
En 1851, la première promenade publique a été créée. Elle partait des portes de Mascara pour aller jusqu'au quartier de Beymouth (Arnaud, 1968). En 1855, le plan d'alignement des rues a été approuvé (Arnaud, 1968). Cette structure a donné naissance à la physionomie urbaine de Mostaganem (Yamani et Brahimi, 2009).

En 1862, des projets ont été lancés : une école pour filles, un abattoir et un théâtre. En 1864, l'aménagement de la place d'armes, devenue plus tard la Place de la République (voir figure 2.22, 2.23, 2.24), a été décidé, avec l'implantation des platanes qui entourent la grande église (Arnaud, 1968). La place regroupait autour d'elle des bâtiments avec des arcades de deux à cinq niveaux utilisés comme habitations. Par la suite, la ville s'est dotée de tous les bâtiments nécessaires, tels que des écoles, un collège, une halle aux grains, une chambre de commerce, un port, un hôpital, des ponts sur l'Ain Sefra, etc. (Arnaud, 1968).

L'urbanisme moderne introduit dans les villes algériennes pendant la période coloniale avait une vision hygiéniste. La nature était présente partout sous la forme nouvelle de jardins publics (Gillot, 2008) et d'alignements d'arbres (figure 2.25). Gaëlle Gillot affirme que la notion de jardin public dans les villes arabes est liée aux échanges culturels et idéologiques entre l'Europe, en particulier la France, et le monde arabe, ainsi qu'à l'histoire coloniale du bassin méditerranéen (Gillot, 2008). Mostaganem, avec son jardin public (voir figure 2.22), ne faisait pas exception à cette représentation. Au cours de la période d'urbanisation coloniale à Mostaganem, le jardin public a été construit (voir figures 2.22, 2.24). Selon Arnaud (1968), le jardin se trouvait à l'entrée de la ville, en face de la porte de Mascara, et était limité au sud par la voie ferrée, au nord et à l'est par la route nationale d'Alger à Oran, et à l'ouest par la salle de spectacle de la société philharmonique et plusieurs maisons nouvellement construites dans le quartier Beymouth. Le jardin était initialement composé de la promenade Robin, datant de 1851, et plusieurs agrandissements ont été réalisés par la suite. L'épais feuillage des gigantesques platanes formait un grand plateau ombragé dans la partie supérieure du jardin. Les habitants s'y protégeaient de l'ardeur du soleil (Arnaud, 1968).

Entre 1910 et 1959, la ville de Mostaganem a connu une expansion économique due à l'essor de la viticulture. Pendant cette période, plusieurs infrastructures de base ont été réalisées, notamment la poste, l'hôtel de ville et des édifices à caractère administratif. De nouveaux quartiers se sont également ajoutés à la périphérie et au centre de la ville, et des jonctions entre les quartiers existants ont été réalisées (Benyagoub, 2011). Dans le cadre du programme du plan de Constantine, d'autres projets ont également été construits. Pendant cette période

d'urbanisation, les lignes directrices de l'extension urbaine de la ville de Mostaganem après l'indépendance ont été tracées (Benyagoub, 2011).



**Figure 2.22:** L'emplacement du jardin public et la place de la république dans la ville coloniale de Mostaganem. Fond de carte : delcampe.net. Elaboration : N. Bachir.



**Figure 2.23 :** Photos de Mostaganem pendant la période coloniale, à gauche Oued Ain-Sefra, à droite la place de la république plantée d'arbres. Source : photos tirées d'internet.



**Figure 2.24 :** Photos de Mostaganem pendant la période coloniale, à gauche jardin public, à droite vue de loin de la place de la république plantée d’arbres. Source : photos tirées d’internet.



**Figure 2.25 :** Photo du centre-ville de Mostaganem en 1935 qui illustre l’alignement d’arbres. Source : photos tirées d’internet.

### 2.3.3 La ville postcoloniale et les nouvelles extensions

Après l’indépendance en 1962, le développement urbain de Mostaganem s’est fait à un rythme relativement lent (Yamani et Brahimi, 2009). En 1963, la ville a été dotée d’un parc urbain, El Arsa, qui porte également le nom du défunt président Ahmed Ben Bella. Durant cette période, l’Algérie a utilisé les mêmes instruments d’urbanisme que ceux laissés par les Français (Kettaf, 2013). En 1975, Mostaganem a été dotée d’un plan d’urbanisme directeur (PUD) qui a contribué à la mutation spatiale de sa périphérie (Yamani et Brahimi, 2009). Au début des années 90, la construction de lotissements et de coopératives immobilières pour des logements

individuels et évolutifs a été initiée (Yamani et Brahimi, 2009). En effet, pendant cette période, le logement est devenu l'élément principal et continue à être la préoccupation fondamentale des politiques urbaines jusqu'à nos jours (Kettaf, 2013). Le gigantesque programme de logements mis en place à Mostaganem a entraîné un changement spatial sans précédent (Yamani et Brahimi, 2009). En 1997, le Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) de Mostaganem a été approuvé. Depuis, une série de Plans d'Occupation des Sols (POS) a été mise en place (Yamani et Brahimi, 2009). La planification urbaine (PDAU et POS) a entraîné une accélération considérable de l'urbanisation (Yamani et Brahimi, 2009) et a transformé la forme radioconcentrique de la ville en un étalement linéaire.

Le paysage urbain des nouvelles extensions de Mostaganem est caractérisé par des gabarits d'immeubles installés aléatoirement selon les chemins des grues et une logique de plan de masse. L'urgence dans la réalisation a orienté la ville vers des dispositions urbaines sans se soucier de l'aménagement des espaces verts. Les vastes espaces résultants de certains aménagements, censés être destinés à des jardins et des aires de jeux, sont alors transformés en des espaces vides sans aucune fonction<sup>22</sup>.

Ces dernières années, la ville a connu la réalisation d'un parc de loisirs privé, « Mostaland ». Gaëlle Gillot, dans son étude intitulée « Du paradis à Dream Park », décrit ce modèle de nouveaux parcs dans les villes arabes comme étant des lieux de loisirs suréquipés, payants et calqués sur le modèle de Disney Land (Gillot, 2013).

En effet, l'intérêt que porte l'état envers les espaces verts s'inscrit dans une démarche environnementale déterminée par le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD, 2002) (Kettaf, 2013). La loi n° 07-06 du 13 mai 2007 « relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts » est venue dans le prolongement de la loi n° 03-10 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Cette loi contient quatre titres :

- Le premier est lié aux dispositions générales.
- Le deuxième est relatif aux instruments de gestion des espaces verts.
- Le troisième porte sur le développement des espaces verts.
- Et le quatrième sur les dispositions pénales.

L'article 4 de cette loi classe les espaces verts en sept catégories :

---

<sup>22</sup> Dans sa thèse sur « La fabrique des espaces publics : conceptions, formes et usages des places d'Oran (Algérie) », Kettaf Fadila (2013) représente ces espaces vides comme : « des nos man's land où se mêlent terre et détritits ».

- Les parcs urbains et périurbains, composés par les espaces verts délimités et, éventuellement clôturés. Représentant un espace de détente et de loisirs. Ces parcs peuvent contenir des équipements de repos, de jeux et/ou de distraction, de sports et de restauration. Ils peuvent également comporter des plans d'eau, des circuits de promenade et des pistes cyclables ;
- Les jardins publics, sont des lieux de repos ou de halte dans des zones urbaines et qui comportent des massifs fleuris ou des arbres. Cette catégorie comprend aussi les squares plantés, ainsi que les places et placettes publiques arborées ;
- Les jardins spécialisés, qui représentent les jardins botaniques et les jardins ornementaux ;
- Les jardins collectifs et/ou résidentiels publics
- Les jardins particuliers
- Les forêts urbaines, qui contiennent les bosquets, les groupes d'arbres, ainsi que toute zone urbaine boisée y compris les ceintures vertes ;
- Les alignements boisés, qui comprennent toutes les formations arborées situées le long des routes, autoroutes et autres voies de communication ont leurs parties comprises dans des zones urbaines et périurbaines. (Journal Officiel n°31, p. 7).

D'après l'enquête que nous avons menée auprès de la direction de l'environnement (DE) de Mostaganem en janvier 2022, l'étude qui consiste à réaliser un état des lieux des espaces verts de la wilaya en s'appuyant sur les sept catégories définies par la loi n° 07-06 du 13 mai 2007 est entamée. La première partie du travail, qui concerne les jardins publics et les parcs urbains de la commune de Mostaganem, est représentée dans la figure 2.26. À partir de cette figure, on remarque que la majorité des jardins et des parcs de Mostaganem se situent dans le tissu colonial de la ville. Cependant, le travail est en cours et les alignements d'arbres sont en train d'être recensés.

La révision du PDAU de 2006 présente aussi les parcs et les espaces verts dans les secteurs urbanisés, à urbaniser et à urbanisation future. Les terres agricoles et les terres forestières sont considérées dans le secteur non urbanisable. La figure 2.27 illustre les parcs et les espaces verts, les terres forestières et les terres agricoles du secteur urbanisé dans la révision du PDAU 2006.

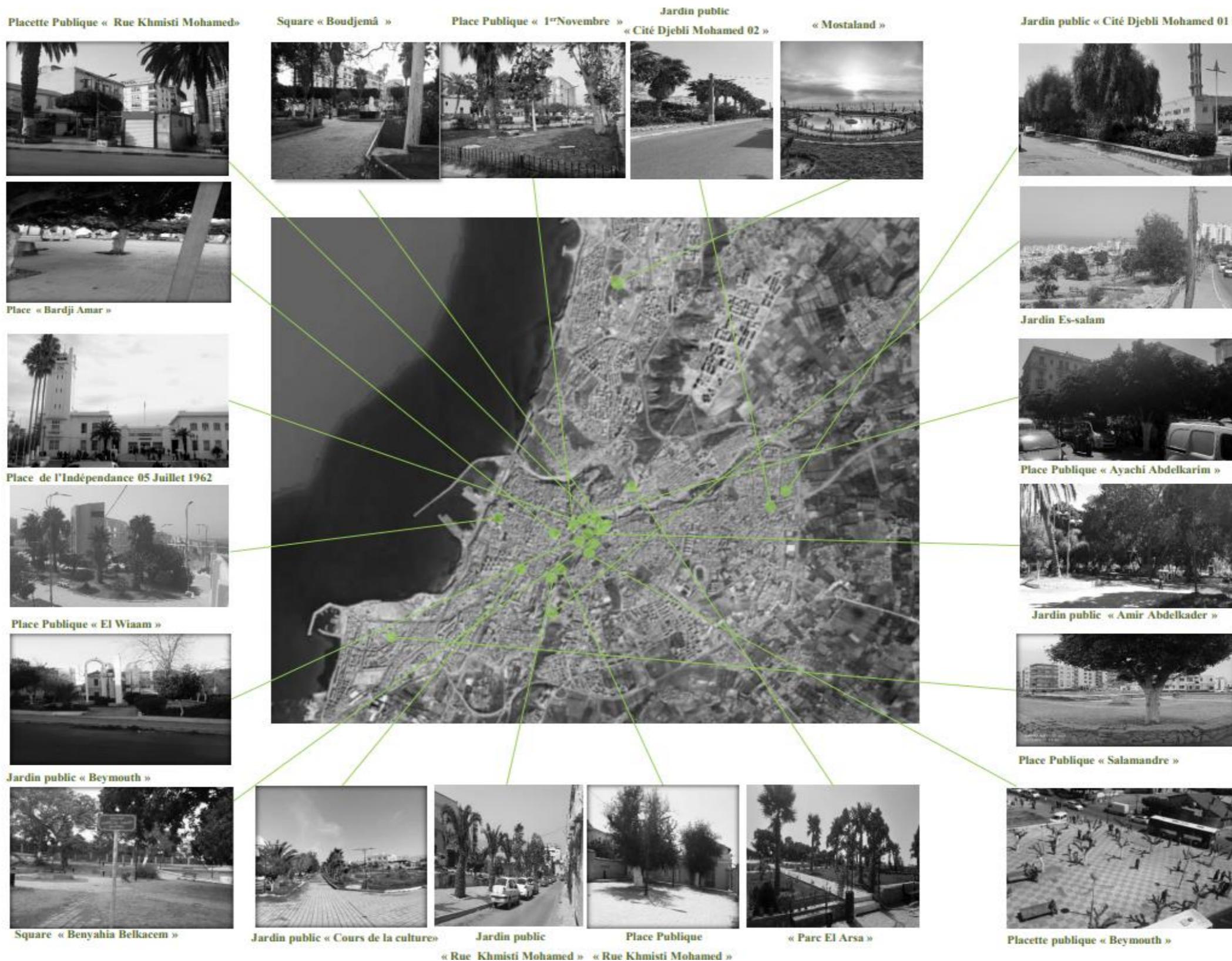


Figure 2.26: les jardins et les places végétalisées recensés par la direction de l'environnement. Source: N, BACHIR, selon les données de la direction de l'environnement.



Figure 2.27: Parc et espace vert, terre forestière, et terre agricole selon la révision du PDAU du groupement des communes de Mostaganem, Mazagran, et Sayada. Source: Fond de plan: Révision du PDAU. Mise en forme: N, Bachir.

## Conclusion

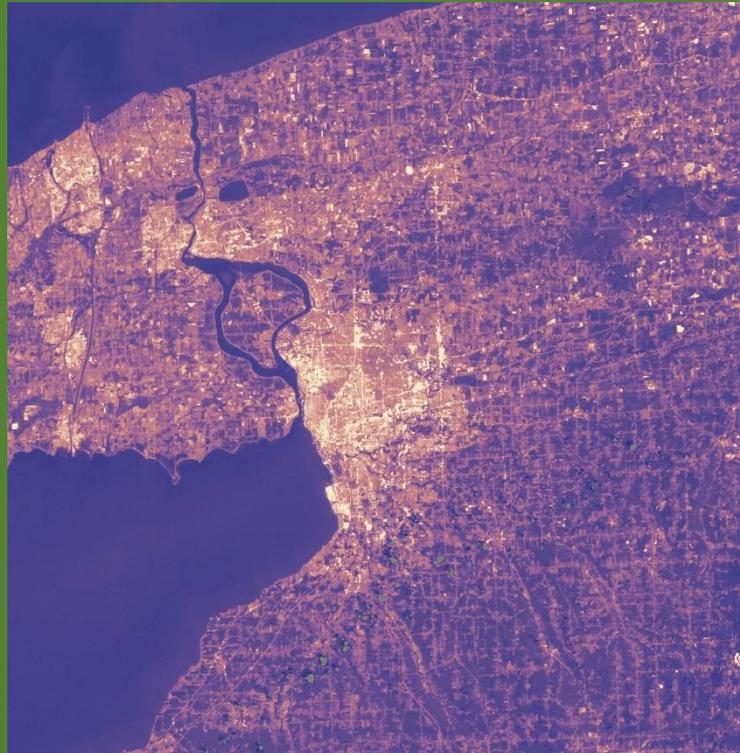
Ce chapitre a examiné l'évolution future du climat de Mostaganem, qui a révélé une augmentation prévue de la température moyenne de 2,4°C et une diminution du taux de précipitations en moyenne d'environ 21% entre 2021 et 2050. Cette hausse de température et la baisse des précipitation auront des conséquences amplifiées en ville, en particulier sur la consommation énergétique des bâtiments et sur la santé de la population urbaine. Par ailleurs, l'analyse de la présence de la végétation en ville nous a montré que la végétation est plus présente dans le tissu colonial que dans les nouvelles extensions.

Alors que d'autres pays ont choisi la végétation comme solution pour atténuer l'effet des ICU, la ville de Mostaganem, comme la majorité des villes algériennes, a continué de construire de grands ensembles d'habitations sans se soucier de l'aménagement des espaces verts.

Afin de répondre à notre problématique de départ et avant de procéder aux simulations des scénarios de végétalisation pour atténuer les ICU dans la ville de Mostaganem, il nous a paru logique de localiser d'abord ces ICU pour pouvoir intervenir par la végétation. Les images satellitaires sont un moyen de localiser les ICU dans la ville. Elles permettent également de détecter la véritable surface, la densité ainsi que la vitalité des espaces verts grâce à différents indices. Dans ce sens, nous abordons dans le chapitre suivant la localisation des ICU à Mostaganem à l'aide de la télédétection. À partir des cartes de l'indice de végétation par différence normalisée NDVI et des températures de surface fournies par les images satellitaires, nous avons réalisé une analyse de la relation entre la végétation et la température de surface à Mostaganem.

## CHAPITRE 03

# ANALYSE PAR TELEDETECTION DE LA PRESENCE DE LA VEGETATION ET LA LOCALISATION DES ICU DE SURFACE DANS LA VILLE DE MOSTAGANEM



*« La télédétection est ainsi devenue un outil incontournable pour l'analyse spatiale car elle permet de fournir des informations sur les milieux très hétérogènes que sont les villes ». Virginie Anquetil et al., 2014.*

## Introduction

Plusieurs recherches sur le climat urbain s'intéressent à l'étude de l'ampleur de la différence de température de l'air ambiante observée entre les villes et leurs régions rurales environnantes, ce qui caractérise l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) (Landsberg, 1981). Ces études sont traditionnellement menées avec des mesures in situ des températures de l'air. Cependant, avec l'arrivée de la technologie de télédétection par satellite, il est désormais possible d'étudier les ICU à distance et à grande échelle (continentale, voire même mondiale) (Streutker, 2002).

Outre l'analyse et le suivi des ICU, la télédétection permet également de fournir plusieurs informations sur les milieux urbains, telles que la cartographie des surfaces imperméables, le bilan thermique d'un bâtiment, le suivi de l'étalement urbain et l'étude des structures urbaines. La végétation, qui représente une composante importante du système urbain, est difficile à localiser avec précision en ville. La télédétection, à travers des indices tels que le NDVI, le PVI et le Msavi, permet l'évaluation de la vigueur et de la quantité de végétation présente en ville.

Dans ce chapitre, nous présentons l'analyse des températures de surface LST (land surface temperature) et de l'indice de végétation par différence normalisée NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de la ville de Mostaganem à l'aide de la télédétection. Cette étape de notre travail nous a permis d'avoir une vision globale à l'échelle de la ville des températures de surface et de la quantité de végétation présente, ainsi que d'étudier la relation entre le LST et l'NDVI. Ensuite, à partir de la carte du LST, une localisation des ICU de surface a été effectuée. Enfin, un ICU a été sélectionné pour réaliser les simulations numériques pour le reste de cette recherche.

### 3.1 Les techniques de télédétection

La télédétection est définie comme « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988). Pendant plusieurs années, la photographie aérienne a été utilisée pour étudier l'évolution des villes (Jensen et Cowen, 1999) en utilisant les principes de la photo-interprétation qui se basent sur l'utilisation de la texture, du contexte et des configurations spatiales des villes (Bowden, 1975; McKeown, 1988; Haack et al., 1997). En 1960, les Américains ont lancé le satellite TIROS 1 (Television and Infra-Red Observation

Satellite), depuis lors les satellites météorologiques sont une source d'informations pour suivre le temps et le climat (Alonso, 2017). Dans les années 1970, la faible résolution spatiale du capteur MSS (Multispectral Scanner System) était une contrainte pour l'utilisation des images dans des applications urbaines (Donnay et al., 2000). Les techniques appelées réflectives ( $0,4 \mu\text{m}^{23}$ ) ont été les premières à être développées dans le domaine optique, où les phénomènes de réflexion sont dominants (Anquetil et al., 2015). La technique de télédétection de l'imagerie monobande ou panchromatique permet d'acquérir un signal dans une large bande spectrale, avec une très haute résolution spatiale. Ces capteurs offrent des opportunités pour obtenir des informations à un niveau de détail très élevé (Welch, 1982; Donnay et al., 2001). La haute résolution spatiale des capteurs aériens est de l'ordre du mètre ou plus précis, ce qui permet de caractériser la forme 2D des objets.

L'imagerie multispectrale permet d'accéder à la radiométrie des scènes, comme la représentation de la couleur lorsque la caméra est sensible dans le domaine visible (Anquetil et al., 2015). Cela permet la caractérisation de la nature des matériaux observés. Ce concept de couleur avec un très grand nombre de longueurs d'onde a été développé dans l'imagerie hyperspectrale. Dans ce nouveau concept, le nombre de longueurs d'onde est de quelques centaines avec une résolution spectrale de l'ordre de 5 à 10 nm dans le domaine visible à l'infrarouge réflectif ( $0,4$  à  $2,5 \mu\text{m}$ ). Cette technique permet l'extraction d'informations précises sur la nature, le type et l'état d'un matériau à travers la grandeur optique à laquelle elle donne accès (Anquetil et al., 2015). Dans les études sur les milieux urbains, l'imagerie hyperspectrale réflective ( $0,4$ - $2,5 \mu\text{m}$ ) est principalement utilisée. En effet, la majorité des images acquises sont dans le domaine  $0,4$ - $2,5 \mu\text{m}$  (Jensen et al., 2007). Cependant, dans le domaine infrarouge thermique  $8$ - $12 \mu\text{m}$ , le flux émis par une surface liée à sa température de surface  $T_s$ , ainsi qu'à sa capacité à réémettre la chaleur qu'elle a absorbée, représente le phénomène radiatif dominant. Deux types de satellites permettent l'enregistrement de l'énergie libérée : les géostationnaires et ceux en orbite quasi polaire. Les premiers sont à une altitude très élevée et ont une vitesse de rotation égale à celle de la Terre. Les seconds sont à une altitude moins élevée (environ 850 kilomètres) et suivent une trajectoire orbitale et héliosynchrone (Alonso, 2017). Le tableau 3.1 réalisé par Alonso contient les satellites les plus connus et les plus utilisés en télédétection (Alonso, 2017).

---

<sup>23</sup> Le micromètre ayant pour symbole  $\mu\text{m}$ , est une unité de longueur du Système international d'unités valant un millionième de mètre (<https://fr.wikipedia.org/wiki>).

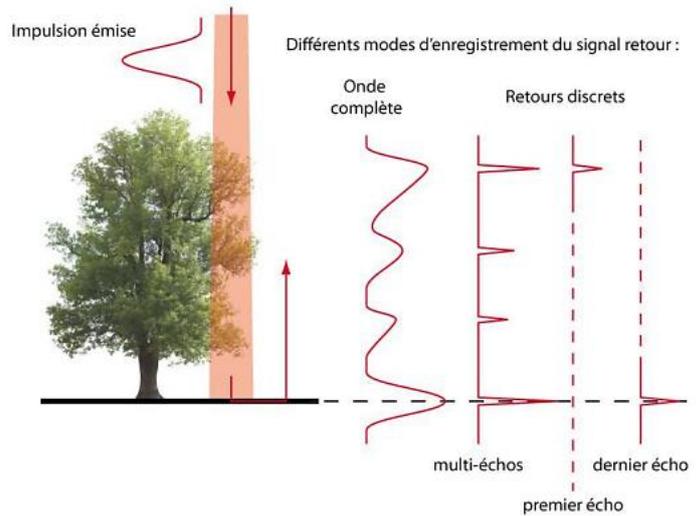
**Tableau 3.1:** Les différents satellites météorologiques à orbite quasi polaire et géostationnaire. Source : (Alonso, 2017).

Types de satellites	Groupe satellitaire	Nom du satellite	Année de mise en circulation	Capteur thermique	Bande thermique	Longueur de l'onde( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale
A orbite quasi polaire	LANDSAT	Landsat 1	1972	MSS, RBV	Pas de bande IR thermique	/	Général : 79m
		Landsat 2	1975	MSS, RBV	Pas de bande IR thermique	/	Général : 79m
		Landsat 3	1978	MISS, RVB,	Bande 5	10,4 - 12,6	Général : 79m
		Landsat 4	1982	TM,MSS	Bande 6	10,4 - 12,5	Générale: 30m Infrarouge thermique 120 m
		Landsat 5	1984	TM,MSS	Bande 6	10,4-12,5	Générale: 30m Infrarouge thermique 120 m
		Landsat 6	1993-Pas de mise en orbite	/	/	/	/
		Landsat 7	1999	ETM+	Bande 6	10,3-12,4	Générale 30m Panchromatique: 15 m Infrarouge thermique 100m

Types de satellites	Groupe satellitaire	Nom du satellite	Année de mise en circulation	Capteur thermique	Bande thermique	Longueur de l'onde(μm)	Résolution spatiale
A orbite quasi polaire	LANDSAT	Landsat 7-off	2003	ETM+	Bande 6	10,3-12,4	Generale: 30 m panchromatique: 15 m infrarouge thermique 100m Générale: 30 m
		Landsat 8	2013	OLI-2 TIRS-2	Bande10	10,6-11,2	Panchroma-tique: 15m infrarouge thermique: 60 m
	EOS	EOS AM - 1(terra)	1999	MODIS	Bandes 31	10,8-11,3	1000m
			1999	ASTER	Bandes 13	10,3-10,9	90 m
	NOAA	NOAA 15 à NOAA 19	1998 (à 2009)	AVHRR/3	Bande 4	10,3-11,3	1000 m
		Metop A et Metop B	2006	AVHRR/4	Bandes 4	10,3-11,3	1000 m
	Quickbird	Quick-bird 1	2000	/	/	/	/
		Quickbird 2	2001	Quickbird satellite sensor		0,98-0,9	2,44 m
	ERS	ERS-1	1991	SAR	Bande 3	/	30 m
		ERS-2	1995	SAR	/	/	30 m

Types de satellites	Groupe satellitaire	Nom du satellite	Année de mise en circulation	Capteur thermique	Bande thermique	Longueur de l'onde( $\mu\text{m}$ )	Résolution spatiale
A orbite quasi polaire	SPOT	Spot 1ère génération	1986	HVR-1	Bande 3	0,8-0,9	20 m
		Spot 2 ème génération	1998	HVR-1	Bande 4	1,6-1,8	20 m
		Spot 3 ème génération	2002	HVR-1	Bande 4	1,6-1,8	20 m
		SPOT 6-7	2012	HVR-2	Bande 5	0,8-0,9	6 m
	Envisat	Envisat	2003	ATSR	/	10,8	1000 m
Géostationnaire	Meteosat	Meteosat premiere génération	1977	MVIRI	/	10,5-12,5	5000 m
		Meteosat secinde génération	2004-2025	SEVIRI	Bande 9	9,8-11,8	3000 m
		Meteosat troisième génération	2021-2039	FCI - TIRS	Bande14	10,5	2000 m
	NOAA	GEOS 12 à GEOS 15	2001	GEOS-NOP	Bande 8	11,03	1000 m à 2000 m
		GEOS - R	2016	GEOS - ABI	Bande 14	11,2	2000 m

Le lidar, est une nouvelle technique optique (figure 3.1), se compose d'une source laser émettant un pulse et d'un module de détection (Kraus, 2002). Grâce à cette technique, il est possible d'estimer la hauteur du sommet de l'objet observé.

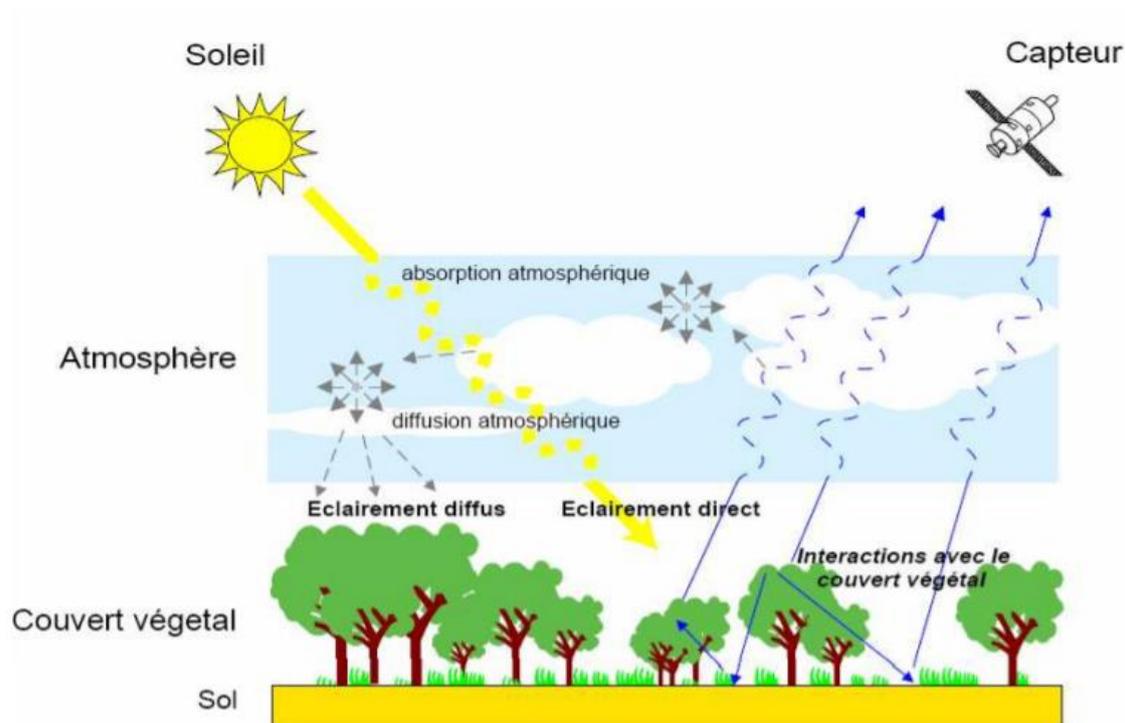


**Figure 3.1** : Principe des différents modes d'enregistrement du signal lidar. Source : Ristorcelli, 2013.

En effet, la télédétection optique donne accès à la mesure du rayonnement solaire réfléchi par les surfaces et par l'atmosphère (Benhadj, 2008) (figure 3.2). Cette mesure est liée aux conditions d'observation et aux caractéristiques de la scène observée (Benhadj, 2008). Les caractéristiques de la scène représentent l'état, la nature, l'agencement et la structure géométrique des éléments qui la constituent (Benhadj, 2008). Les propriétés d'absorption ou de transmission du rayonnement à l'interface sol-végétation-atmosphère et de réflexion sont conditionnées par ces caractéristiques. Les propriétés de l'atmosphère (composition et turbidité) et le trajet du rayonnement incident (position du soleil) influent sur les conditions d'éclairement de la scène, en particulier la proportion de rayonnement diffus et direct (Benhadj, 2008).

Les processus d'interaction entre le rayonnement et la matière dépendent également de la longueur d'onde d'observation. Cette observation est liée à plusieurs facteurs, tels que (Benhadj, 2008) :

- la longueur d'onde du rayonnement,
- la nature de la surface observée,
- l'énergie incidente au niveau de la surface,
- la géométrie soleil-cible-capteur.



**Figure 3.2 :** Fonctionnement de la télédétection dans le domaine solaire. Source : Bacour 2001.

## 3.2 La télédétection dans les études urbaines

### 3.2.1 L'étude de l'étalement urbain

La télédétection permet d'obtenir des informations sur la localisation, la forme et le développement des structures urbaines. L'une de ses applications principales consiste en la détection des changements dans l'occupation et l'utilisation des sols (Mas, 2000). L'étude de l'expansion urbaine est un paramètre important pour expliquer d'autres évolutions, telles que les changements climatiques et énergétiques (Anquetil et al., 2015). Les approches utilisées pour suivre l'évolution de l'étalement urbain dépendent de l'échelle spatiale considérée.

Ces dernières années, des cartes d'extension urbaine ont été réalisées à l'aide de capteurs spatiaux optiques à basse résolution (de 250 m à 2 km) (Potere et Schneider, 2009). Les instruments tels que Modis et les images de nuit du satellite DMSP-OLS permettent de réaliser ces cartes. Ils ont une couverture large qui permet de couvrir la ville dans sa totalité, ainsi qu'une résolution spatiale suffisante pour distinguer les zones construites des zones non construites (Anquetil et al., 2015).

Les instruments à très haute résolution spatiale tels que Landsat, Spot, Ikonos, etc. permettent d'obtenir des cartes plus précises. Toutefois, la majorité des travaux publiés portent uniquement

sur un nombre limité de villes (Anquetil et al., 2015; Taubenbock et al., 2012). Par exemple, Angel et al. (2005) ont comparé les dynamiques et l'expansion urbaine de 90 villes entre 1990 et 2000 (Anquetil et al., 2015).

Les bâtiments, les routes, la végétation et les autres objets urbains sont généralement identifiés à partir d'une résolution spatiale supérieure à 5 mètres. Grâce à des images multi-temporelles de Landsat, Taubenbock et al. (2008) ont pu classifier les constructions et les surfaces d'eau et évaluer leur évolution. Pour détecter les routes (Heipke et al., 1997), les bâtiments ou les arbres (Li & Weng, 2010), la technique Lidar est utilisée.

### **3.2.2 La détermination des structures urbaines**

À partir des résolutions spatiales accessibles par la télédétection, les éléments structurants de la ville tels que les espaces ouverts, la végétation, les rues et les bâtiments sont identifiés. Avec l'arrivée de nouveaux capteurs couplés à un modèle numérique de terrain, il devient possible de construire une ville numérique en 3D. Les études de Schenk et Csatho (2002) ainsi que de Rottensteiner et al. (2005) ont conclu que la fusion de données aéroportées multispectrales et Lidar permet d'améliorer la description des surfaces urbaines en offrant une meilleure discrimination entre les types de surfaces (végétation rase/arbre, bâtiments/surfaces artificielles) (Anquetil et al., 2015).

### **3.2.3 Détermination des surfaces imperméables**

Depuis les années 1970, la télédétection a montré son intérêt dans la caractérisation et la quantification des surfaces imperméables. Ces surfaces sont composées de routes, de trottoirs, de parkings et de toits, et ont pour effet de réduire les infiltrations et d'accélérer le ruissellement (Brun et Band, 2000 ; Anquetil et al., 2015).

Pour obtenir une bonne cartographie, une résolution spatiale adéquate est nécessaire. Cette résolution dépend des objets analysés : pour les boulevards, une résolution de 1 à 30 m est suffisante, cependant pour les bâtiments et les routes, une résolution de 0,25 à 0,5 m est indispensable (Jensen et Cowen, 1999). En effet, la télédétection satellitaire à haute résolution permet d'obtenir des résolutions de 20 m (Spot XS) ou 30 m (Landsat TM) (Lamachere et Puech, 1996). La composition des routes (Roessner et al., 2001 ; Weng, 2012) ainsi que leur utilisation (Herold et al., 2006 et 2003) ont été identifiées grâce à l'exploitation d'images hyperspectrales (Anquetil et al., 2015).

Jensen et Cowen (1999) recommandent d'effectuer des acquisitions tous les un à cinq ans pour suivre l'évolution des villes (Anquetil et al., 2015). Selon Weng et Lu (2009), les observations à partir d'images Aster sont préférables pour localiser les surfaces imperméables au printemps ou en automne, car le contraste spectral est plus visible sans la présence de végétation (Anquetil et al., 2015). Pour réduire l'erreur d'estimation, Yang et al. (2010) ont fusionné des images multispectrales Spot HRG avec des images radar (Anquetil et al., 2015). De plus, l'utilisation des bandes thermiques de Landsat permet d'améliorer la classification des surfaces imperméables (Lu et Weng, 2006). Cependant, la présence d'ombres causées par la topographie de la ville, les bâtiments et les arbres, ainsi que la forte variabilité intraclasse, représentent les principales limites de l'utilisation de la haute résolution pour la classification des surfaces imperméables (Anquetil et al., 2015).

### 3.2.4 L'étude des ICU

La télédétection optique permet la localisation des îlots de chaleur urbains grâce au traitement des images satellitaires et à l'extraction de plusieurs paramètres (El'Atari et Abou, 2015) :

- La température de l'air et du sol.
- L'indice de végétation normalisé (NDVI).
- L'indice d'imperméabilité des surfaces (IS).
- La distance par rapport à l'eau.

Les images hyperspectrales aéroportées, qui fournissent des informations sur les caractéristiques des surfaces, sont également utilisées pour estimer l'ICU à partir de la carte d'occupation des sols. Seule la télédétection peut fournir une vision globale de la ville et des zones rurales environnantes qui est nécessaire pour les études sur les îlots de chaleur urbains (Anquetil et al., 2015).

À partir des années 1970, les premiers travaux sur l'îlot de chaleur urbain (ICU) ont commencé à apparaître. Rao (1972) a expliqué que l'ICU pouvait être étudié à partir de données infrarouges thermiques obtenues par Tiros (Anquetil et al., 2015). Voogt et Oke (2003) ont réalisé une synthèse de l'utilisation de la télédétection thermique pour l'étude des villes (Anquetil et al., 2015). Trois thèmes ont été identifiés pour l'utilisation de l'infrarouge thermique (Anquetil et al., 2015) :

- L'étude de la relation entre les formes thermiques urbaines et les caractéristiques des surfaces.
- L'étude des bilans d'énergie des surfaces.
- L'analyse de la relation entre la température de surface et la température de l'air.

### 3.2.5 L'étude de la thermique urbaine

Des informations sur les gradients de température de surface sont apportées par l'imagerie thermique (Anquetil et al., 2015). De plus, l'imagerie hyperspectrale couplée à des informations Lidar permet de localiser les toits et d'obtenir des informations sur leurs matériaux ainsi que sur les lieux de déperdition thermique (Bannehr et al., 2011 ; Anquetil et al., 2015).

### 3.2.6 La détermination de la présence de la végétation en ville

La télédétection permet la localisation des surfaces végétales urbaines. Ces surfaces regroupent des zones végétales rases, des buissons, des arbres d'expansion réduite, des arbres isolés et même des groupements d'arbres. La télédétection évite l'intervention sur le terrain pour réaliser un inventaire, tel que le nombre d'arbres individuels, les espèces présentes, leur répartition spatiale, leur santé, etc. Elle présente également l'avantage d'un coût réduit, d'une grande couverture et d'une collecte régulière des données (Anquetil et al., 2015).

Avec WorldView 2 (8 bandes spectrales), Pu et Landry (2012) ont classé 7 espèces d'arbres. L'outil de l'imagerie hyperspectrale a un fort potentiel pour analyser la végétation en ville (Anquetil et al., 2015), en fournissant des informations supplémentaires à la simple détection de la végétation (Walker et Briggs, 2007 ; Anquetil et al., 2015), telles que :

- L'évaluation du stress hydrique de la végétation urbaine (Jung et al., 2005).
- L'estimation de la densité des canopées (Jensen et al., 2012 ; Anquetil et al., 2015), ainsi que de la densité du feuillage (LAI) des arbres (Jensen et al., 2009 ; Anquetil et al., 2015).
- La distinction des espèces d'arbres (Xiao et al., 2004 ; Anquetil et al., 2015).

Différents indices ont été proposés pour identifier les surfaces de végétation en milieu urbain. Le plus connu et le plus utilisé est le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) proposé par Rouse et al. (1974). D'autres indices sont également utilisés à partir des données hyperspectrales : EVI (Enhanced Vegetation Index), NDII (Normalized Difference Infrared Index), NDWI (Normalized Difference Water Index), etc. (Galvao et al., 2013 ; Anquetil et al., 2015).

### 3.3 La température de surface du sol (LST) à partir de la télédétection

Au cours des dernières années, de nombreux travaux ont été consacrés à l'extraction de la température de surface du sol à partir des données de télédétection. La modélisation locale de

cette température repose fortement sur les données de terrain, tandis qu'à l'échelle régionale et mondiale, la télédétection est devenue la principale source de récupération des données de LST (Land Surface Temperature) (Vlassova, 2016).

La température de surface du sol peut être définie comme la température ressentie lorsque la surface du sol est touchée par les mains (Rajeshwari et Mani, 2014). Les deux paramètres d'occupation et d'utilisation du sol sont utilisés pour estimer la valeur de la LST (Land Surface Temperature) (Rajeshwari et Mani, 2014). En effet, les activités naturelles et anthropiques modifient ces paramètres, ce qui influence les valeurs de la LST d'une zone (Rajeshwari et Mani, 2014). Lorsque ces valeurs changent, le climat local de cette région est également affecté. De nombreux chercheurs (Barton I. J., 1992 ; Lagouarde et al., 1995 ; Schmugge et al., 2002 ; Zhou et al., 2012 ; Benmecheta, 2017) ont calculé la LST en utilisant diverses techniques et algorithmes (Rajeshwari et Mani, 2014).

Les données de LST, qui sont distribuées spatialement, sont fournies à partir des capteurs thermiques installés à bord de satellites et d'avions (Zhou et al., 2012). Les satellites d'orbite polaire tels que Landsat TM/ETM+ (Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper), NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration Advanced Very High Resolution Radiometer), Terra/Aqua Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) et ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) fournissent des images à différentes échelles pour de nombreuses applications en relation avec la surface du sol (Zhou et al., 2012 ; Benmecheta, 2017). L'histoire des mesures de température à partir de plateformes distantes a commencé à la fin des années 1950 (King, 1956), et les premières mesures à distance du LST ont été effectuées par la télévision et le satellite d'observation infrarouge dans les années 1960 (TIROS) (Bandeem et al., 1961). Cependant, l'acquisition et la diffusion régulières des données de LST ont été établies au début des années 1980 (Price, 1984). Les dernières décennies ont vu une augmentation considérable de l'utilisation de la télédétection pour l'estimation des propriétés biophysiques de la surface terrestre (Vlassova, 2016 ; Houbourg et al., 2011 ; Kalma et al., 2008). La forte demande pour la température de surface pour les études environnementales et les activités de gestion des ressources terrestres a rendu la télédétection de la température de surface un sujet académique important (Qin Karnieli, 1999 ; Benmecheta, 2017). La température de surface du sol (LST) est un paramètre clé qui contrôle le bilan énergétique et hydrique entre l'atmosphère et la surface terrestre (Coll et al., 2005). Grâce à la télédétection infrarouge thermique (TIR- Thermal Infrared Remote Sensing), des valeurs du LST sont récupérées sur une grande échelle et à diverses résolutions spatiales et

temporelles (Coll et al., 2005). Cependant, la récupération du LST à partir des données satellitaires nécessite la correction des effets introduits par l'atmosphère, principalement l'absorption et l'émission de vapeur d'eau atmosphérique, ainsi que l'émissivité de la surface, qui peut être nettement inférieure à l'unité et varier spatialement avec le type et la couverture de surface (Coll et al., 2005).

L'indice de température de surface terrestre (LST) est un facteur essentiel dans de nombreux domaines tels que les études sur le changement climatique mondial, l'occupation/utilisation du sol, ainsi que dans les domaines de la géo-/biophysique (Jeevalakshmi et al., 2017). De plus, il sert de base pour les modèles en hydrologie (Ambast et al., 2008 ; Liang, 2004), en climatologie (Wild et al., 2005), en prévisions météorologiques (Van Den Hurk et al., 2002) et en écologie (Gamon et al., 2004), à différentes échelles (Vlassova, 2016).

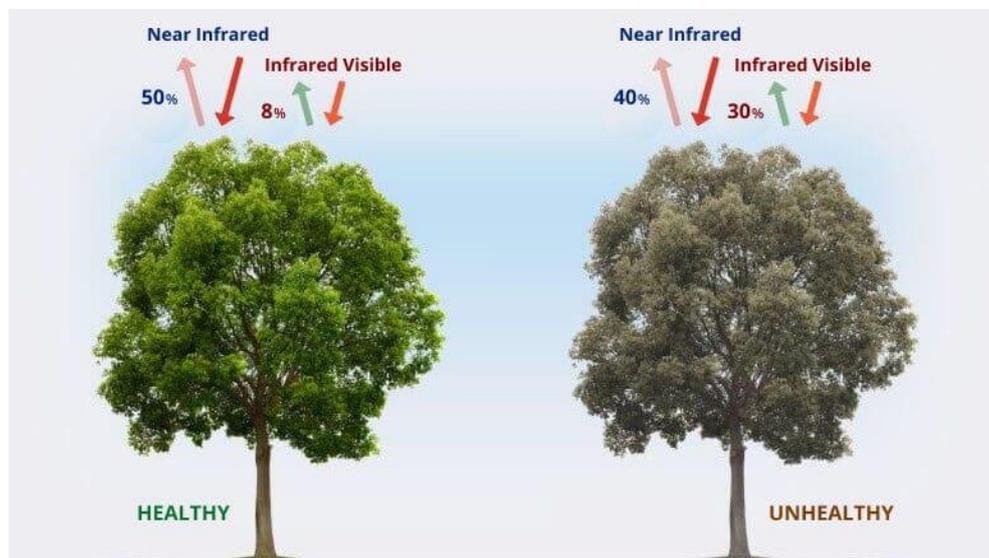
Le lien entre le LST et les variables environnementales de surface est établi par l'équation du bilan énergétique de surface. Le LST est associé au transfert de chaleur entre la surface terrestre et la couche limite atmosphérique (Kustas et Anderson, 2009) et permet d'estimer le flux de chaleur sensible (Jia et al., 2001) ainsi que le flux de chaleur latente, c'est-à-dire l'évapotranspiration (Anderson et al., 2012). En effet, le LST influence tous les stades de développement des plantes. Il est un indicateur de la santé de la végétation (Moran, 2004 ; Zarco-Tejada et al., 2003), en raison de la relation étroite entre la température de la canopée et le stress hydrique qui provoque la fermeture des stomates des plantes (Bachir et al., 2021 ; Imhoff et al., 2010). En tant qu'indicateur de la teneur en eau de la végétation, le LST est l'une des variables utilisées pour évaluer le risque d'incendie en milieu forestier (Chuvieco et al., 2004 ; García et al., 2008) : les zones ayant une teneur en eau plus faible présentent une probabilité plus élevée de propagation d'incendie (Vlassova, 2016).

### **3.4 L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)**

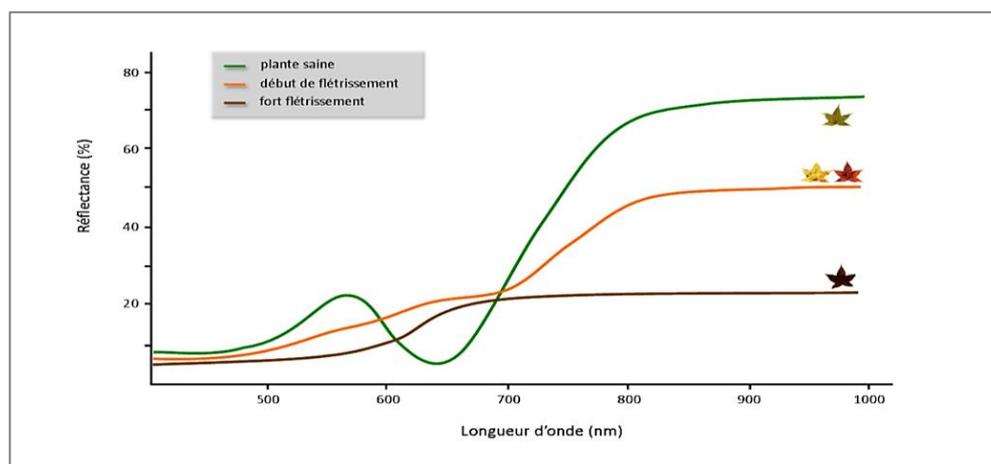
L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est un indicateur permettant de caractériser l'activité chlorophyllienne des plantes (Razagui et Bachari, 2014) et fournissant des informations sur la verdure et l'état de la végétation. Il est utilisé dans différents domaines environnementaux, en particulier en agriculture. Sa formule de calcul est définie comme la différence normalisée entre les réflectances dans le spectre visible et le proche infrarouge.

$$\text{NDVI} = (\text{proche IR} - \text{rouge}) / (\text{proche IR} + \text{rouge})$$

L'NDVI est sensible à la quantité et à la vigueur de la végétation. Ses valeurs varient entre -1 et 1. Les valeurs négatives représentent les surfaces autres que les couverts végétaux, telles que la neige, l'eau ou les nuages, où la réflectance dans le rouge est élevée par rapport à celle dans le proche infrarouge. Les valeurs proches de 0 correspondent aux sols nus, où les réflectances sont du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge. Cependant, les valeurs positives du NDVI représentent les formations végétales et varient généralement entre 0,1 et 0,7, les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses. En effet, lorsque la végétation est en bonne santé, elle absorbe la plupart de la lumière visible qui l'atteint et émet une partie importante de la lumière proche infrarouge. En revanche, la végétation clairsemée émet plus de lumière visible et moins de lumière proche infrarouge (Rafik et Oughriss, 2017) (Figure 3.3) (Figure 3.4).



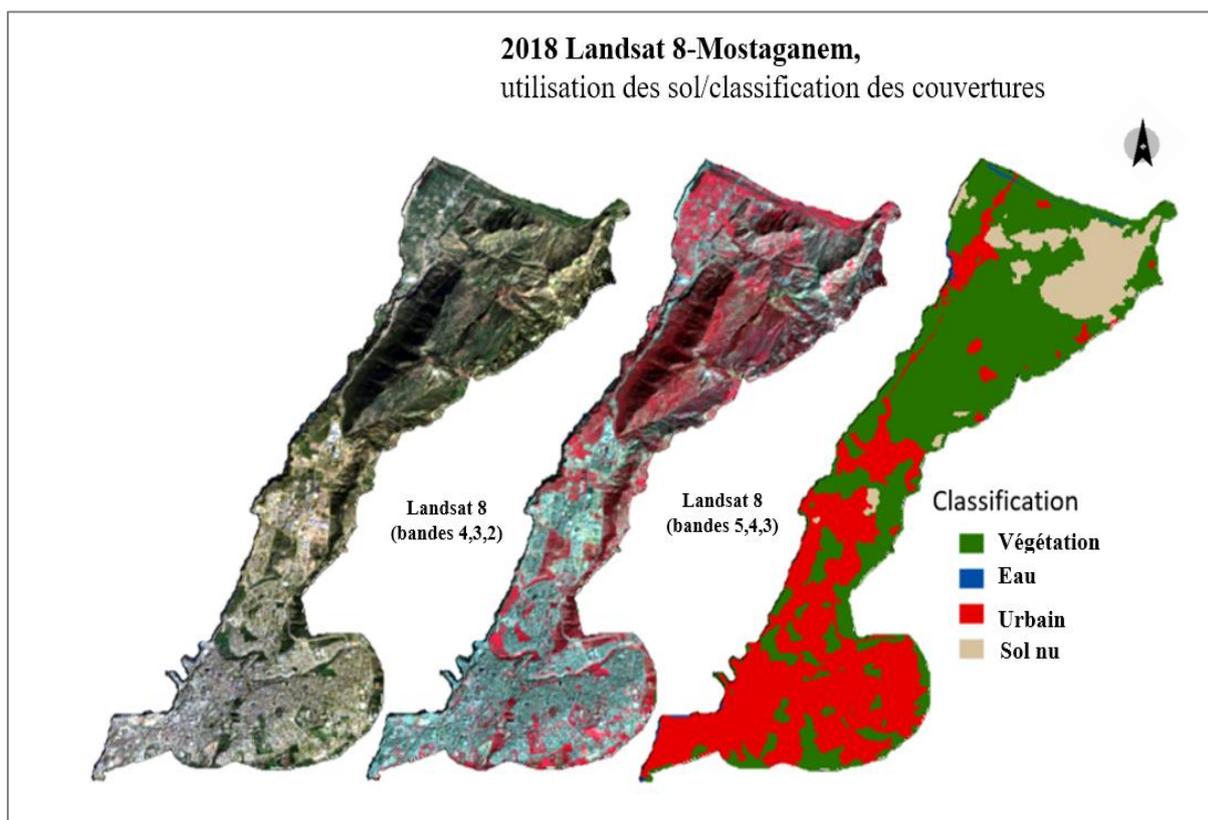
**Figure 3.3 :** Le NDVI est une mesure de l'état de santé des plantes basée sur la façon dont la plante réfléchit la lumière à certaines fréquences (certaines ondes sont absorbées et d'autres sont réfléchies). Source : <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>.



**Figure 3.4 :** Changement de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation. Source : Rafik et Oughriss, 2017, d'après : <http://e-cours.univ-paris1.fr>.

### 3.5 Application à la ville de Mostaganem : L'analyse de la relation entre la température de surface (LST) et l'indice de végétalisation par différence normalisé (NDVI)

Cette partie de notre travail est réalisée en collaboration avec Lahouari Bounoua, professeur et directeur associé du laboratoire « Biospheric Sciences Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center », ainsi que Joseph Nigro, chercheur dans le même laboratoire. Ils nous ont fourni les cartes et les valeurs moyennes du LST et du NDVI de la ville de Mostaganem. Notre objectif dans ce chapitre était d'analyser, à l'échelle de la ville, trois aspects : premièrement, la quantité de végétation active (en mesurant la teneur en chlorophylle) ; deuxièmement, la température des surfaces ; et troisièmement, la localisation des îlots de chaleur urbains en période estivale à partir de la carte du LST. Pour cela, notre méthodologie a été basée sur l'étude de l'évolution des deux paramètres NDVI et LST sur cinq ans, de mars 2014 à février 2019, pour les quatre types d'occupation du sol : sol bâti, végétation, eau et sol nu (voir figure 3.5). Les valeurs ont été obtenues à partir du traitement d'images satellitaires de type Landsat 8.



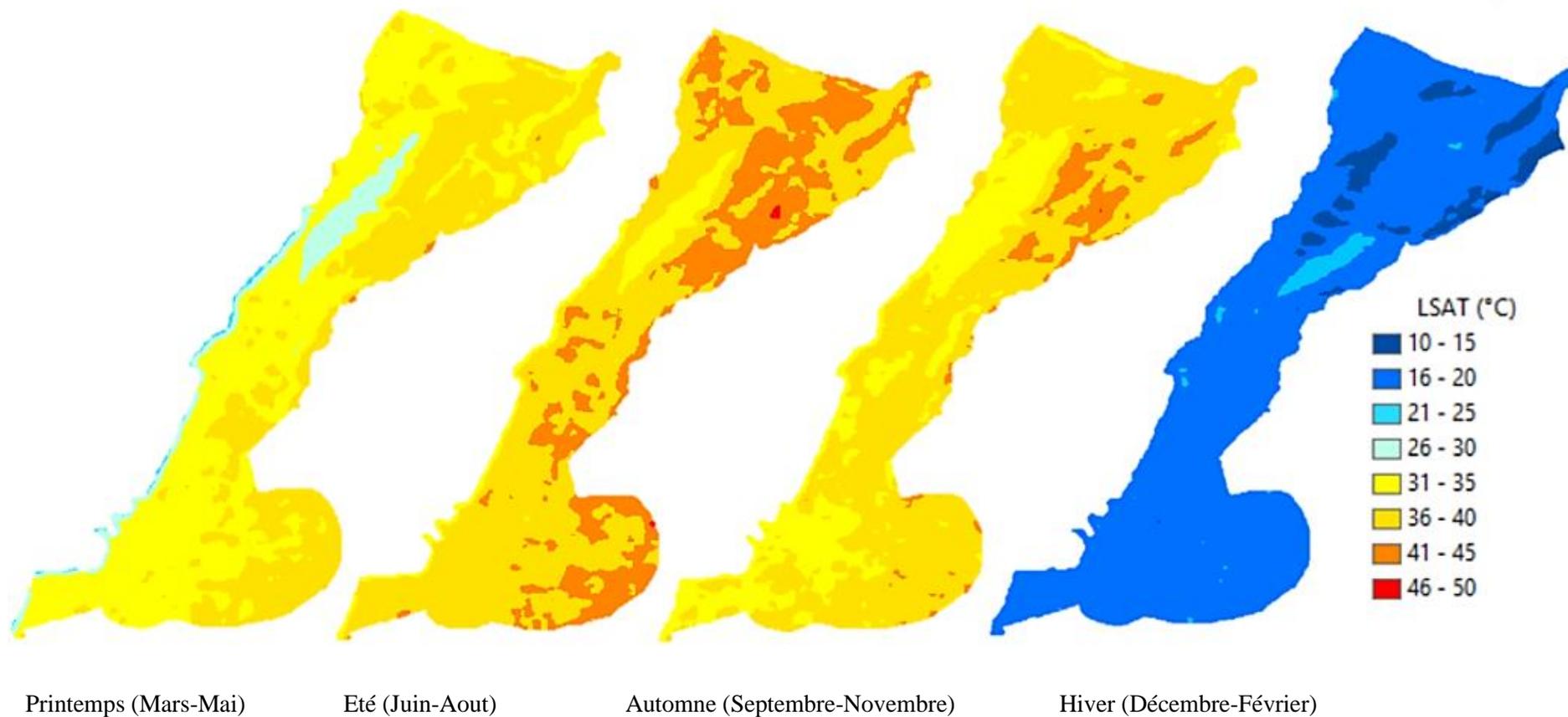
**Figure 3.5 :** Carte d'utilisation/d'occupation des sols de la ville de Mostaganem basée sur l'image LANDSAT 8. Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro.

### 3.5.1 L'analyse des résultats du LST

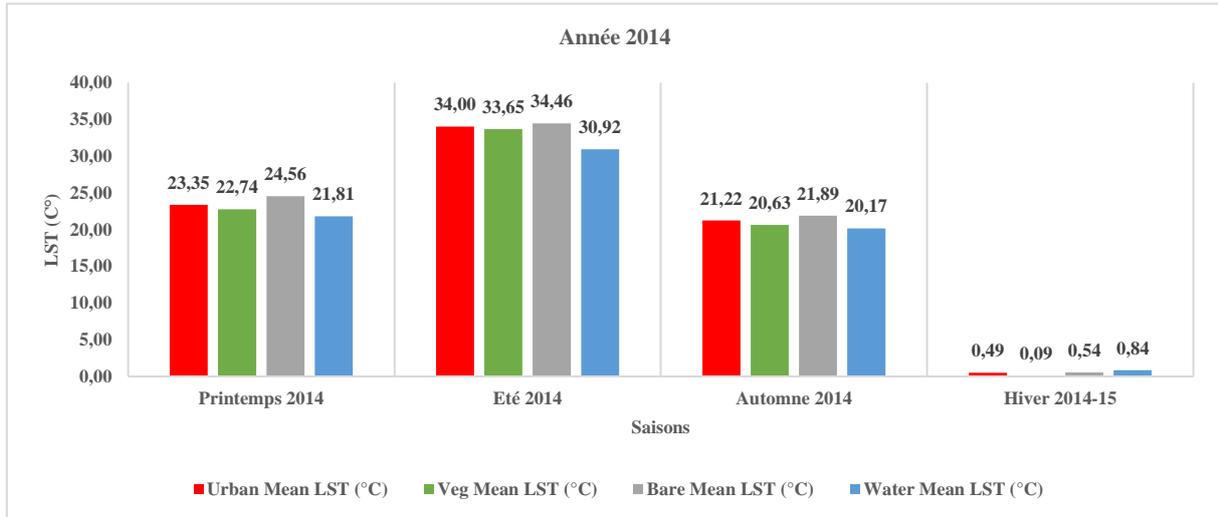
La figure 3.6 illustre la distribution spatiale de la moyenne saisonnière de la température de surface du 1er mars 2014 au 28 février 2019. Les valeurs du LST varient selon la saison. Au printemps, on enregistre des valeurs moyennes du LST variant entre 31°C et 35°C sur la partie Ouest de la ville et des valeurs moyennes entre 36°C et 40°C sur la partie Est. En période estivale, ces valeurs augmentent pour atteindre en moyenne entre 36°C et 40°C à l'Ouest et 41°C et 45°C à l'Est. En automne, le LST commence à diminuer, les valeurs moyennes affichées sur la majorité de la surface de la ville variant entre 36°C et 40°C, avec des parties à l'Ouest caractérisées par des valeurs moyennes comprises entre 31°C et 35°C. L'hiver est la saison la plus froide de l'année, et le LST exprime les valeurs moyennes les plus basses, qui sont comprises entre 16°C et 20°C sur presque toute la surface de la ville. Les zones qui ont enregistré les moyennes les plus élevées du LST pendant la saison d'été (couleur orange dans la figure 3.6) se situent dans la partie Est en périphérie du tissu bâti de la ville, dans la colline Diss au nord-est, dans des petites zones du centre-ville, et enfin dans une partie du nord. La partie Est du tissu urbain est principalement composée d'équipements sportifs et de zones d'activités, tandis que les petites zones du centre-ville sont situées près de la gare ferroviaire. Cependant, la partie nord englobe la zone du parc urbain « Mostaland ». Il est clair qu'une température plus élevée est associée aux bâtiments urbains et aux principales artères de transport, composés de matériaux non poreux tels que le métal, l'asphalte et le béton (Carlson 1986; Kim 1992; Lo et al. 1997). La partie sud en périphérie de la ville de Mostaganem représente la plus grande zone avec les LST les plus élevés du tissu bâti en période d'été. En confirmation de nos résultats, Lazzarini et al. (2015) ainsi que Mirzaei et al. (2020) ont déclaré que les villes situées dans des régions chaudes et arides ont affiché des températures de surface plus élevées dans leurs zones suburbaines par rapport aux parties centrales.

Les figures 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 montrent l'évolution graphique des valeurs moyennes saisonnières du LST par types de surfaces (sol bâti, végétation, eau et sol nu) pour les années 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018, respectivement. Les moyennes du LST les plus élevées ont été enregistrées en période estivale et sur les sols bâtis et nus. La moyenne du LST des sols bâtis ou Urban mean LST pour la saison d'été pour ces années est de 34 °C, 30,53 °C, 19,99 °C, 31,60 °C et 26,13 °C respectivement. Bien que la moyenne du LST ait varié au cours des années étudiées (2014 et 2016 ont respectivement enregistré le LST le plus élevé et le plus bas pour la saison d'été), le test de comparaison des moyennes a montré qu'il n'y avait pas de différence significative ( $P > 0,05$ ) entre la moyenne du LST pour les années étudiées. L'absence de

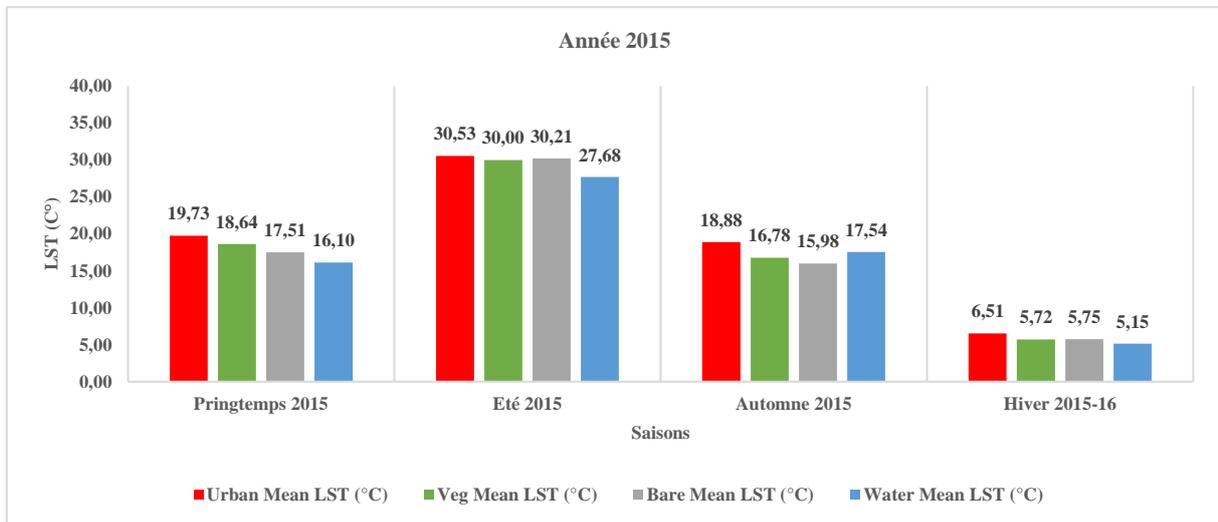
différence significative entre le LST moyen pourrait être due à la courte durée de la période d'étude (cinq ans) et à l'absence de changements dans les facteurs affectant la température de surface du sol dans la ville de Mostaganem. L'un des facteurs les plus importants affectant le LST urbain est la composition de l'utilisation des terres, par exemple, les espaces verts et les surfaces artificielles (Weng et al, 2004 ; Imhof et al, 2010 ; Doick et al, 2014 ; Mirzaei et al, 2020). Dans ce sens, Bentekhici et Youcefi (2013) ont analysé l'étalement urbain de la ville de Mostaganem à l'aide de données satellitaires sur une période de 23 ans (1984-2007). Au cours de cette période, un important étalement urbain a été observé. En général, on peut supposer que la température de surface étudiée pendant la période de cinq ans est peu significative. Nous avons choisi cette période pour localiser les ICU de surface dans la ville en période d'été et analyser la corrélation entre les températures de surface et la présence de la végétation.



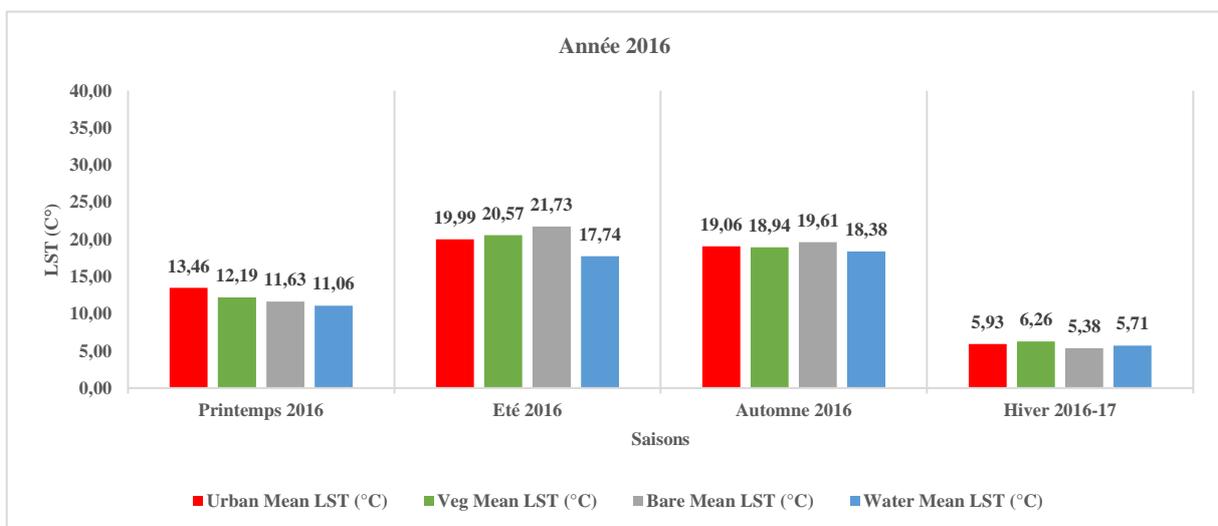
**Figure 3.6 : Moyenne saisonnière du LST (du 1<sup>er</sup> Mars 2014 aux 28 Février 2019).** Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro



**Figure 3.7 :** L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2014.



**Figure 3.8:** L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2015.



**Figure 3.9:** L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2016.

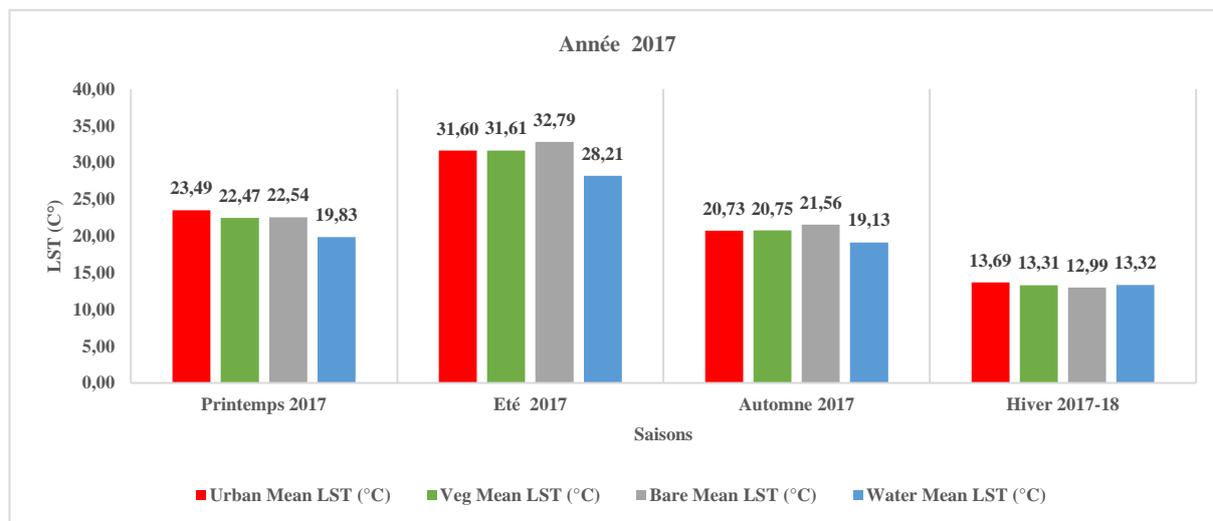


Figure 3.10: L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2017.

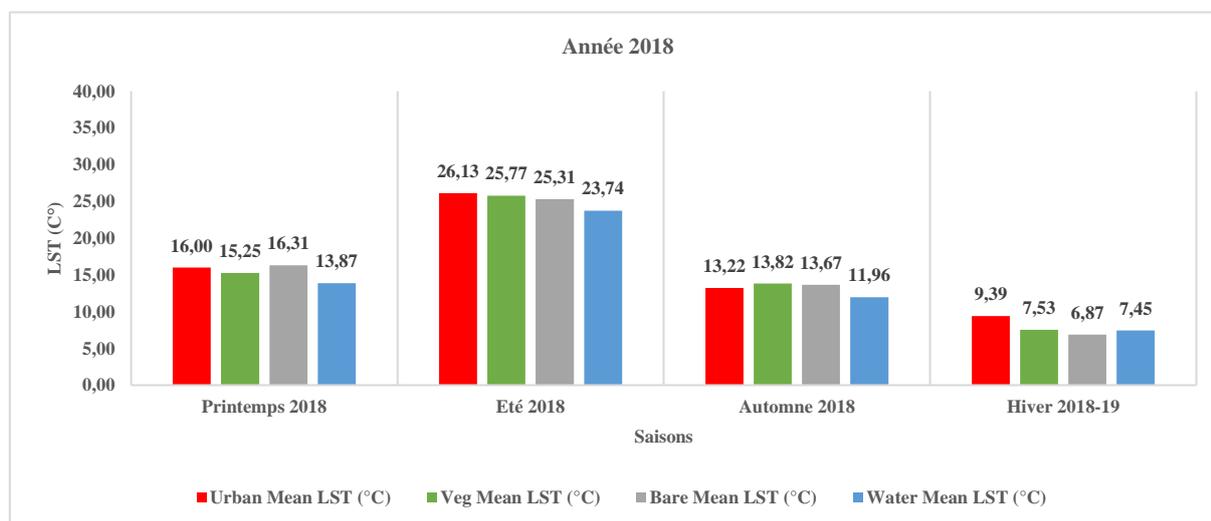


Figure 3.11: L'évolution de la moyenne saisonnière du LST par type de surface pour l'année 2018.

### 3.5.2 L'analyse des résultats du NDVI

La photosynthèse, l'absorption d'eau, la transpiration, la respiration et l'activité enzymatique sont influencées par la température (Faisal et al., 2021). La figure 3.12 représente la distribution spatiale de la moyenne saisonnière du NDVI pour la période d'étude du 1er mars 2014 au 28 février 2019. Pour les quatre saisons, les moyennes du NDVI les plus faibles ont été enregistrées dans le tissu urbain au-dessus des surfaces bâties, tandis que les valeurs les plus élevées ont été observées dans les espaces végétalisés de la ville. L'NDVI reflète la densité des feuilles, ce qui en fait un indicateur du taux de photosynthèse et de transpiration (Birky, 2001). En effet, les saisons d'hiver et de printemps sont caractérisées par les valeurs moyennes les plus élevées du

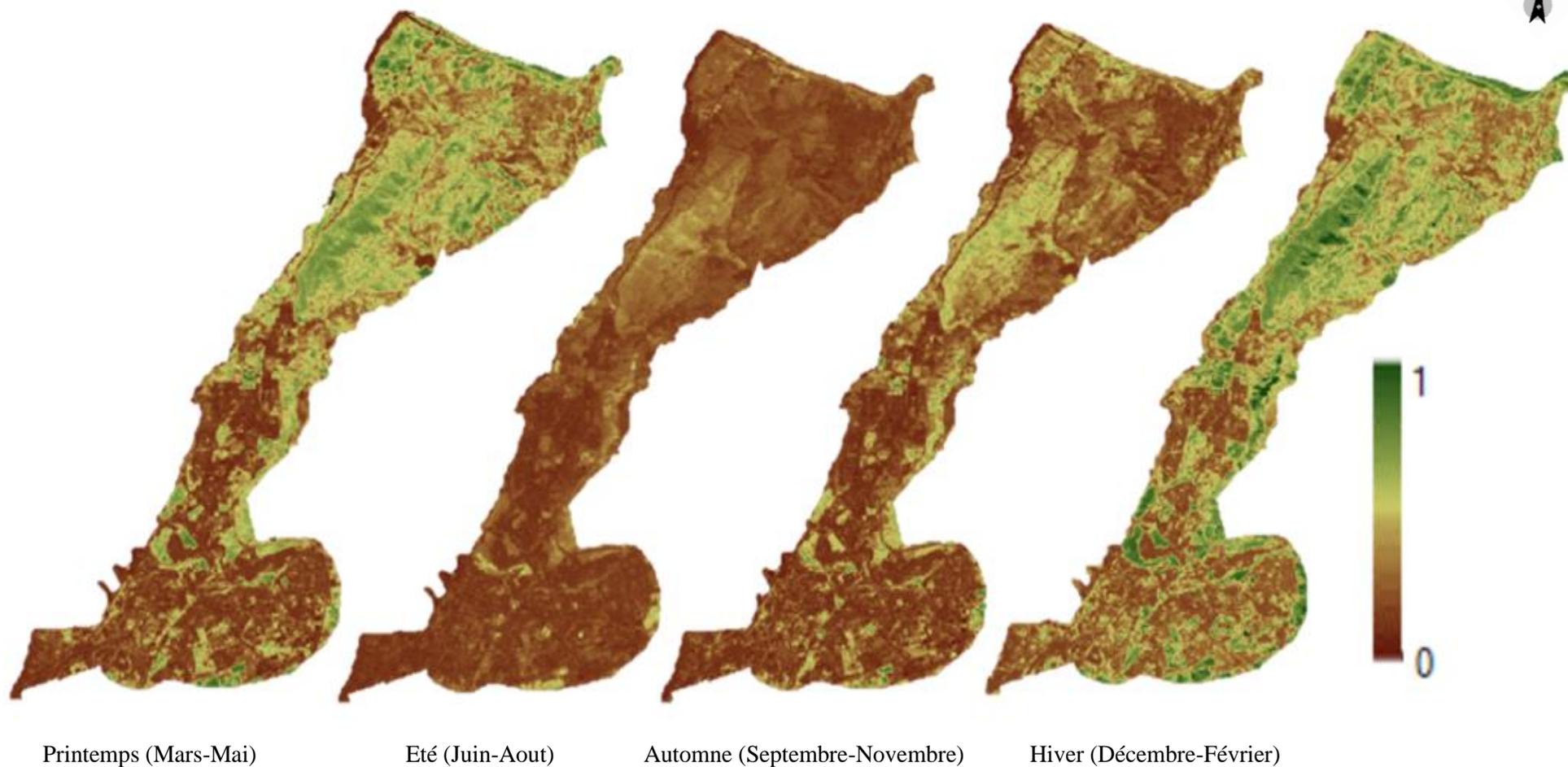
LST (figure 3.12) de l'année, ce qui indique une activité végétale accrue pendant ces deux saisons. Cette augmentation est due à la pluviométrie de cette période de l'année. Les précipitations sont étroitement corrélées au NDVI, en particulier dans les environnements arides et semi-arides où elles limitent la croissance des plantes. Plusieurs études (Smith et al., 1997; Du Plessis, 1999; Suzuki, Tanaka et Yasunari, 2000; Kawabata, Ichhi et Yamaguchi, 2001; Wang, Price et Rich, 2001) ont montré des corrélations significatives entre le NDVI et les précipitations dans différentes régions du monde, y compris les régions arides et semi-arides. Au sud de la ville de Mostaganem, les espaces présentant un NDVI élevé sont des jardins, des forêts urbaines, des places végétalisées et des espaces situés le long de l'Oued Aïn-Sefra. Au nord, ces valeurs élevées reflètent la colline de Diss. Pendant la saison d'été, les moyennes du NDVI les plus basses ont été enregistrées sur l'ensemble de la surface de la ville. Pendant cette saison, la végétation peut être stressée et la photosynthèse inhibée, ce qui contribue davantage au réchauffement du milieu urbain et à la formation des ICU. Ce stress hydrique<sup>24</sup> des plantes est probablement dû à la chaleur, à la sécheresse et au manque d'irrigation. Avec le retour des pluies en automne, l'NDVI commence à reprendre des valeurs plus élevées (figure 3.12).

Les figures 3.13 à 3.17 illustrent l'évolution de la moyenne saisonnière de l'NDVI par type de surface pour les années 2014 à 2018, respectivement. En été, des valeurs moyennes de 0,14, 0,18, 0,16, 0,20 et 0,21 ont été enregistrées pour les années étudiées, respectivement, au-dessus des espaces végétalisés. Pour la saison du printemps, les moyennes sont de 0,37, 0,32, 0,22, 0,35 et 0,35, respectivement. En revanche, pour la période d'hiver, les valeurs obtenues sont de 0,31, 0,15, 0,29, 0,39 et 0,30, respectivement. Les valeurs d'hiver et de printemps, qui varient entre 0,22 et 0,39, indiquent une présence modérée de la végétation<sup>25</sup>. De plus, la différence entre les moyennes de l'NDVI entre les années étudiées n'est pas significative ( $P > 0,05$ ), tout comme les valeurs du LST mentionnées précédemment.

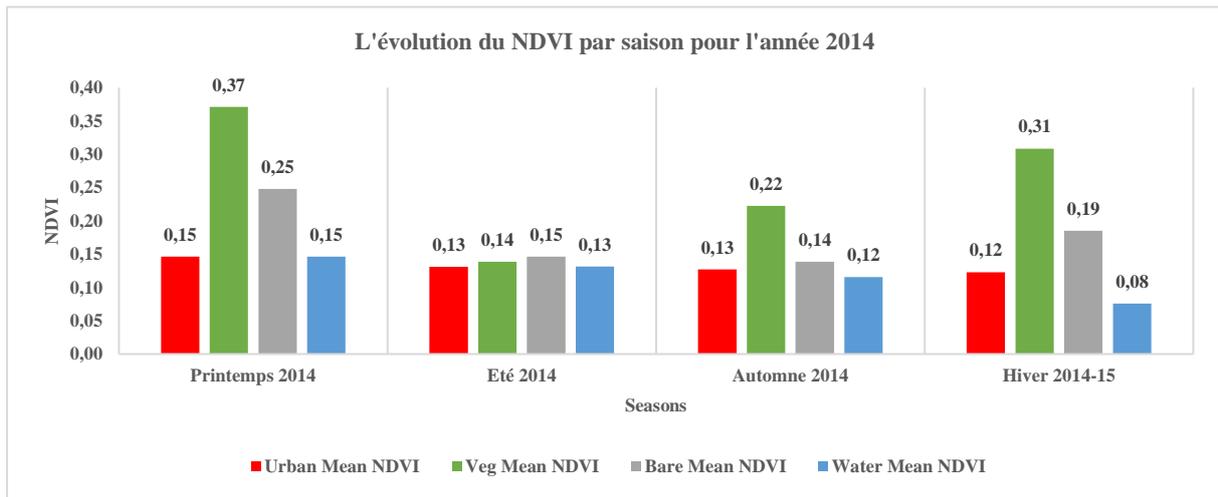
---

<sup>24</sup> Le stress hydrique, ou stress osmotique est subi par une végétation située dans un environnement qui amène à ce que la quantité d'eau transpirée par la plante soit supérieure à la quantité qu'elle absorbe (wikipedia.org).

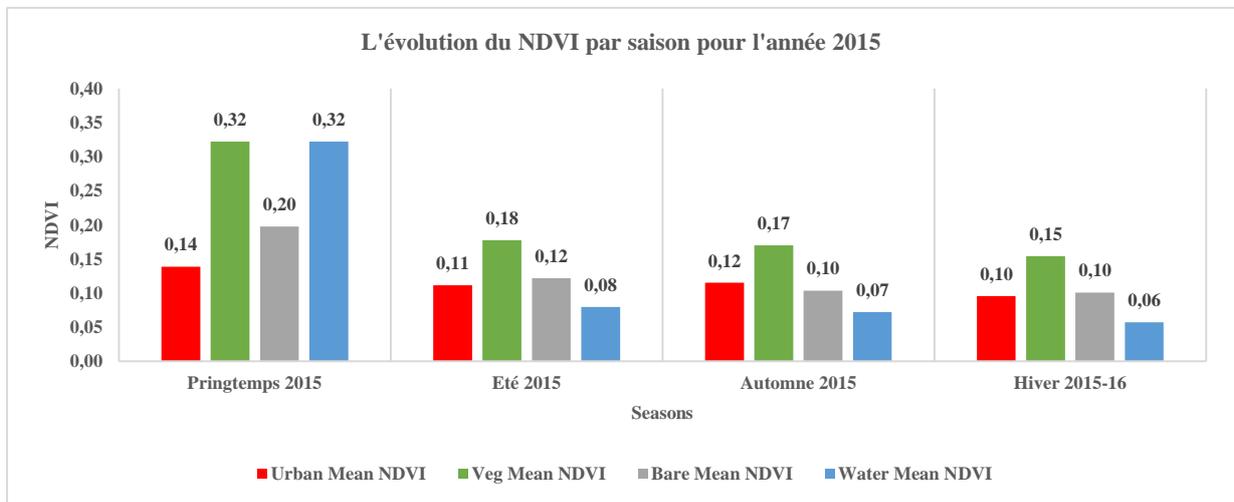
<sup>25</sup> Les valeurs négatives du NDVI représentent les nuages, l'eau et la neige, et les valeurs proches de zéro sont situées au-dessus des roches et du sol nu. Les valeurs très faibles (0.1 et inférieures) correspondent aux surfaces stériles des roches, du sable ou de la neige. Les valeurs modérées (de 0.2 à 0.3) sont constituées d'arbustes et des prairies, tandis que les valeurs élevées (de 0.6 à 0.8) désignent les forêts vierges tropicales et tempérées (<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>).



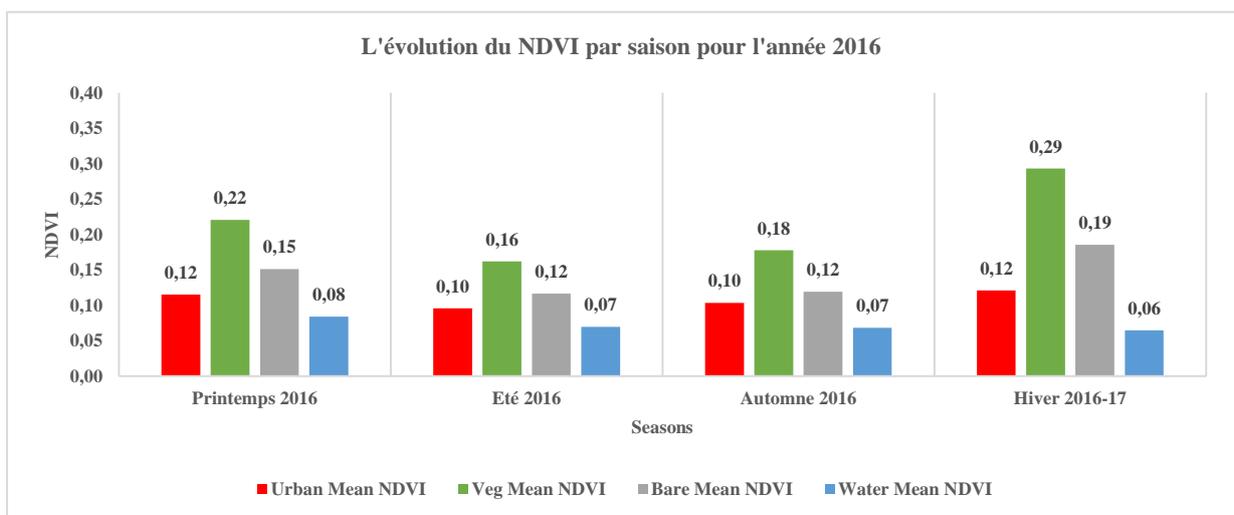
**Figure 3.12 : Moyenne saisonnière du NDVI (du 1<sup>er</sup> Mars 2014 aux 28 Février 2019).** Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro.



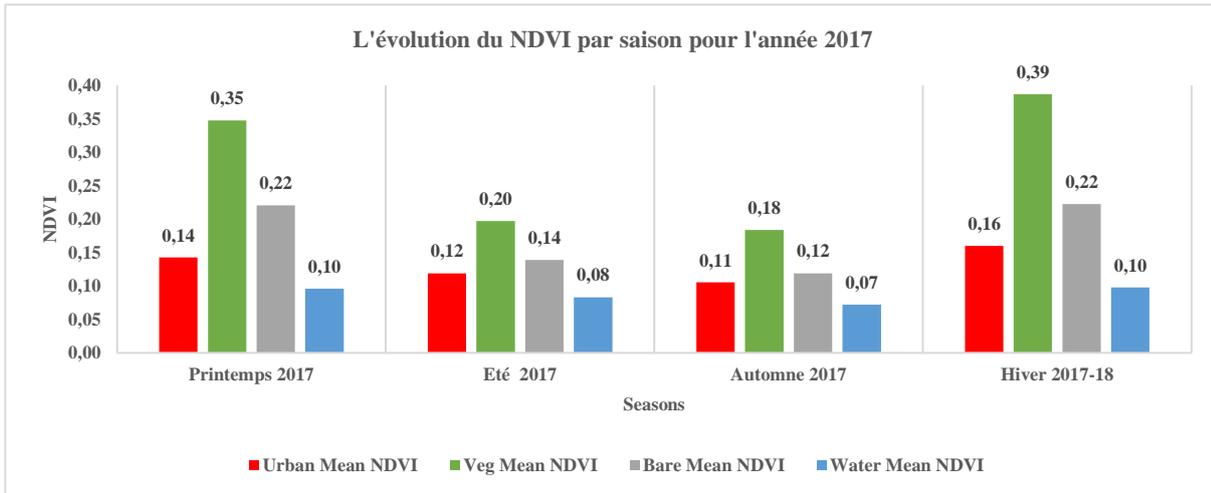
**Figure 3.13** : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2014.



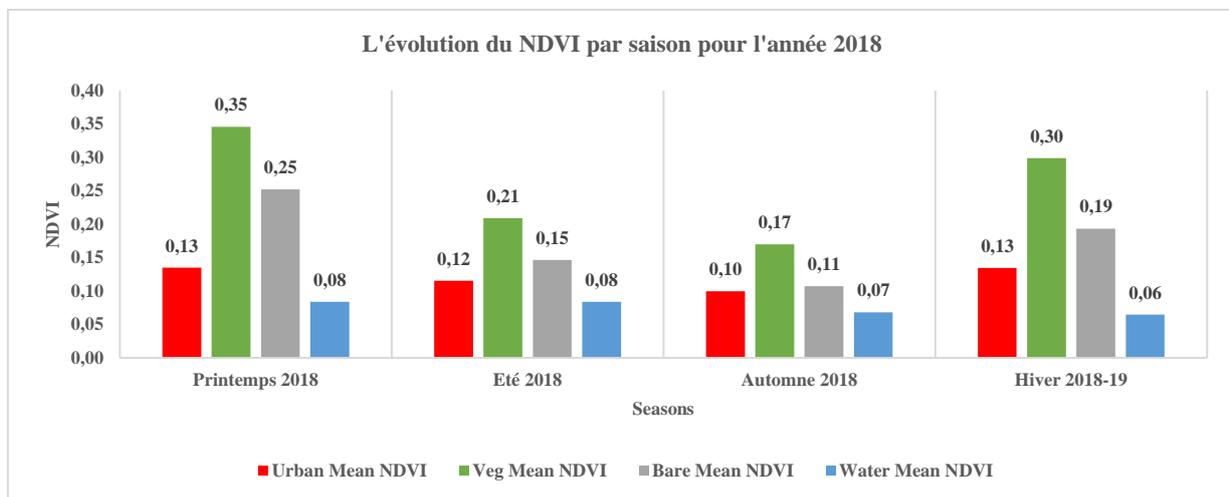
**Figure 3.14** : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2015.



**Figure 3.15** : L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2016.



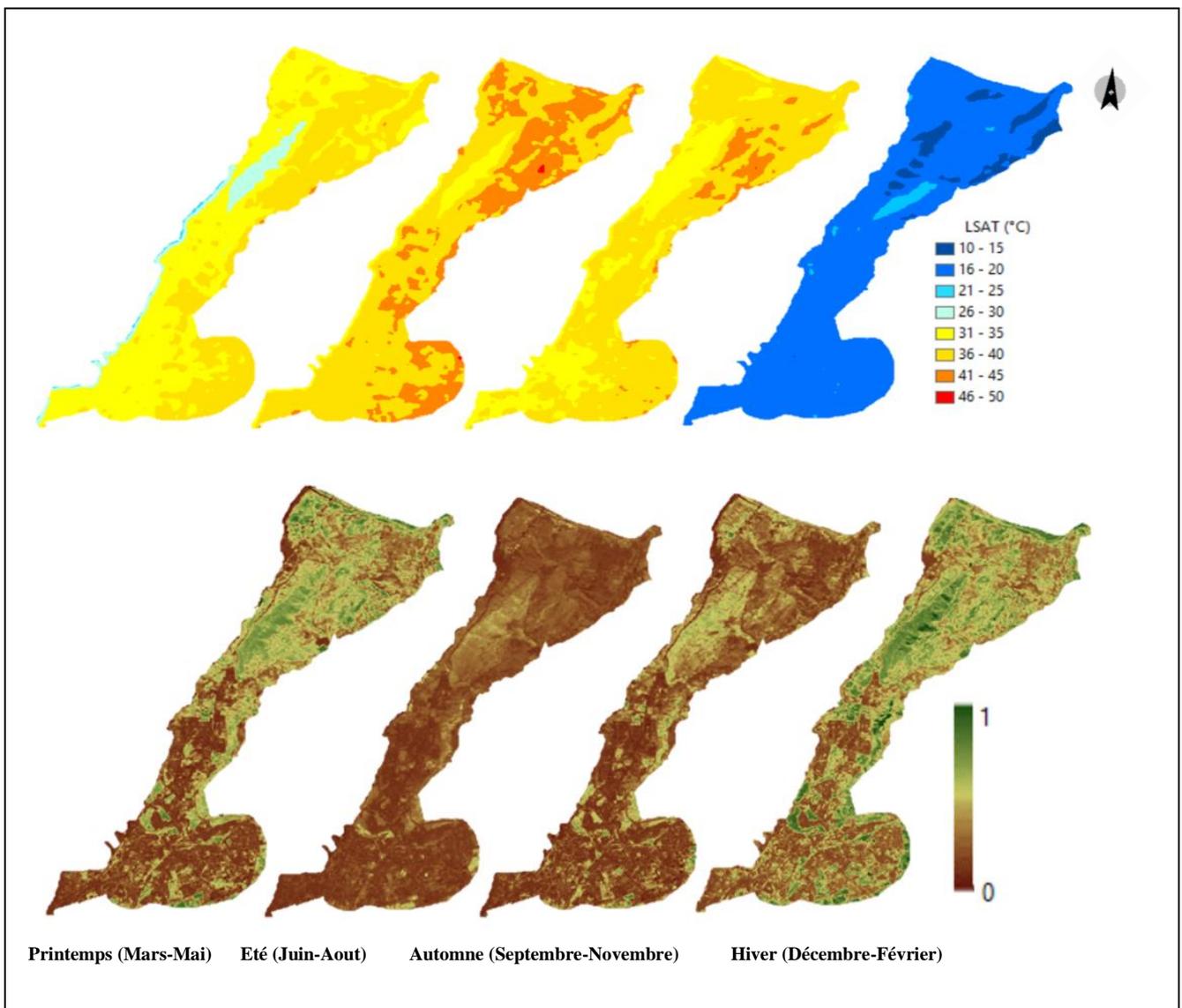
**Figure 3.16 :** L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2017.



**Figure 3.17 :** L'évolution de la moyenne saisonnière de l'INDVI par type de surface pour l'année 2018.

### 3.5.3 L'analyse de la relation entre LST et NDVI

La figure 3.18 représente deux cartes des moyennes des cinq ans du NDVI et LST pour les quatre saisons. On remarque que pendant l'hiver, lorsque les moyennes du LST sont les plus basses, les moyennes du NDVI prennent leurs valeurs les plus hautes. Au printemps, lorsque les moyennes du LST commencent à augmenter, le NDVI diminue. Cependant, en été,



**Figure 3.18** En haut la moyenne saisonnière du LST (du 1<sup>er</sup> Mars 2014 aux 28 Février 2019), et en bas la moyenne saisonnière du NDVI (du 1<sup>er</sup> Mars 2014 aux 28 Février 2019). Source : N.Bachir en collaboration avec Bounoua Lahouari et Joseph Nigro.

**Tableau 3.2** Le coefficient de corrélation de Pearson entre LST and NDVI. Source : N.Bachir.

Type de surface	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Bâti</b>	0,46	0,41	-0,94	-0,57	-0,25
<b>Végétation</b>	-0,55	0,18	-0,99	-0,67	-0,38
<b>Sol nu</b>	-0,17	0,21	-0,99	-0,59	-0,18
<b>Eau</b>	-0,87	0,00	0,00	-0,41	0,79

lorsque le LST est le plus élevé, le NDVI est le plus bas. En automne, lorsque le LST diminue à nouveau, le NDVI augmente. En effet, cette corrélation négative est davantage exprimée dans le tableau 3.2, qui présente le coefficient de corrélation de Pearson (P)<sup>26</sup> entre le LST et le NDVI des quatre types d'occupation du sol entre 2014 et 2018. Les résultats du tableau indiquent une forte corrélation négative entre le LST et le NDVI. Cette relation explique que le changement du NDVI a un impact sur les valeurs du LST et sur la formation des ICU.

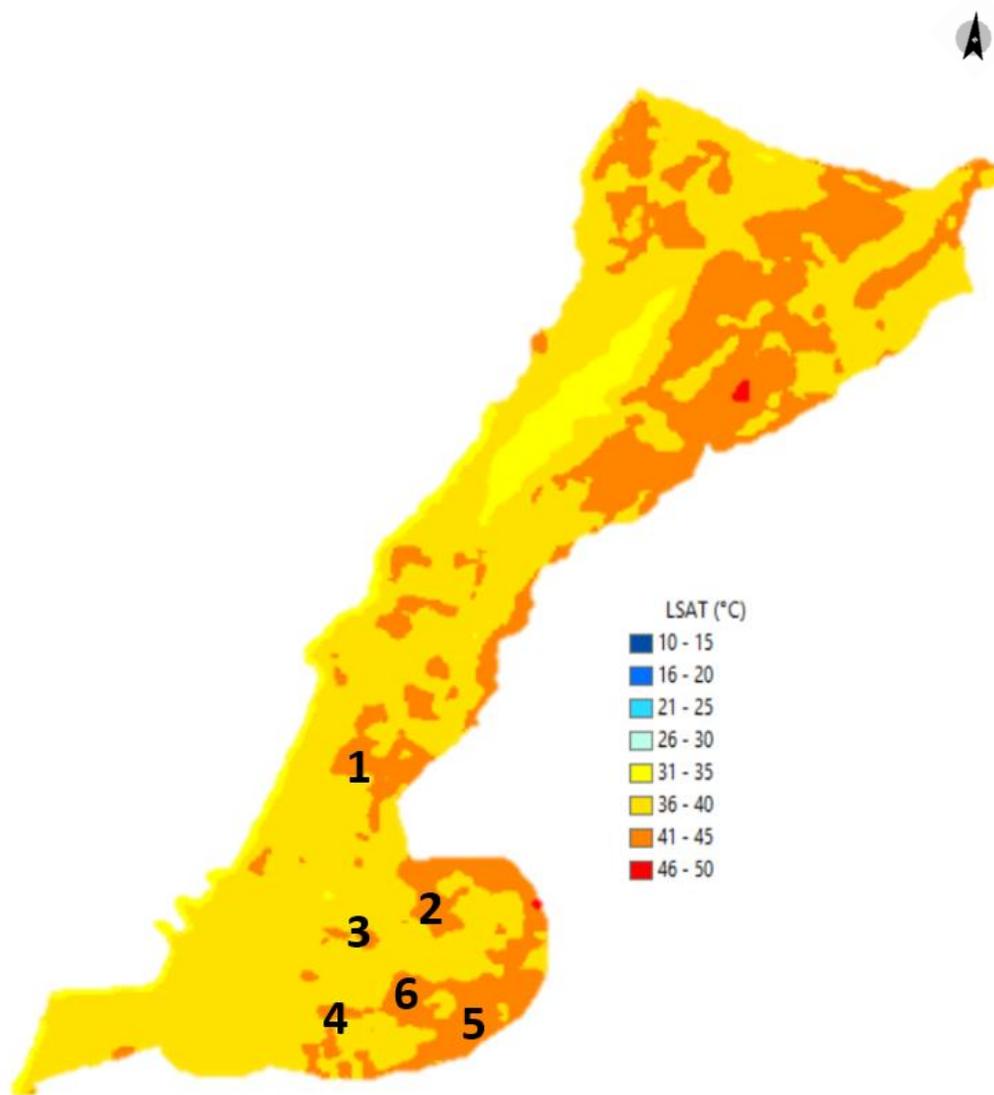
#### 3.5.4 La localisation des ICU de surface en été à Mostaganem

Les îlots de chaleur urbains les plus intenses en période estivale sont situés pour la plupart dans la partie Est en périphérie de la ville de Mostaganem. La figure 3.19 illustre les six îlots de chaleur urbains de surface détectés à partir de la carte des températures de surface. Comme mentionné précédemment, cette situation en périphérie caractérise les villes situées dans les régions chaudes et arides (Lazzarini et al., 2015 ; Mirzaei et al., 2020). Au nord, les températures de surface les plus élevées sont observées sur la colline Diss. Le tableau 3.3 comprend les images satellitaires Google Earth des six ICU avec leurs caractéristiques physiques. On remarque que tous les ICU les plus intenses sont caractérisés par une faible présence de végétation et des bâtiments de hauteur moyenne ou faible entourés de grandes surfaces pavées de béton.

Parmi ces ICU, on note l'existence d'un parc de loisirs (Mosta-Land, site numéro 01), d'une zone d'activités (site numéro 05) et d'un complexe sportif (site numéro 06). Ces équipements se

<sup>26</sup> La corrélation de Pearson ou R de Pearson est un coefficient de corrélation utilisé dans la régression linéaire. Ses valeurs sont comprises entre -1 et 1, où : 1 indique une forte relation positive, -1 indique une forte relation négative, et un résultat de zéro indique qu'il n'y a aucune relation.

distinguent par des bâtiments construits avec des matériaux à faible albédo (constructions métalliques).



**Figure 3.19** Situation des ilots de chaleur urbain de surface dans la ville de Mostaganem. Source : N.Bachir.

**Tableau 3.3** Les ICU de surface et leurs caractéristiques physiques à Mostaganem durant la période d'étude. Source : N.Bachir.

Numéro d'ICU de surface	Images de Google Earth	Caractéristiques physiques
1 et 2		Bâtiment de hauteur moyenne avec peu ou pas d'arbres couverts dans le site 1 ( site du parc MOSTA-LAND) et la présence d'une forêt clairsemée dans le site 2 (site de la cité El-Houria) et entouré d'une grande surface pavée de béton.
3 et 4		Mélange d'immeubles de hauteur moyenne et de faible hauteur (Bâtiments commerciaux, administratives et résidentielles) avec la présence d'un jardin public dans le site 3 ( site du centre-ville colonial) et peut d'espaces verts dans le site 4 (site du CFPA Mokhtari Benchaâ).
5 et 6		Bâtiment de hauteur faible pour le site 5 (site de la zone d'activité), et un mélange d'immeubles de hauteur moyenne et de faible hauteur dans le site 6 (site du complexe sportif) , avec peu ou pas d'espaces verts,

#### 3.5.4.1 L'ICU choisi pour l'étude des simulations

Dans le but de réaliser des simulations numériques de l'effet de la végétation à l'échelle microclimatique dans la suite de notre travail de recherche, l'ICU numéro 2 de la cité El-Houria situé à l'Est de la ville de Mostaganem a été choisi comme cas d'étude (tableau 3.3). En effet, cet ICU présente des caractéristiques qui répondent à nos objectifs de scénarios de simulations visant à créer différentes configurations spatiales de la végétation, notamment la présence d'une forêt urbaine et d'un espace central vide.

#### Conclusion

Dans ce chapitre, la télédétection nous a permis d'analyser les températures de surface (LST) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) de Mostaganem. Nos résultats indiquent que la moyenne du LST atteint 45°C au-dessus du tissu urbain en période estivale. Cependant, le NDVI atteint ses valeurs les plus élevées en hiver et varie entre 0,22 et 0,39, ce qui indique une présence modérée de végétation. Ensuite, l'étude de la relation entre le LST et le NDVI nous a montré l'existence d'une forte corrélation négative entre ces deux paramètres, ce qui explique l'impact de la végétation sur les températures de surface.

À partir de la carte des moyennes de LST, six ICU de surface ont été détectés, situés principalement dans la périphérie sud de la ville. Cette situation caractérise les villes situées dans les régions chaudes et arides (Lazzarini et al., 2015 ; Mirzaei et al., 2020).

L'ICU de la cité El-Houria, située dans le sud-est de la ville de Mostaganem, a été choisi comme cas d'étude pour la réalisation de simulations numériques dans la suite de notre travail. Ces simulations sont effectuées à l'aide du logiciel ENVI-met, qui sera exploré en détail dans le chapitre suivant

# CHAPITRE 04

## ENVI-MET, L'OUTIL DE SIMULATION DU MICROCLIMAT



*« ...Ces simulations informatiques sont devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale pour lesquels les expériences sont difficiles, coûteuses voire impossibles ». Jean-Jacques Gaillard, La simulation numérique : un outil puissant au service de la recherche. La revue numérique, 2004, p6.*

## Introduction

La simulation des microclimats en milieu urbain joue un rôle fondamental dans la compréhension et la résolution des problèmes environnementaux complexes liés à la ville. Les chercheurs utilisent plusieurs modèles météorologiques pour simuler les interactions entre la ville et l'atmosphère à différentes échelles. Les outils de simulation représentent les phénomènes physiques qui déterminent le climat urbain, et aident à évaluer l'influence des choix d'aménagement sur la température et le confort thermique en ville. Ils intègrent généralement des calculs d'ensoleillement, de stockage et déstockage thermique, d'écoulement du vent, et de chaleur anthropique (Morille, 2021).

ENVI-met est un outil de modélisation urbain tridimensionnel qui permet de traiter les différents aspects du microclimat urbain, à la fois thermodynamique et aéraulique, tout en considérant les effets de la végétation (Bruse et Fleer, 1998 ; Huttner, 2012). Contrairement aux modèles dédiés à l'analyse du bâtiment ou de la ville à petite échelle, ENVI-met simule le champ urbain à l'échelle d'un fragment urbain, allant de la rue canyon au quartier.

Dans ce chapitre, nous présentons l'outil de simulation numérique ENVI-met que nous allons utiliser dans notre travail. Nous commençons par une présentation non exhaustive des outils de simulation numérique du microclimat urbain, puis nous décrivons en détail ENVI-met, y compris ses caractéristiques, les différentes équations utilisées pour les calculs, le concept du forçage, le degré de précision des résultats de simulation, ainsi que quelques études sur l'ICU ayant utilisé ENVI-met.

### 4.1 Les outils de la simulation numérique du microclimat urbain

Les études sur la modélisation du microclimat urbain utilisent des outils de simulation numérique. Ces outils intègrent la forme géométrique des bâtiments ainsi que les facteurs qui ont une influence sur le climat. Les principaux objectifs de ces études sont la prévention de l'îlot de chaleur urbain, l'analyse du confort thermique des piétons et l'intégration des ressources en énergie renouvelable dans la conception urbaine (Fahed, 2019).

À chaque échelle de description du climat urbain correspondent des objectifs différents. Pour analyser l'impact des villes sur l'atmosphère, notamment le phénomène d'îlot de chaleur urbain, les modèles développés permettent de reproduire les principaux échanges énergétiques et hydriques entre le milieu urbain et l'atmosphère (Musy et al., 2014). Pour l'étude de l'influence

de la forme urbaine sur le confort des usagers de la ville, l'échelle prise en considération est celle du fragment urbain : l'îlot, la rue, la place, voire le quartier. À cette échelle, les modèles utilisés décrivent les aménagements urbains (bâtiments, arbres isolés, etc.) et modélisent leur impact sur l'ensoleillement, le vent, la température et l'humidité de l'air (Ali-Toudert, 2005 ; Robitu et al., 2006 ; Bouyer, 2009 ; Musy et al., 2014).

Les processus physiques tels que la thermique, l'hydrologie, l'aérodynamique, le rayonnement, utilisés dans l'étude du microclimat urbain ainsi que le comportement thermique des espaces publics et des bâtiments, ne peuvent être pris en considération de manière indépendante les uns des autres (Jojo et al., 2015).

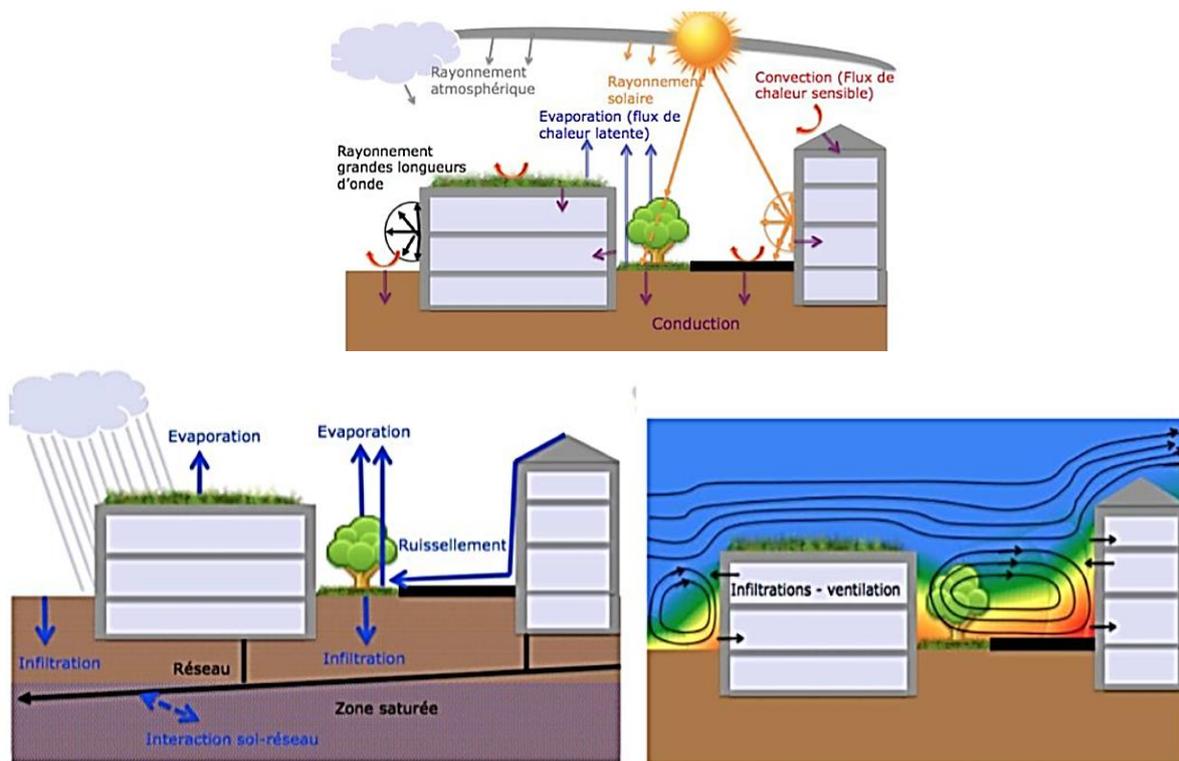
Musy et al. (2014) ont défini trois bilans que les outils de simulation relient (figure 4.1):

- Le bilan hydrique représente les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux enterrés, ainsi que les surfaces et l'atmosphère en période pluvieuse ou sèche. Il prend en considération les caractéristiques de la surface du sol (présence de végétation, imperméabilisation), les propriétés hydrodynamiques des sols (conductivité hydraulique), ainsi que la présence de réseaux enterrés qui sont des lieux de drainage dans le sol.
- Le bilan énergétique désigne l'équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente qui dépend du bilan hydrique, le flux de chaleur sensible lié à l'échange par convection au niveau des surfaces, et le flux de chaleur par conduction à travers l'enveloppe des bâtiments et dans les sols.
- Le bilan thermique du bâtiment exprime l'équilibre entre les flux de chaleur au niveau des murs et des toits, les charges internes, les apports solaires, les flux liés aux infiltrations de l'air à travers l'enveloppe et à la ventilation. Au niveau des parois, le flux de chaleur sensible dépend des écoulements et de la température de l'air à côté de la paroi.

En s'appuyant sur ces bilans, Musy et al. (2014) ont identifié quatre grandes familles de modèles : les modèles de bilan radiatif, les modèles hydrologiques, les modèles aérauliques et les modèles de bilan thermique. Ces modèles représentent les interactions physiques de deux manières différentes : soit en les intégrant directement dans les modèles initialement spécialisés dans un bilan, soit en effectuant des couplages entre modèles spécialisés.

Plusieurs programmes et logiciels permettent de représenter graphiquement la morphologie d'une ville. Certains de ces logiciels utilisent des données climatiques comme entrée pour effectuer plusieurs types d'analyses. Parmi ces logiciels, on trouve Solène-microclimat, ENVI-

met 4 et TEB (Town energy balance), qui se caractérisent par un degré de précision élevé et prennent en compte un grand nombre de contraintes climatiques dans leurs simulations.



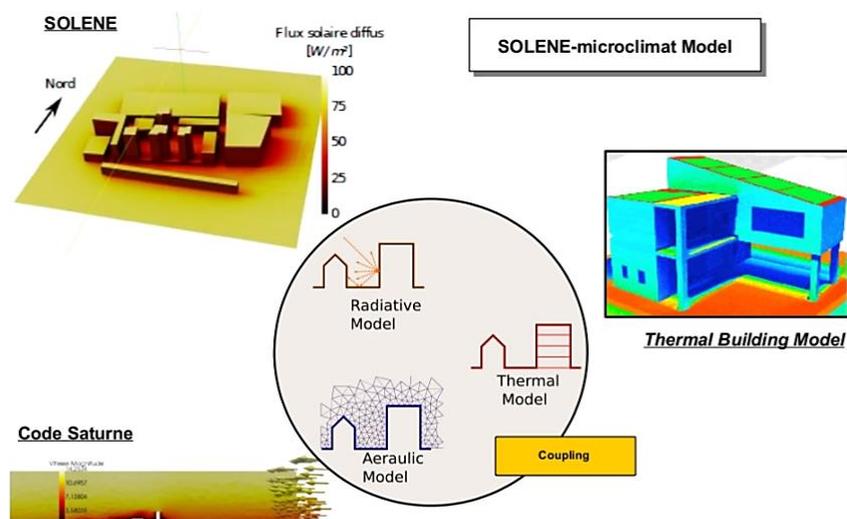
**Figure 4.1** : En haut, Bilan thermo-radiatif (Musy et al. 2014) ; à gauche, Bilan hydrique (Musy et al. 2014) ; à droite, Processus aérauliques (Musy et al. 2014). Source : Jojo et al., 2015.

#### 4.1.1 Solène-microclimat

Le logiciel de simulation du microclimat urbain Solène-microclimat a été développé par des chercheurs et des ingénieurs du laboratoire CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture) de Nantes depuis les années 1990. Il permet la modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier et présente plusieurs points forts, notamment la capacité à traiter les géométries urbaines réelles plutôt que simplement des formes prises dans une grille (Fahed, 2019).

Ce logiciel est basé sur un couplage entre un outil de calcul d'ensoleillement (SOLENE), un modèle de thermique du bâtiment, des modèles de paroi et un outil de mécanique des fluides numériques (CFD) Code\_Saturne (Morille, 2018) (figure 4.2). Il se caractérise par des calculs avec une résolution très fine (de l'ordre du  $m^2$ ) des différents paramètres climatiques tels que la température de surface, la température de l'air, l'humidité, l'ensoleillement, etc. En outre, ce

logiciel prend également en compte l'inertie thermique des parois dans la simulation (Fahed, 2019).



**Figure 4.2 :** couplage d’outil de simulation numérique du climat urbain réalisé par SOLENE-microclimat. Source : Morille, 2018.

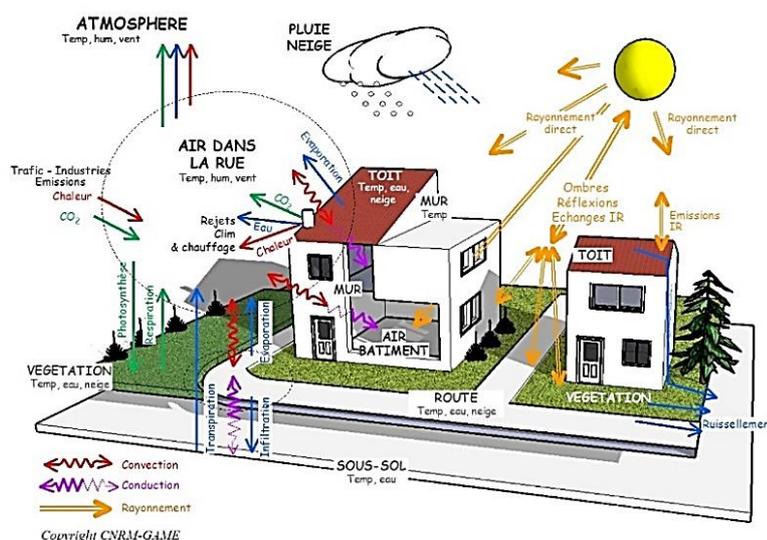
Solène-microclimat permet de calculer le flux solaire total en prenant en compte le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Les calculs d'ensoleillement prennent également en compte les albédos des surfaces et les réflexions solaires entre les différentes surfaces urbaines (Morille, 2018). Ce logiciel contient des modèles de végétation représentant les façades et toitures végétalisées, les arbres et les surfaces enherbées. À partir de ces modèles, il est possible d'estimer la capacité de la végétation à rafraîchir les espaces urbains, atténuer les îlots de chaleur urbains, réduire la consommation énergétique des bâtiments et également évaluer la consommation en eau des végétaux. Plusieurs thèses de doctorat ont utilisé ce logiciel pour effectuer des simulations du microclimat urbain, notamment celles de (Bozonnet, 2005), (Bouyer, 2009), (Athamena, 2012) et (Azam, 2021).

Cependant, à l'échelle urbaine, le bilan hydrique n'est pas intégré dans le bilan énergétique, ce qui représente un inconvénient pour Solène-microclimat. Le logiciel ne considère que l'effet énergétique de l'évapotranspiration à l'échelle du bâtiment.

### 4.1.2 TEB – SURFEX

Le modèle TEB (Town Energy Budget) a été développé par Météo France vers la fin des années 1990 (Masson, 2000). Il permet d'étudier les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère (figure 4.3). Initialement, son objectif était de simuler les îlots de chaleur urbains à l'échelle kilométrique, ainsi que l'impact des surfaces urbanisées sur la structure verticale de la couche limite atmosphérique (De Munk, 2013). TEB permet également de simuler les consommations énergétiques pour le chauffage et la climatisation des bâtiments ainsi que l'indice de confort humain (Fahed, 2019). Le modèle est intégré dans le système de modélisation SURFEX (surface externalisée). Le schéma physique du modèle est basé sur une approche du type "rue canyon" longue et sans intersection (De Munk, 2013). Il représente une zone urbaine homogène par un canyon composé d'une surface au sol limitée par deux bâtiments à toit plat de même hauteur (De Munk, 2013).

La géométrie exacte des bâtiments n'est pas reproduite dans TEB ; il est seulement nécessaire de spécifier la largeur et la hauteur des bâtiments ainsi que la largeur des rues de la ville étudiée (Fahed, 2019).



**Figure 4.3** : Echange d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère dans TEB. Source : Fahed, 2019.

### 4.1.3 ENVI-MET

Le programme tridimensionnel ENVI-met est considéré comme l'un des rares programmes capables de réaliser des simulations climatiques à l'échelle urbaine. Il a été développé en 1995 par M. Bruse à l'Université de la Ruhr à Bochum en Allemagne. Le logiciel a la capacité de traiter tous les aspects thermodynamiques (tels que les échanges entre les surfaces du sol et les murs des bâtiments) et aérodynamiques du microclimat urbain (comme l'écoulement de l'air entre les bâtiments), tout en tenant compte des effets de la végétation (Bruse et Fleer, 1998 ; Huttner, 2012). Cela constitue un avantage, car la plupart des autres logiciels actuellement utilisés pour

la simulation du microclimat urbain se concentrent sur l'étude d'un seul aspect et ne couvrent pas l'ensemble des aspects du microclimat (Jojo et al., 2015).

ENVI-met est composé des modèles suivants (Jojo et al., 2015) :

- un modèle atmosphérique,
- un modèle de surface,
- un modèle de sol,
- et un modèle de végétation.

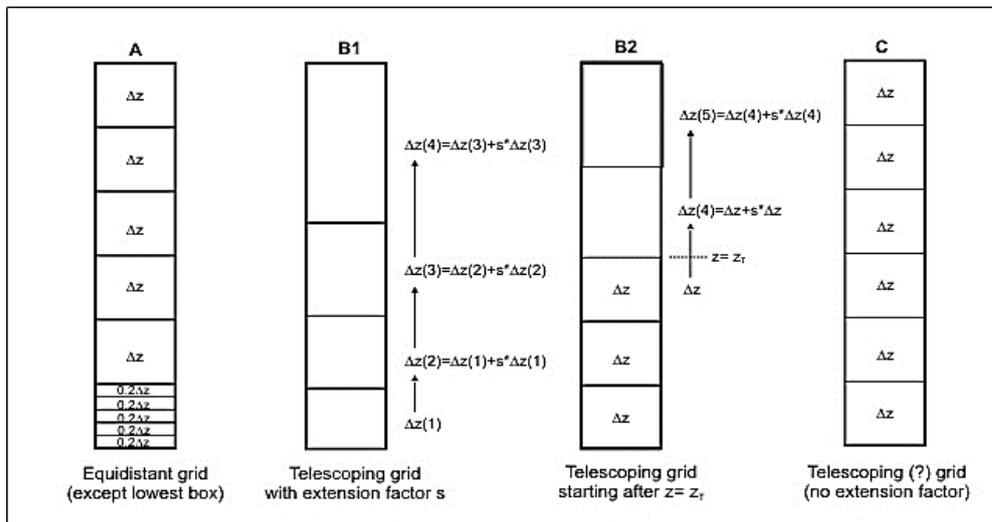
ENVI-met est reconnu pour ses capacités à fournir des résultats précis à grande échelle, allant du canyon de rue au quartier urbain. Cela distingue ce logiciel des autres qui sont entièrement consacrés à l'étude du bâtiment ou de la ville à petite échelle. Il est caractérisé par une résolution spatiale variant de 0,5 à 10 mètres et un pas de temps allant de 1 à 10 secondes (Maleki et al., 2014).

La figure 4.4 représente les trois types de mailles utilisées dans le domaine 3D d'ENVI-met sur toute l'étendue verticale (Torres, 2014) :

Le maillage équidistant (A) : la dimension  $\Delta z$  est la même sur toute la hauteur, sauf pour la première maille qui est subdivisée en cinq mailles de dimensions égales ( $0,2\Delta z$ ). Ce type de maillage est utilisé lorsque la hauteur est limitée et si les processus ont le même intérêt à toutes les hauteurs.

Les maillages télescopiques (B1, B2) : la valeur de  $\Delta z$  augmente avec la hauteur. Ces maillages permettent de travailler avec une hauteur importante sans avoir besoin d'utiliser un grand nombre de mailles.

Le maillage télescopique (C) : il permet de travailler avec un maillage sans subdivision de la première maille.



**Figure 4.4** : Maillage vertical du domaine 3D d'ENVI-met. Source : Torres, 2014.

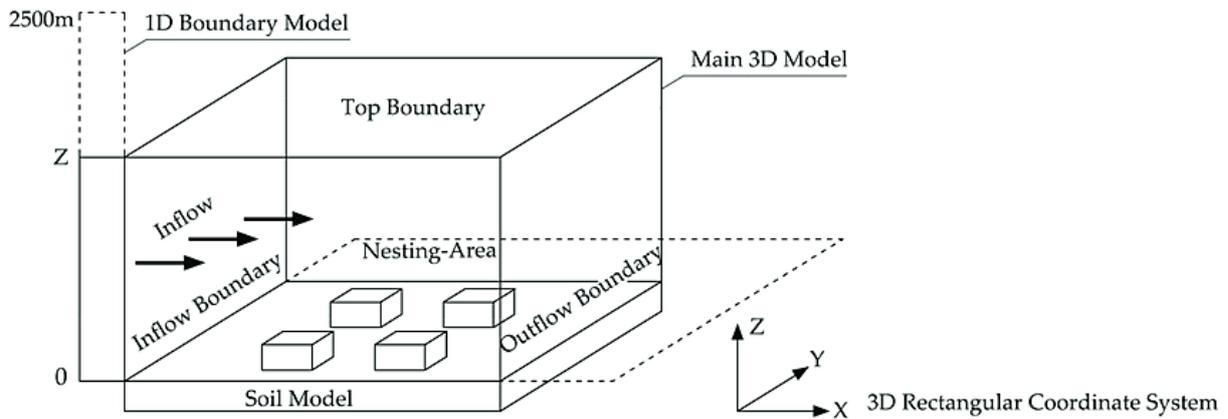
Le modèle ENVI-met est formé principalement par les systèmes suivants : le sol, la végétation, l'atmosphère et le bâtiment (Fahed, 2019). Pour chaque cellule de la grille, le modèle permet la simulation de différents types de sol ; pour les sols naturels les transferts de chaleur et de vapeur d'eau sont pris en considération dans la simulation, cependant pour les sols minéralisés seul le transfert de chaleur est pris en compte (Fahed, 2019). La température de surface de sol est calculée par le modèle à travers le flux radiatif net, le flux turbulent de chaleur et de vapeur, et la conduction de chaleur dans le sol. La turbulence et le champ d'écoulement aérodynamique sont évalués à partir des équations de Navier-Stocks et le modèle de turbulence (E - ε).

La végétation est traitée comme un obstacle poreux au vent et au rayonnement solaire. De plus, les processus physiologiques d'évapotranspiration et de photosynthèse sont pris en compte, et différents types de végétation aux propriétés spécifiques peuvent être utilisés. De plus, ENVI-met prend en compte l'ombre portée des arbres et le coefficient d'atténuation des rayonnements solaires lié à la densité de la surface des feuilles (Fahed, 2019).

Le sol est également considéré comme un volume composé de plusieurs couches qui peuvent être de différentes natures. En fonction de la quantité d'eau dans la couche supérieure du sol et de l'angle solaire incident, le modèle détermine l'albédo du sol naturel.

Les principales données d'entrée du modèle sont : les structures et les propriétés des surfaces de sol, de la végétation et des bâtiments, les données météorologiques ainsi que les profils d'humidité et de température initiale du sol.

Le modèle ENVI-met est composé d'un modèle de limite unidimensionnel (1D), d'un modèle 3D principal et d'un modèle de sol, comme le montre la figure 4.5. Le modèle 3D principal est imbriqué dans un modèle de limite 1D qui s'étend jusqu'à 2500 m de hauteur (Jin et al., 2017).



**Figure 4.5** : Disposition de base du modèle ENVI-met. Source : Jin et al., 2017.

## 4.2 Les propriétés du modèle physique d'ENVI-met

Les variables principales calculées par ENVI-met sont (Huttner, 2012) :

- La vitesse et la direction du vent
- La température et l'humidité de l'air
- La température et l'humidité du sol
- La turbulence
- Les flux radiatifs
- La dispersion des gaz et des particules dans l'environnement

La figure 4.6 illustre les sous-modèles utilisés pour le calcul de ces variables.

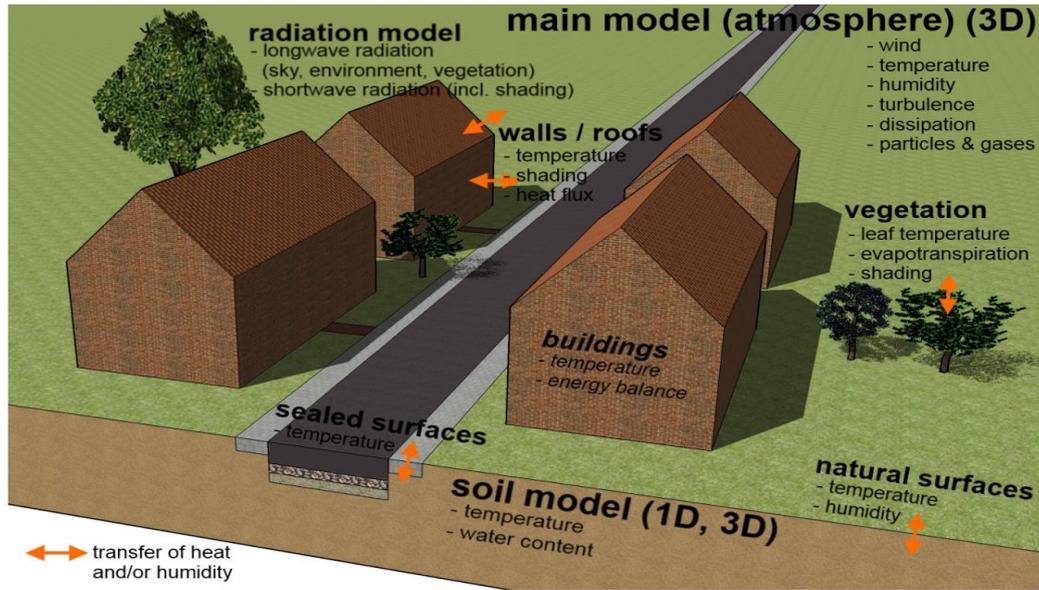
### 4.2.1 Les équations du flux de vent

La modélisation de l'évolution temporelle et spatiale de la vitesse et de la direction du vent d'ENVI-met est basée sur les équations tridimensionnelles non hydrostatiques de Navier-Stokes :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_3 \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w \quad (4.3)$$



**Figure 4.6** : Schéma montrant les sous-modèles d'ENVI-met. Source : Huttner, 2012.

Ou  $u_1$ ,  $u_2$  et  $u_3$  ( $ms^{-1}$ ) sont la vitesse du vent dans les directions x, y et z. Selon Bruse et Fler (1998)  $p'$  représente la pression (local pressure perturbation). La force de frottement est définie comme  $\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right)$ , elle est multipliée par  $K_m$  qui est le coefficient d'échange local (équation 4.1, 4.2, 4.3). Le frottement causé par les obstacles semi-perméables comme la végétation est représenté par les termes  $S_u$ ,  $S_v$  et  $S_w$ .

$\theta(z)$  est la température potentielle au niveau  $z$  et  $\theta_{ref}(z)$  représente la température de référence qui est la moyenne des températures des cellules de la grille à un niveau  $z$  sauf celles des bâtiments. L'air est traité comme un fluide incompressible, une équation de continuité supplémentaire est définie comme :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

### 4.2.2 Température et humidité

Le calcul de la température potentielle  $\theta$  et l'humidité  $q$  est effectué par ENVI-met à partir de l'équation mixte d'advection-diffusion (Huttner, 2012 ; Fahed, 2019) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p p} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z} + Q_\theta \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q \quad (4.6)$$

L'échange de chaleur entre la végétation et l'air est défini par  $Q_\theta$ . Cependant, l'échange d'humidité entre la végétation et l'air atmosphérique est représenté par  $Q_q$ .

Le terme  $\frac{1}{c_p p} \frac{\partial R_{lw}}{\partial z}$  exprime le changement de la température de l'air due à la divergence des radiations à grandes longueurs d'onde (Huttner, 2012 ; Fahed, 2019). Le coefficient d'échange d'humidité et de chaleur en régime permanent est représenté respectivement par  $K_q$  et  $K_h$ . ENVI-met ne simule pas la phase de transformation entre l'eau et la vapeur d'eau et vice versa. Cela signifie que l'humidité relative est toujours inférieure à 100 % (Huttner, 2012).

### 4.2.3 La turbulence atmosphérique

ENVI-met se base dans la modélisation de la turbulence sur le modèle de turbulence d'ordre 1.5 (1.5 order turbulence closure model) basé sur les travaux de Mellor et Yamada (1975), et ajoute deux équations supplémentaires pour la turbulence ( $K$ ) et sa dissipation ( $\varepsilon$ ) (Huttner, 2012) :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = K_k \left( \frac{\partial^2 k}{\partial x_i^2} \right) + P_r - T_h + Q_K - \varepsilon \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = K_\varepsilon \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{k} P_r - C_3 \frac{\varepsilon}{K} T_h - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} + Q_\varepsilon \quad (4.8)$$

Les termes  $P_r$  et  $T_h$  décrivent respectivement la production et la dissipation d'énergie turbulente due au vent et à la stratification thermique (Ridha, 2017).  $Q_k$  et  $Q_\varepsilon$  représentent respectivement les termes sources locales de production et de dissipation de turbulence causés par les végétations.

#### 4.2.4 Flux de chaleur radiatifs

La présence de la végétation et des bâtiments modifie les flux radiatifs initiaux à courtes et à grandes longueurs d'ondes arrivant à une cellule de la grille dans le modèle tridimensionnel ENVI-met (Fahed, 2019). Cinq coefficients appelés coefficients de réduction des flux ( $\sigma$ ) sont définis par Bruse (1995) et leurs valeurs varient entre 0 et 1. Lorsque la valeur est nulle, le flux est totalement absorbé avant d'arriver à la cellule étudiée. Cependant, la valeur 1 indique que le flux initial n'a pas été influencé par la présence des bâtiments et de la végétation (Fahed, 2019). Les cinq coefficients sont :

$$\sigma_{sw,dir}(z) = \exp(F \cdot LAI^*(z)) \quad (4.9)$$

$$\sigma_{sw,dir}(z) = \exp(F \cdot LAI(z, z_p)) \quad (4.10)$$

$$\sigma_{\downarrow w}(z, z_p) = \exp(F \cdot LAI(z, z_p)) \quad (4.11)$$

$$\sigma_{\uparrow w}(0, z) = \exp(F \cdot LAI(0, z)) \quad (4.12)$$

$$\sigma_{svf}(Z) = 1/360 \sum_{\pi=0}^{360} \cos\lambda(\pi) \quad (4.13)$$

Les équations (4.9) et (4.10) indiquent les coefficients qui décrivent l'influence de la végétation sur les radiations à courtes longueurs d'ondes, alors que les équations (4.11) et (4.12) correspondent aux flux à grandes longueurs d'ondes. Le coefficient ( $\sigma_{svf}$ ) représenté par l'équation (4.13) est lié au facteur de vue de ciel, il varie de 1 (ciel totalement visible) à 0 (ciel totalement obstrué)  $\lambda$  est l'angle solide maximal dans la direction  $\pi$  (Bruse et Fleer, 1998 ; Ridha, 2017 ; Fahed, 2019).

$LAI$  désigne l'indice vertical monodimensionnel qui correspond à la surface des feuilles des arbres pour une hauteur  $z$  de la plante et de la forme (Fahed, 2019) :

$$LAI(z, z + \Delta z) = \int_{z'}^{z'+\Delta z} LAD(z') dz' \quad (4.14)$$

Le flux solaire total correspondant aux courtes longueurs d'ondes peut être résumé comme :

$$Q_{sw}(z) = \sigma_{sw,dir}(z) + \sigma_{sw,dif}(z)\sigma_{svf}(Z)Q_{sw,dif}^0 + (1-\sigma_{svf}(z))Q_{sw,dir}^0 \cdot \bar{\alpha} \quad (4.15)$$

Où  $Q_{sw,dir}^0$  est le flux solaire direct initial à courtes longueurs d'ondes. Le terme  $\bar{\alpha}$  désigne l'albedo moyen de tous les murs du modèle (Fahed, 2019).

Les flux de rayonnement à ondes longues peuvent être exprimés comme le décrit Ridha (2017):

$$Q_{lw}^{\downarrow}(z) = Q_{lw}^{\downarrow}(z, z_p)Q_{l,w}^{\downarrow,0} + (1 - \sigma_{lw(0,z)}^{\downarrow})\epsilon_f \sigma B \bar{T}_f^4 + (1 - \sigma_{svf}(z))Q_{lw}^{\leftrightarrow} \quad (4.16)$$

$$Q_{lw}^{\uparrow}(z) = \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z)\epsilon_s \sigma B T_0^4 + (1 - \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z))\epsilon_f \sigma f \bar{T}_{f-}^4 \quad (4.17)$$

$\bar{T}_f^4$  et  $\bar{T}_{f-}^4$  sont la température moyenne de la couche végétale au-dessus de  $z$  (+) et au-dessous de  $z$  (-).

$\epsilon_s$  et  $\epsilon_f$  sont l'émissivité du sol, des murs et du feuillage.

$T_0$  : est la température surfacique du sol.

$Q_{lw}$  : est le flux de rayonnement à ondes longues horizontal des murs environnants.

$\sigma_B$  : est la constante de Stefan-Boltzmann.  $\sigma_B = 5.67.10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ .

#### 4.2.5 Le modèle du sol

ENVI-met calcule la température et l'humidité du sol jusqu'à une profondeur de 1,75 m (Huttner, 2012). Chaque cellule de la grille horizontale a un profil de sol avec 14 couches qui diffèrent en profondeur. La profondeur des couches simples augmente de haut en bas : les couches supérieures ont une épaisseur de seulement 1 cm, cependant la couche la plus basse a une épaisseur de 50 cm (Huttner, 2012).

La température  $T_s$  et l'humidité  $\eta$  du sol sont modélisées selon les équations monodimensionnelles suivantes :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z) \quad (4.19)$$

Ou  $k_s$  représente la diffusivité thermique,  $D_\eta$  désigne la diffusivité hydraulique et  $K_\eta$  la conductivité hydraulique du sol (Fahed, 2019).  $S_\eta$  Est la source additionnelle d'humidité provoqués par les racines des plantes (Fahed, 2019).

#### 4.2.6 Le modèle de la végétation

La végétation dans ENVI-met interagit avec les modèles atmosphériques du sol du rayonnement. Les plantes dans ENVI-met 3.1 sont modélisées sous forme de colonnes de

végétation. Une base de données définit la hauteur de la plante  $z_p$  et la densité de surface foliaire LAD (Leaf Area Density) en dix couches (Huttner, 2012).

L'interaction entre la végétation et l'atmosphère s'exprime par les équations :

$$J_{f,h} = 1.1r_a^{-1}(T_f - T_a) \quad (4.20)$$

$$J_{f,evap} = r_a^{-1}\Delta_q\delta_c f_w + r_a^{-1}(1 - \delta_c)\Delta_q \quad (4.21)$$

$$J_{f,trans} = \delta_c(r_a + r_s)^{-1}(1 - f_w)\Delta_q \quad (4.22)$$

Selon Huttner (2012),  $T_a$  est la température de l'air,  $T_f$  est la température du feuillage,  $q_a$  l'humidité spécifique de l'air et  $\Delta_q$  est la différence d'humidité :  $\Delta_q = q^*T_a - q_a$ .  $q^*$  est la valeur de saturation de  $q$  à la surface de la feuille.  $\delta_c$  définit si l'évapotranspiration est possible ( $\delta_c = 1$ ) ou non ( $\delta_c = 0$ ).  $r_a$  est la résistance aérodynamique qui est une fonction du diamètre de la feuille  $D$  et de la vitesse du vent  $W$  (Braden, 1982) :

$$r_a = A \sqrt{\frac{D}{W}} \quad (4.23)$$

Le paramètre  $A$  est lié au type des plantes : pour les conifères  $A = 87s^{0.5}m^{-1}$ , par contre pour les herbes et les arbres feuillus  $A = 200s^{0.5}m^{-1}$ .  $D$  est le diamètre moyen de la feuille (Huttner, 2012).

Les stomates sont des facteurs importants régulant l'évapotranspiration des plantes ; ce sont de petites ouvertures dans les feuilles qui permettent l'échange de gaz entre l'air et la feuille. La résistance stomatique  $r_s$  est une mesure du degré d'ouverture des stomates, elle s'exprime en fonction de la conductance stomatique  $g_s$  (Fahed, 2019) :

$$r_s = \frac{1}{g_s} \cdot 1000 \quad (4.24)$$

$$g_s = 1.6 \frac{A_n}{C_s - C_i} \quad (4.25)$$

Avec  $C_s$  et  $C_i$  comme respectivement les concentrations de  $CO_2$  à la surface et à l'intérieur de la feuille.  $A_n$  définit le taux de photosynthèse.

#### 4.2.7 Le modèle de surface du sol

Huttner (2012) indique que la température de la surface du sol  $T_0$  est calculée à partir du bilan énergétique au niveau du sol (Huttner, 2012 ; Ridha, 2017 ; Fahed, 2019) :

$$Q_{cl,net} + Q_{gl,net}(T_0) - G(T_0) - H(T_0) - LE(T_0, q_0) = 0 \quad (4.26)$$

Ou  $Q_{cl,net}$  représente le flux radiatif à courte longueur d'onde au niveau de la surface du sol,  $Q_{gl,net}(T_0)$  est le flux radiatif à grande longueur d'onde au niveau de la surface.  $G(T_0)$  est défini comme étant le flux de chaleur du sol. Le  $H(T_0)$  est le flux turbulent de chaleur sensible et  $(T_0, q_0)$  représente le flux turbulent de chaleur latente (Fahed, 2019).

$Q_{cl,et}$  peut être calculé par l'équation suivante (Huttner, 2012 ; Ridha, 2017 ; Fahed, 2019) :

$$Q_{cl,net} = \left( Q_{cl,dir}(z = 0) \cos \beta + Q_{cl,diff}(z = 0) \right) \cdot (1 - a_s) \quad (4.27)$$

$\beta$  est l'angle entre le rayonnement solaire direct et la surface (loi du cosinus de Lambert) (Huttner, 2012),  $a_s$  est l'albédo de la surface.

$Q_{gl,et}$  est déterminé comme étant l'ensemble des flux cachés par les bâtiments et les végétations, et ceux non cachés, il dépend des couches végétalisées, des rayonnements des bâtiments et des surfaces (Fahed, 2019):

$$Q_{gl,net}(T_0) = \sigma_{svf} Q_{gl,net}^{non\ caché}(T_0) + (1 - \sigma_{svf}) Q_{lw,net}^{caché}(T_0) \quad (4.28)$$

$$Q_{gl,net}^{non\ caché}(T_0) = \sigma_{gl}^{\downarrow}(0, z_p) (Q_{gl}^{\downarrow,0} - \varepsilon_s \sigma T_0^4) + \left( 1 - \sigma_{gl}^{\downarrow}(0, z_p) \right) \frac{\varepsilon_v \varepsilon_s}{\varepsilon_w + \varepsilon_s - \varepsilon_w \varepsilon_s} (\sigma \bar{T}_v^4 - \sigma \bar{T}_0^4) \quad (4.29)$$

$$Q_{lw,net}^{caché}(T_0) = \frac{\varepsilon_w \varepsilon_s}{\varepsilon_w + \varepsilon_s - \varepsilon_w \varepsilon_s} (\max(\sigma \bar{T}_w^4, \sigma \bar{T}_0^4) - \sigma \bar{T}_0^4) \quad (4.30)$$

$T_v$  est la température surfacique des végétaux et  $T_w$  est la température surfacique des murs.

$S_s$ ,  $S_w$  et  $S_v$  désignent respectivement les émissivités des surfaces, des murs et des végétations.

$(T_0)$  qui est le flux de chaleur du sol s'exprime (Fahed, 2019) :

$$G(T_0) = \lambda_s (K = 1) \frac{T_0 - T_{K=-1}}{0.5 \Delta z_{K=-1}} \quad (4.31)$$

Les flux  $(T_0)$  et  $l(T_0, q_0)$  sont respectivement liés aux coefficients d'échange  $K_h$  et  $K_q$  (Fahed, 2019) :

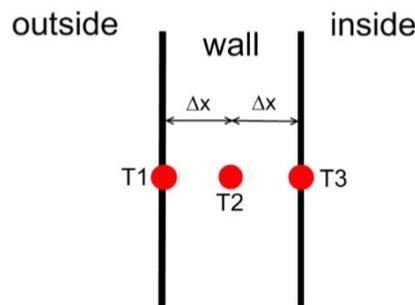
$$H(T_0) = pc_p K_h^0 \frac{T_0 - \theta_{k=1}}{0.5 \Delta Z_{k=1}} \quad (4.32)$$

$$LE(T_0, q_0) = \rho L(T_0) K_q^0 \frac{q_0 - q_{k=1}}{0.5 \Delta Z_{k=1}} \quad (4.33)$$

Avec  $L(T_0) = (2.501 - 0.00237 (T_0 - 273.15)). 10^6$

#### 4.2.8 La température des surfaces des bâtiments

La version d'ENVI-met 4.0 est caractérisée par un nouveau modèle de calcul de la température des façades et des toitures par rapport à l'ancienne version (Fahed, 2019). Ce nouveau modèle est appelé le « modèle des 3 nœuds » (Huttner, 2012) (figure 4.7). Il est basé sur les travaux de Terjung et O'Rourke (1980) et permet le calcul énergétique en régime transitoire (Fahed, 2019). L'émissivité, l'absorption, la réflectivité, la transmission, la capacité calorifique spécifique, le coefficient de transfert de chaleur et l'épaisseur du mur sont Les propriétés physiques qui sont prises en considération dans le calcul de ce nouveau modèle (Fahed, 2019).



**Figure 4.7** : Schéma du nouveau « modèle des 3 nœuds ». Source : Huttner, 2012.

Le bilan énergétique de la surface extérieure de la façade au point T1, peut être écrit comme :

$$Q_{cl,net}^{abs} + Q_{gl,net}^{abs} - \varepsilon \sigma T_1^{*4} + h_{c,o} (T_{air} - T_1^*) + \frac{\lambda}{\Delta x} (T_2^* - T_1^*) = \frac{c_w \rho_w \Delta x}{2 \Delta t} (T_1^* - T_1) \quad (4.34)$$

Avec  $h_{c,o}$  le coefficient de convection du mur extérieur  $[W/m^2K]$ ,  $Q_{cl,net}^{abs}$  et  $Q_{gl,net}^{abs}$  représente respectivement les flux à courtes et à grandes longueurs d'ondes,  $\lambda$  est la conductivité thermique  $[W/mK]$ ,  $\Delta x$  est la distance qui sépare deux nœuds  $[m]$ ,  $c_w$  étant la

capacité calorifique du mur  $[J/(KgK)]$ ,  $T_n$  est la température au nœud n à un instant t,  $T_n^*$  illustre la température au nœud n pour le pas du temps suivant (Fahed, 2019).

Le coefficient de convection thermique  $h_{c,0}$  est calculé selon la norme allemande DIN 6946 (DIN, 2005) comme  $h_{c,0} = 4 + 4v$ , avec v étant la vitesse du vent  $[ms^{-1}]$  devant l'élément mur/toit (Huttner, 2012).

Avec l'équation de Fourier :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{c_w \rho_w} \frac{\delta^2 T}{\delta X^2} \quad (4.35)$$

Les flux de chaleur au nœud T2 situé au centre de la paroi se résument à (Huttner, 2012) :

$$(P + 2)T_2^* - T_3^* = PT_2 + T_1^* \quad (4.36)$$

Avec  $P = \frac{\Delta x^2 c_w \rho_w}{\lambda \Delta t}$  Pour le nœud T3 à l'intérieur du mur, le bilan énergétique est :

$$-T_2^* + \left( \frac{P}{2} + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} + 1 \right) T_3^* = \frac{P}{2} T_3 + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i \quad (4.37)$$

$T_i$  est la température de l'air à l'intérieur du bâtiment, et  $h_{c,i}$  est le coefficient de convection du mur intérieur avec une valeur de  $7.7 W/(m^2K)$  (DIN, 2005).

L'équation (4.37) peut être écrite comme :

$$T_3^* = \left( T_2^* + \frac{P}{2} T_3 + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i \right) R \quad (4.38)$$

Avec  $R = \left( \frac{P}{2} + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} + 1 \right)^{-1}$

L'équation (4.38) peut alors être insérée dans l'équation (4.36) :

$$T_2^* = \left( PT_2 + T_1^* + \frac{P}{2} T_3 R + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i R \right) \frac{1}{P+2-R} \quad (4.39)$$

Et finalement l'équation (4.39) est insérée dans l'équation (4.34) :

$$\begin{aligned} \varepsilon \sigma T_1^{*4} + T_1^* \left( h_{c,o} + \frac{\lambda}{\Delta x} \left( 1 - \frac{1}{P+2-R} \right) + \frac{c_w \rho_w \Delta x}{2 \Delta t} \right) &= Q_{cl,net}^{abs} + Q_{gl,net}^{abs} + h_{c,o} T_{air} + \\ \frac{c_w \rho_w \Delta x}{2 \Delta t} T_1 + \frac{\lambda}{\Delta x (P+2-R)} \left( PT_2 + \frac{P}{2} T_3 R + \frac{h_{c,i} \Delta x}{\lambda} T_i R \right) & \end{aligned} \quad (4.40)$$

L'équation (4.40) est ensuite résolue en appliquant la méthode de Newton.  $T_3^*$  et  $T_2^*$  peuvent alors être directement calculées via les équations (4.38) et (4.39) (Huttner, 2012).

### 4.2.9 Modèle des gaz et des particules

ENVI-met simule la dispersion des gaz et des particules en se basant sur l'équation standard d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial x}{\partial t} + u \frac{\partial x}{\partial x} + v \frac{\partial x}{\partial y} + w \frac{\partial x}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_x \frac{\partial x}{\partial z} \right) + Q_x(x, y, z) + S_x(x, y, z) \quad (4.41)$$

Où  $x$  est la composante de la particule étudiée, elle est exprimée en ( $mg \cdot kg^{-1}$ ),  $Q_x$  et  $S_x$  sont les termes sources et puits (Fahed, 2019).

ENVI-met permet à l'utilisateur de placer différents types de sources de gaz/particules dans toute la zone du modèle.

Les quatre types de sources de base sont (Huttner, 2012 ; Fahed, 2019) :

- Source ponctuelle ( $mg s^{-1}$ ) :  $q^* = q_p$
- Source ligne ( $mg s^{-1} \cdot m^{-1}$ ) :  $q^* = q_l \cdot \Delta x, y$
- Source surfacique ( $mg s^{-1} \cdot m^{-2}$ ) :  $q^* = q_a \cdot \Delta x \Delta y$
- Source volumique ( $mg s^{-1} \cdot m^{-3}$ ) :  $q^* = q_a \cdot \Delta x \Delta y \Delta z$

Le terme source  $Q_x$  s'écrit comme :

$$Q_x = \frac{q^*}{\Delta x \Delta y \Delta z \cdot \rho}$$

(4.42)

Le terme  $S_x$  dépend de trois composantes (Fahed, 2019) :

- La sédimentation par gravité et déposition sur les surfaces, il n'est pas applicable pour les gaz mais pour les particules.
- La déposition sur la surface des feuilles des plantes.
- Et les transformations chimiques.

### 4.2.10 Fontaines et sprays d'eau

L'évaporation des gouttelettes d'eau injectées dans l'air par les fontaines et les brumisateurs d'eau crée un effet de refroidissement. Les gouttelettes qui ne sont pas évaporées sont déplacées par le vent et subissent un « processus de dépôt » (Fahed, 2019).

$N_D$  est le nombre de gouttelettes dans un volume d'air, il représente la perte d'eau par une diminution du nombre de gouttelettes et s'écrit comme :

$$N_D = \frac{W_D}{0.001 \cdot m_D} \quad (4.43)$$

$W_D$  [g(eau)/ m<sup>3</sup>(air)] représente la quantité d'eau sous forme de gouttelettes dans un volume d'air donné.  $m_D$  (mg) est la masse d'une gouttelette d'eau qui dépend du rayon  $r_D$  (μm) de la gouttelette, elle est calculée comme (Fahed, 2019) :

$$m_D = \rho_{eau} \cdot V_D = \rho_{eau} \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_D^3 \quad (4.44)$$

En réalité, le diamètre initial  $D$  de la gouttelette diminue au cours du processus d'évaporation. Cependant, cette approche nécessite des ressources de calcul et un temps de calcul non acceptables dans la modélisation d'ENVI-met. Pour simplifier la modélisation de l'évaporation des gouttelettes, ENVI-met ne change pas la taille des gouttelettes, mais conserve un diamètre constant. La quantité de gouttelettes est ajustée pour prendre en compte la quantité d'eau évaporée (Bruse, 2017 ; Fahed, 2019).

La modélisation de la concentration des gouttelettes d'eau est réalisée par l'équation :

$$\frac{\partial w_D}{\partial t} + u_i \frac{\partial w_D}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_q \frac{\partial w_D}{\partial x_i} \right) + Q_{wD}(x, y, z) + S_{wD}(x, y, z) \quad (4.45)$$

La température de la gouttelette  $T_D$  est calculée à l'aide de l'équation de la conservation d'énergie :

$$L(T_D) \frac{\partial w_D}{\partial t} = A \cdot K(T_D - T_A) + Q_{kw} + A \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_D^4 - T_{env}^4) \quad (4.46)$$

$A$  est la surface de la gouttelette  $A = 4\pi r_D^2$ .  $K$  représente le coefficient d'échange de la chaleur sensible entre la gouttelette d'eau et l'air (Fahed, 2019).  $T_{env}^4$  est liée aux flux radiatifs de grandes longueurs d'ondes.

Le changement de la masse d'une gouttelette d'eau par seconde est calculé par :

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} = -4\pi r \cdot f_v \cdot D_v \cdot \frac{\Delta e}{\left(1 - \frac{\bar{e}}{p}\right) \cdot R_v \cdot \bar{T}} \quad (4.47)$$

$R_v$  représente la constante de gaz de la vapeur d'eau, elle est égale à 461.5 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.  $\bar{T}$  est la moyenne entre la température de la gouttelette et l'air  $\bar{T} = 0.5(T_D - T_a)$ , et  $\bar{e}$  correspond à la moyenne de la pression de vapeur entre la gouttelette et l'air  $\bar{e} = 0.5(e_{sat}(T_D) + e_a)$ .  $\Delta e$  est

la différence de la pression de vapeur entre la surface de la gouttelette et l'air environnant (Fahed, 2019).

#### 4.2.11 Le calcul de la température moyenne radiante par ENVI-met

La température moyenne radiante  $T_{mrt}$  permet de globaliser les échanges radiatifs du corps humain avec son environnement en une température (Jung, 2009) (figure 4.8). ENVI-met calcule la température moyenne radiante pour un corps cylindrique (Huttner, 2012 ; Fahed, 2019) :

$$Q_{cl,-diff,in} = 0.5. \left( v_{f_{bldg}} \overline{r_{f_{bldg}}} Q_{cl-dir,ciel} + v_{f_{ciel}} Q_{cl-diff,ciel} \right) + 0.5. (r_{f_{sol}} Q_{cl,sol}) \quad (4.48)$$

$\varepsilon$  Est le coefficient d'émission du corps humain, il est fixé à 0.97. Pour  $a_K$  qui est le coefficient d'absorption des courtes longueurs d'ondes par le corps, il est fixé à 0.7.  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann (Huttner, 2012).

Le flux des radiations à grandes longueurs d'onde est supposé venir à 50% du ciel, des bâtiments et des végétations et 50% des surfaces du sol (Huttner, 2012 ; Fahed, 2019).

$$Q_{gl,in} = 0.5. \left( v_{f_{veg}} \overline{\varepsilon_{veg}} \sigma \overline{T_{veg}}^4 + v_{f_{bldg}} \overline{\varepsilon_{bldg}} \sigma \overline{T_{bldg}}^4 + v_{f_{ciel}} Q_{gl,ciel} + v_{f_{bldg}} (1 - \overline{\sigma_{bldg}}) Q_{gl,ciel} \right) + 0.5. (\sigma \varepsilon_{ground} T_{ground}^4) \quad (4.49)$$

Le facteur de la vue du ciel  $v_f$  est le pourcentage du ciel /végétation/ bâtiments visible du point de la grille. Le flux diffus du rayonnement à courtes longueurs d'ondes est obtenu à partir de l'équation :

$$T_{mrt} = \left( \frac{1}{\sigma} (Q_{gl,in} + \frac{a_K}{\varepsilon} \cdot (Q_{cl-diff,in} + Q_{cl-dir,in})) \right)^{0.25} \quad (4.50)$$

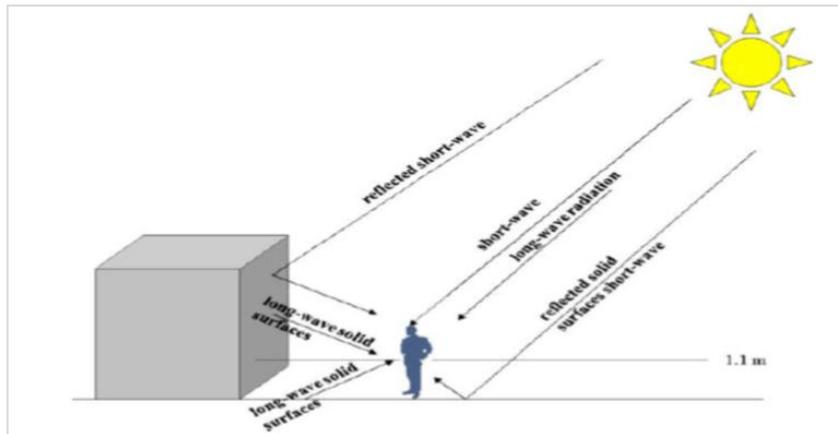
$Q_{gl,in}$  Représente le flux total des rayonnements à courtes longueurs d'ondes sur la cellule de la grille, et  $r_f$  est la réflectivité de la surface de cette cellule.

$Q_{cl-dir,in}$  Représente le flux des rayonnements directs entrants à courtes longueurs d'ondes sur une cellule de la grille, il est déterminé par :

$$Q_{cl-dir,in} = p_f \cdot Q_{cl-dir} \quad (4.51)$$

$p_f$  est le facteur de projection, il dépend de l'angle d'azimut  $\Phi$ , il est calculé par :

$$p_f = 0.42. \cos \Phi + 0.043. \sin \Phi \quad (4.52)$$



**Figure 4.8:** Le flux radiatif déterminant la température moyenne radiante. Source : (Matzarakis et al., 2010).

### 4.3 le concept du forçage dans ENVI-met

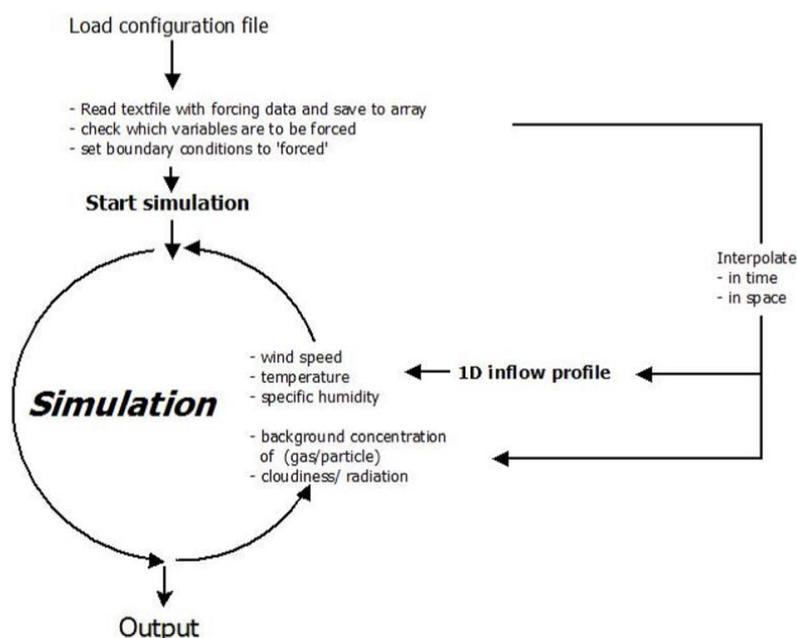
Pour comparer les résultats d'une simulation numérique à des données mesurées sur site ou pour simuler un développement météorologique spécifique, il est nécessaire de "forcer" la simulation en ajustant les variables à l'entrée des limites du modèle. ENVI-met prend en charge une condition aux limites dites "forcée (fermée)" (Huttner, 2012). Avec cette condition aux limites, les valeurs du modèle 1D sont copiées dans les cellules de la grille à l'entrée de la limite du modèle. Le concept de "forçage" dans ENVI-met (Figure 4.9) utilise cette condition aux limites et permet à l'utilisateur de définir l'évolution temporelle et spatiale du modèle 1D (Huttner, 2012).

Bien que la condition aux limites forcée elle-même n'entraîne pas de problèmes d'instabilité numérique due à une rétroaction indésirable de et vers la zone du modèle, les profils 1D définis par l'utilisateur doivent être choisis avec soin : de grands changements dans les variables, en particulier la vitesse et la direction du vent, peuvent facilement provoquer des instabilités numériques. Cependant, ces problèmes peuvent être en partie évités en adaptant les pas de temps pour l'interpolation entre les profils 1D donnés par l'utilisateur ainsi que pour le calcul des variables forcées elles-mêmes (Huttner, 2012).

Depuis la sortie de la version ENVI-met 4, la fonction de forçage simple a permis un meilleur calibrage entre les données simulées et mesurées (Huttner et Bruse, 2009). Cette fonction prend en compte les données d'entrée pour l'initialisation et le calibrage du modèle.

#### 4.4 Concordance entre des résultats de simulation via ENVI-met et des données mesurées in-situ

De nombreux chercheurs tentent de mettre en évidence la précision et l'importance des résultats de leurs travaux de simulation à l'aide d'ENVI-met. Ghaffarianhoseini et al. (2015) ont affirmé que la fiabilité de l'utilisation d'ENVI-met pour simuler la performance thermique des espaces extérieurs a été prouvée dans de nombreuses études. Des recherches ont également indiqué que les données mesurées ou observées aux stations météorologiques locales semblaient être en accord avec les données simulées (Ridha, 2017). En général, les résultats obtenus à partir de ce modèle sont en bon accord avec les mesures sur le terrain (par exemple, Jansson, 2006 ; Bachir et al., 2021).



**Figure 4.9** : Schéma illustrant l'implémentation du forçage des variables climatiques dans ENVI-met. Source : Huttner, 2012

Yu et Hien (2006) sont parvenus à la même conclusion, déclarant que la simulation ENVI-met validait les données mesurées sur le terrain. Monam et Ruckert (2013) ont indiqué que, selon de nombreux chercheurs tels qu'Ali-Toudert (2005) et Ozkeresteci et al. (2003), les résultats d'ENVI-met sont considérés comme plus précis et fiables que ceux des autres logiciels (Ridha, 2017). Selon une étude d'investigation menée par Ozkeresteci et al. (2003) sur l'utilisation expérimentale du modèle ENVI-met pour les villes à parcs linéaires en Arizona, cette étude a conclu qu'ENVI-met peut être utilisé avec succès en tant que partie intégrante du système d'information de la ville. De plus, ils ont conclu que l'utilisation adaptative d'outils innovants

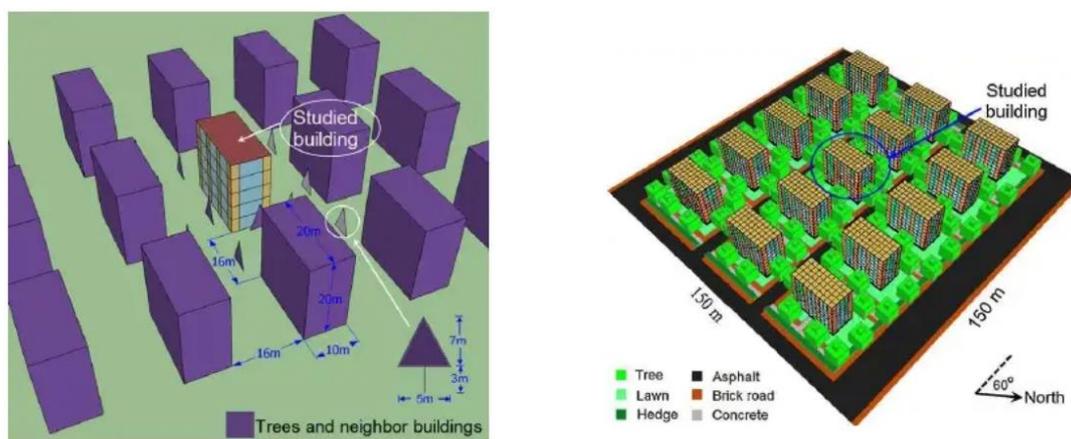
tels que ENVI-met offre une possibilité de progrès pour les systèmes d'information urbains afin de soutenir des environnements durables (Ridha, 2017).

#### 4.5 Recherches sur l'ICU utilisant ENVI-met

Le logiciel ENVI-met a été largement utilisé par de nombreux chercheurs pour évaluer les effets des îlots de chaleur urbains. En 2008, Huttner et al. ont utilisé ENVI-met pour étudier les effets du réchauffement climatique sur le stress thermique dans les villes d'Europe centrale. Ils ont conclu que les espaces verts jouent un rôle crucial dans l'amélioration du confort thermique et ont donc recommandé leur développement. Spangenberg et al. (2008) ont analysé l'impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique dans la ville de São Paulo, au Brésil, en utilisant ENVI-met. Les résultats ont indiqué que le parc public avait un effet de rafraîchissement avec des températures environ 2 °C plus basses que celles des zones environnantes. Les mesures de température de surface ont montré que les surfaces naturelles étaient considérablement plus froides que les surfaces en béton et en asphalte.

Hedquist et al. (2009) ont utilisé ENVI-met et l'outil CFD pour étudier l'ICU nocturne dans la ville de Phoenix en Arizona. Leurs résultats ont montré l'influence des hauteurs des bâtiments et des ombres sur les températures de surface.

Yang et al. (2012) ont simulé la performance énergétique des bâtiments dans diverses conditions climatiques en reliant le modèle de microclimat ENVI-met au programme de simulation énergétique des bâtiments « Energy Plus » (figure 4.10). Leurs résultats ont montré que cette méthode permet de quantifier les différents effets des facteurs des microclimats sur la performance énergétique des bâtiments.



**Figure 4.10** : le modèle « Energy plus » et le modèle ENVI-met utilisés dans l'étude de Yang et al. (2012).

Des études paramétriques explorant différents scénarios de blocs urbains à haute densité et de verdissement ont été menées par Duarte et al (2015) pour étudier l'effet des distributions d'arbres denses sur le microclimat urbain à l'aide de ENVI-met V4. Selon leurs résultats les arbres denses le long du trottoir ont le plus d'effet de refroidissement.

Maleki et Mahdavi (2016) ont utilisé ENVI-met pour simuler les conditions microclimatiques dans une partie de la ville de Vienne. Cette étude s'est concentrée sur l'analyse des effets des propriétés physiques et géométriques de la zone urbaine, notamment les toitures fraîches, les espaces verts et la perméabilité des matériaux de revêtement, sur le microclimat urbain et le confort thermique extérieur. Les résultats suggèrent que les modifications apportées à la canopée urbaine ont été plus efficaces pour influencer les conditions de microclimat que celles mises en œuvre au niveau des toits. L'augmentation de la quantité de végétation et de chaussées perméables peut abaisser la température de l'air jusqu'à 3 °C.

En 2021, Yilmaz et al. ont analysé les conditions de confort thermique en hiver en élaborant des scénarios d'aménagement d'une rue à Erzurum, dans la région de l'Anatolie orientale en Turquie, en utilisant le modèle ENVI-met. Les résultats de cette étude ont indiqué que la conception de la canopée semi-ouverte offrait un confort thermique élevé dans la rue.

## **Conclusion**

La simulation des interactions entre les bâtiments, l'environnement et l'individu est un travail complexe qui représente une étape prépondérante dans l'étude du microclimat urbain. Afin de quantifier l'impact des choix d'aménagement urbain sur l'environnement, il est important de choisir un outil approprié pour obtenir les différentes informations microclimatiques souhaitées. Ce chapitre a été consacré à la présentation détaillée de l'outil ENVI-met, qui est un logiciel de simulation basé sur une approche tridimensionnelle du microclimat. Il prend en compte les aspects thermodynamiques et aérauliques du microclimat urbain, et simule les interactions entre les différents éléments du paysage urbain, tels que les plantes, l'air et les surfaces. Ce logiciel se caractérise par une résolution de quelques mètres et une période de simulation allant de 24 heures à quelques jours. Les simulations réalisées par ENVI-met, accompagnées de mesures in situ, peuvent être utilisées comme des outils de planification urbaine dans des conditions climatiques présentes (Jojo et al, 2015).

Dans la poursuite de notre travail, nous avons choisi d'utiliser ENVI-met pour simuler l'effet de la végétation sur le microclimat dans une partie de la cité El Houria à Mostaganem, qui est considérée comme l'un des îlots de chaleur urbains les plus intenses de la ville.

## CHAPITRE 05

# SIMULATION MICROCLIMATIQUE DE L'ICU DANS UNE PARTIE DE LA CITE EL-HOURIA A MOSTAGANEM



*« La mise en modèle mathématique des phénomènes physiques urbains est relativement aisée, mais celle de leurs multiples interactions l'est moins... ». Musy et al., 2014.*

## Introduction

La connaissance détaillée des microclimats urbains est une étape primordiale pour prévoir les stratégies de rafraîchissement et de confort thermique dans les espaces publics urbains. Les outils de simulation qui traitent la question des îlots de chaleur urbains analysent principalement les interactions entre la ville et la basse couche de l'atmosphère, connue sous le nom de canopée urbaine (CU). Les caractéristiques climatiques de cette couche sont fortement transformées par la ville avec laquelle elles sont en contact direct, ce qui entraîne la formation des îlots de chaleur urbains (ICU). Plusieurs études se sont intéressées à la simulation de l'ICU dans la couche de canopée urbaine, et un grand nombre d'entre elles (par exemple Ali-Toudert et Mayer 2006, Perini et Magliocco 2012, Taleghani et al. 2014) ont utilisé le logiciel ENVI-met (Bruse and Fleer 1998).

En effet, les outils de simulation urbaine sont généralement développés par des universités à des fins de recherche et ont souvent un caractère expérimental. Avant d'accepter les résultats de ces outils, il est indispensable de les confirmer par des mesures "in situ". Pour cela, il est nécessaire, dans un premier temps, d'élaborer la simulation d'un cas de base réel pour lequel on dispose des mesures des paramètres météorologiques de terrain afin de pouvoir valider la simulation.

Ce chapitre a pour objectif de simuler l'îlot de chaleur urbain situé dans une partie de la cité EL-Houria à Mostaganem. Cette étape constitue la simulation du cas de base de notre étude. Le chapitre vise à répondre à deux principaux objectifs :

- Premièrement, il s'agit de valider nos résultats de simulation en les confrontant à des mesures prises sur terrain pour une journée chaude d'été. Comme déjà cité, cette étape est importante pour pouvoir continuer le reste des simulations.
- Deuxièmement, il s'agit d'analyser le comportement des paramètres météorologiques diurne et nocturne de l'ICU, à savoir la température de l'air, de surface, moyenne radiante et l'indice de confort thermique PMV.

### 5.1 Description du site d'étude

El-Houria est une cité urbaine résidentielle moyennement dense construite en 1995 à l'Est de la ville de Mostaganem (figure 5.1), elle comprend 750 logements (Yamani et Brahim, 2009).

La zone d'étude comprend une partie de la cité, composée de 7 bâtiments d'habitations collectives, un marché, un bâtiment administratif, ainsi qu'une section de la forêt des Dunes qui délimite la cité au nord (figure 5.2A) (figure 5.3 et 5.4).

La forêt des Dunes est classée parmi les sept forêts sélectionnées par la direction des forêts de la wilaya de Mostaganem pour être destinée à des activités récréatives<sup>27</sup>. Cependant, cette forêt urbaine est exposée à différents types d'agressions tels que l'érosion hydrique, les incendies provoqués, les coupes illicites du bois, ainsi que les décharges de déchets ménagers urbains et de déchets inertes de construction. Ces agressions ont transformé la forêt dense en une forêt très clairsemée avec des poches vides importantes. L'espèce d'arbre dominante dans cet espace vert est le pin d'Alep.



**Figure 5.1** : La situation de la zone d'étude dans la ville de Mostaganem, la ligne pointillée blanche représente la cité d'El Houria, la ligne pointillée rouge représente la limite de la zone d'étude.

Au centre du site se trouve un espace de 50 m x 40 m (Figure 5.2 B) (Figure 5.5), qui était autrefois destiné à une aire de jeux. Cependant, il est actuellement inutilisé et représente un espace vide sans fonction particulière. Les bâtiments environnants ont une hauteur d'environ 15 mètres, et le facteur de vue du ciel moyen (SVF) des rues avoisinantes a été estimé à 0,49 à l'aide du logiciel Rayman (Matzarakis et al., 2006) à partir de photos de type fisheye (Figure 5.6) (Tableau 5.1).

<sup>27</sup> Dans ce cadre, les six autres forêts destinés comme forêts récréatives pour la wilaya de Mostaganem sont : Sedaoui et Bourahma à Sidi Lakhdar, la forêt de Masra, Zrifa à Achacha, la forêt des Dunes à Hassi Mameche, et Mhariga à Mostaganem (Direction des forêts de la wilaya de Mostaganem).

Le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments des rues du site et leurs largeurs est d'environ 4,5. Cette valeur de rapport peut entraîner un piégeage radiatif qui contribue au réchauffement des surfaces des rues et à l'augmentation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU)..

Après avoir visité la zone étudiée, il a été constaté une quasi-absence d'espaces verts à l'exception de la forêt, et les rues sont dépourvues d'arbres d'alignement (figure 5.7).



**Figure 5.2 :** La zone d'étude. A : représente une partie de la forêt d'El Houria, et B : l'espace central entre les bâtiments de la zone d'étude. Le point rouge représente la localisation de la station météorologique et du thermomètre infrarouge.



**Figure 5.3 :** La forêt des Dunes limitant le site d'étude au nord. Source : N. Bachir, 2020.



**Figure 5.4 :** L'état clairsemé de la forêt des Dunes. Source : N. Bachir, 2020.

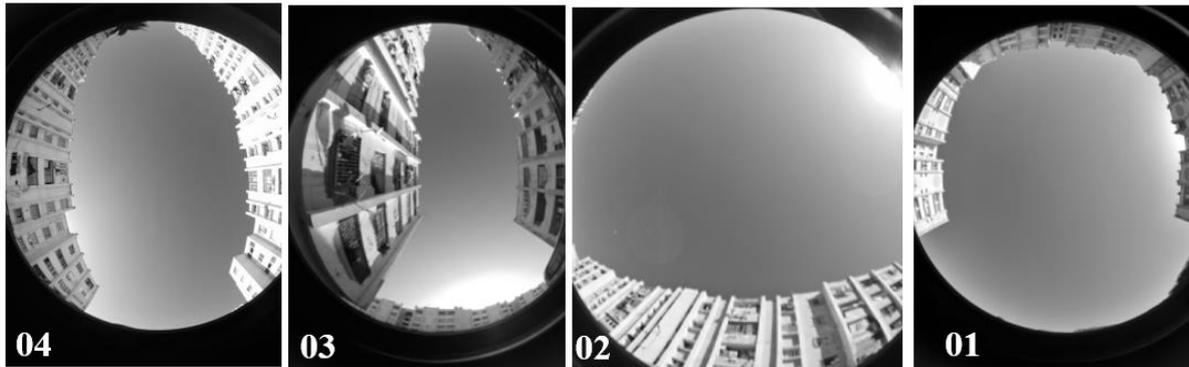
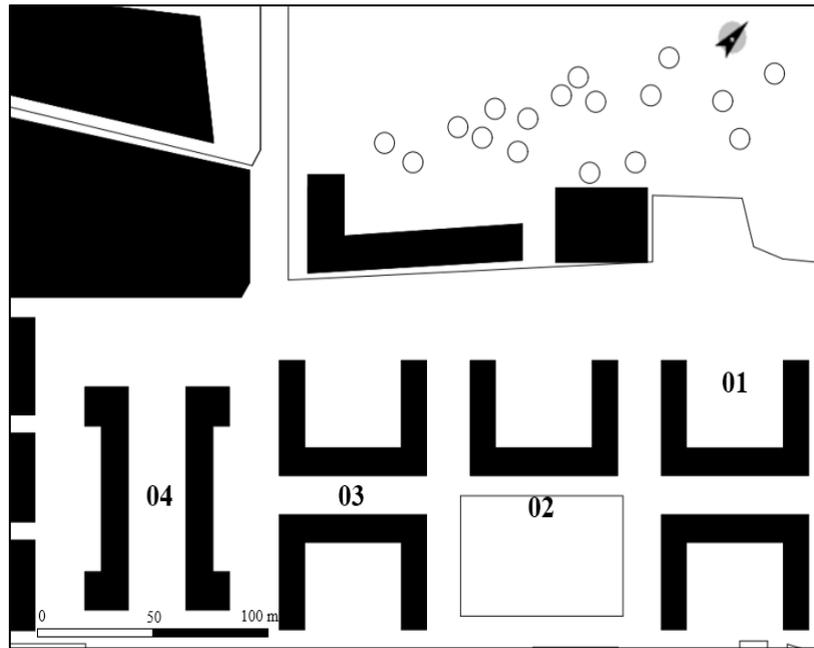


**Figure 5.5 :** L'espace vide inexploité au centre du site d'étude. Source : N. Bachir, 2020.

Les bâtiments du site sont construits avec des murs extérieurs en briques creuses rouges peints en gris et en jaune, et des dalles en béton gris. Les routes sont toutes en asphalte et les trottoirs en béton. Ces matériaux qui composent le site sont caractérisés par un faible albédo.

**Tableau 5.1 :** les valeurs du facteur de vue du ciel (SVF) calculées par la logiciel Rayman à partir des images hémisphériques. Source : N. Bachir.

Point	1	2	3	4
SVF	0,66	0,7	0,31	0,4



**Figure 5.6 :** Photographies hémisphériques prises avec une caméra équipée d'un objectif Fisheye 180° et leur emplacement dans le site. Source : N. Bachir, 2020



**Figure 5.7 :** Rues à l'intérieur du site d'étude. Source : N. Bachir, 2020.

## 5.2 Campagne de mesure in-situ

Afin de calibrer le modèle ENVI-met avant de commencer les simulations paramétriques, une campagne de mesure des variables élémentaires du microclimat<sup>28</sup> a été menée sur le site d'expérimentation le 25 juillet 2020, considéré comme une chaude journée d'été. Les paramètres mesurés comprennent la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, lesquels ont une influence sur le bilan énergétique humain en termes de confort et de stress thermique

Les mesures ont été relevées pendant 24 heures en continu à l'aide d'une station météorologique de type PCE-FWS-20<sup>29</sup> installée à une hauteur de 1,20 mètre au-dessus du sol, située au centre de la zone d'étude, dans un lieu à ciel ouvert avec un SVF de 0,7 (voir la figure 5.6) et protégée de la circulation piétonne, comme illustré dans la figure 5.8.

Selon Anquetil et al. (2014), il est difficile de respecter les recommandations strictes de l'Organisation Mondiale de la Météorologie concernant l'installation des capteurs dans un espace dégagé en ville. Cependant, Oke (2006) souligne que les mesures de deux paramètres, la température et l'humidité, restent représentatives si les capteurs sont installés à l'intérieur de la canopée. Dans le cas de notre étude, la hauteur choisie pour la station météo s'intègre parfaitement dans la canopée urbaine.

Simultanément, la température du sol a été enregistrée manuellement à l'aide d'un thermomètre infrarouge de type FLUKE 59 MAX+<sup>30</sup> (figure 5.9). En raison des restrictions sanitaires imposées par la pandémie du COVID-19, nous avons dû respecter les horaires du confinement, ce qui nous a amenés à limiter les mesures de 8h à 16h le même jour.

Pour assurer le bon déroulement de la campagne de mesure sans encombre, nous avons obtenu une autorisation de l'université pour l'installation de la station météorologique et l'utilisation du thermomètre infrarouge<sup>31</sup>.

---

<sup>28</sup> Anquetil et al (2014) définissent dans ce contexte les variables élémentaires du microclimat comme étant la température et l'humidité de l'air ambiant à proximité du sol, lieu où évoluent les gens lorsqu'ils sont dehors.

<sup>29</sup> La station météo PCE-FWS-20 est préalablement calibrée, elle est accompagnée d'un certificat de calibrage DIN EN ISO. Ce calibrage ISO se compose d'un calibrage en laboratoire avec un protocole de mesure et un certificat ISO.

<sup>30</sup> Le thermomètre infrarouge Fluke 59 MAX est calibré par : India Calibration Certificate.

<sup>31</sup> A noter que notre recherche n'a reçu aucun financement externe, les instruments de mesure utilisés (la station météorologique et le thermomètre infrarouge) ont été acquis par nos propres moyens.

### 5.3 Le modèle géométrique de base dans ENVI-met

La simulation de la présente étude a été réalisée avec la version 4.4.5 d'ENVI-met. Le modèle de base a été créé à l'aide du nouvel outil ENVI-met Monde inclus dans cette version, en utilisant le système de coordonnées Universal Transverse Mercator (UTM) pour le géoréférencement. Cette étape consiste à reproduire la situation actuelle du site avec la végétation existante (arbres clairsemés), ainsi que la géométrie et les matériaux des bâtiments.



**Figure 5.8 :** La station météorologique du type PCE-FWS-20 utilisée lors de la campagne de mesure. Source : N. Bachir, 2020.



**Figure 5.9:** Thermomètre infrarouge de type FLUKE 59 MAX+ utilisé pour mesurer la température de surface lors de la campagne de mesure. Source : N. Bachir, 2020.

L'importation d'une photo aérienne du site à partir de Google Earth nous a permis d'obtenir des informations presque précises sur la localisation et la hauteur des bâtiments et des arbres. Le site a une superficie de 62 500 m<sup>2</sup>, soit une dimension de 250 m x 250 m. Il a été introduit manuellement dans le modèle avec une géométrie de grille de 50x50x40 pixels le long des axes X, Y et Z, respectivement. Chaque pixel correspond à une résolution de 5 m le long des 3 axes (dx = 5 m, dy = 5 m et dz = 5 m). Cette résolution répond aux exigences énoncées par Huttner (2012). La majorité des bâtiments ont une hauteur d'environ 15 m, qui est considérée comme la plus importante du site. Les figures 5.10 et 5.11 illustrent respectivement le modèle de base en 2D et en 3D.

Huttner (2012) indique que les exigences pour simuler les interactions complexes d'une zone urbaine sont :

- Une petite résolution pour la taille de la grille (inférieure à 10 m) afin d'observer l'effet des bâtiments et de la végétation.
- Le bilan énergétique des surfaces doit être pris en compte.
- L'effet de la végétation doit intégrer les caractéristiques morphologiques et physiologiques des plantes.
- Le calcul des processus atmosphériques devrait tenir compte des équations pronostiques, qui impliquent des dérivées temporelles.

Le modèle Envi-met est l'un des rares modèles à micro-échelle répondant à toutes ces caractéristiques.

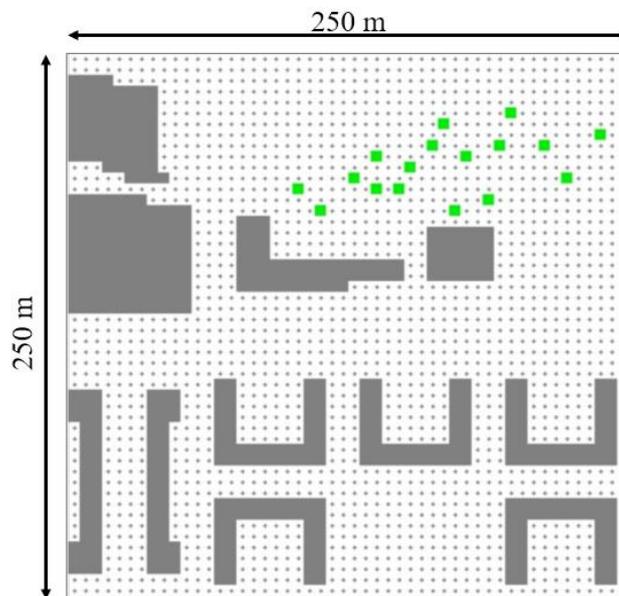
La version d'ENVI-met 4 permet de modéliser la végétation en deux types :

- Les plantes avec une simple structure verticale sont modélisées comme des "plantes simples".
- Les plantes avec un couvert tridimensionnel complexe, telles que les arbres, sont représentées par un groupe de cellules ayant une densité de surface foliaire (LAD<sup>32</sup>) (Simon, 2016 ; Shinzato et al., 2019). Étant donné que ces plantes ont leur propre géométrie tridimensionnelle, elles sont appelées « plantes-3D ». Toutes les plantes ont des caractéristiques spécifiques telles que la fixation du CO<sub>2</sub>, la résistance minimale des stomates, l'albédo à ondes courtes, la hauteur de la plante, la profondeur totale de la racine, la densité de surface RAD et la densité de surface LAD. Les plantes 3D plus

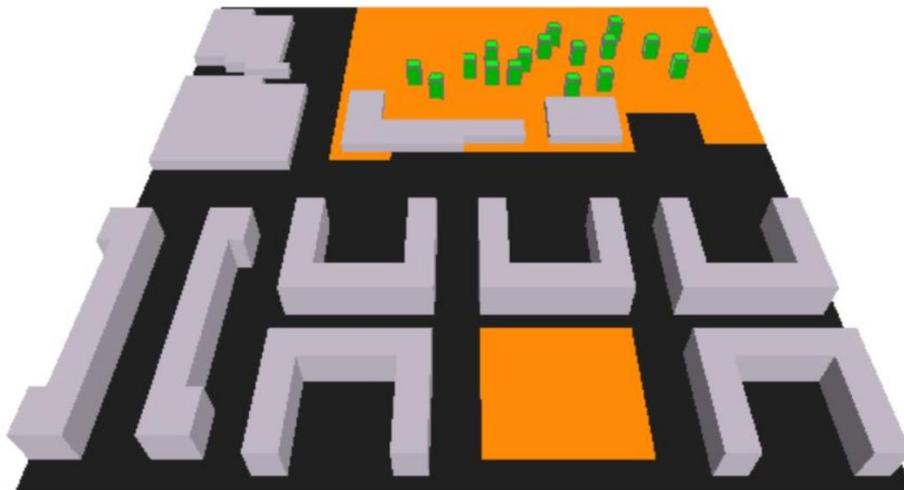
---

<sup>32</sup> LAD est défini comme étant l'indice de répartition angulaire des feuilles (LAD - Leaf Angle Distribution).

détaillées d'ENVI-met 4 sont gérées par un programme d'édition spécial appelé « Albero » (voir figure 5.12).



**Figure 5.10:** Le model 2D réalisé à l'aide d'ENVI-met. La couleur grise représente les bâtiments, la verte revient à la végétation présente sur site sous forme d'arbre de type pin d'Alep, et représentée dans le model par le type d'arbre : cylindric, small trunk, sparse, with a height of 5m.



**Figure 5.11:** Le model 3D réalisé à l'aide d'ENVI-met. La couleur grise représente les bâtiments, noire les routes en asphaltes, marron le sol en terre et la verte illustre les arbres.

Dans Albero, l'utilisateur peut définir des plantes avec une résolution de grille de 1m x 1m (Shinzato et al., 2019). Dans le cas du modèle de base de notre étude, l'arbre utilisé est

cylindrique, à petit tronc, clairsemé, et mesure 5m de hauteur (figure 5.13). Cet arbre appartient au premier type de plante d'ENVI-met 4 (plantes simples), et se caractérise par une géométrie simple et une hauteur similaire à celle de l'arbre dominant dans la forêt des Dunes : le pin d'Alep. Cependant, dans le reste des scénarios, des arbres du deuxième type sont utilisés et seront présentés en détail dans le chapitre suivant.



Figure 5.12: La fonction Albero dans ENVI-met 4.4.5.

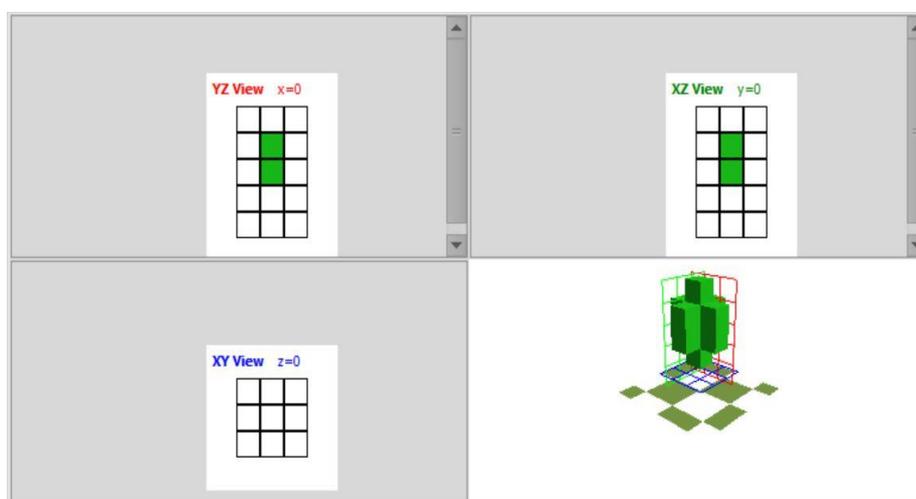


Figure 5.13: Le type d'arbre : cylindric, small trunk, sparse, with a height of 5m, utilisé dans le modèle de base.

#### 5.4 Données d'entrée et processus de calibration du modèle

Depuis la sortie de la version ENVI-met 4, la fonction de forçage a permis une meilleure calibration entre les données simulées et mesurées (Huttner et Bruse, 2009). Le forçage est un type de condition aux limites latérales dans lequel les valeurs du modèle unidimensionnel ou du fichier de forçage sont copiées sur la bordure. Le forçage complet permet de forcer tous les profils prédéfinis dans le modèle principal, y compris la température de l'air, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, le rayonnement, la couverture nuageuse et les précipitations. Le forçage simple permet de forcer dynamiquement uniquement les valeurs d'entrée de température et d'humidité relative de l'air (la notion de forçage est expliquée en détail dans le chapitre 04). Dans le cadre de cette étude, les conditions météorologiques initiales ont été

utilisées comme données d'entrée pour générer le forçage simple du modèle. Ces conditions ont été mesurées sur place pendant la campagne de mesure et sont présentées dans le tableau 5.2.

Selon la station météorologique officielle de Mostaganem, le 25 juillet 2020 était une journée d'été chaude et stable, avec une faible vitesse de vent et aucune précipitation. Dans ce contexte, notre intérêt était d'étudier les effets d'ICU plus importants causés par la faible vitesse du vent. Les valeurs de vitesse et de direction du vent à 10 m ont été mesurées au début de la campagne sur la terrasse d'une mosquée située à proximité du site d'étude et à une hauteur similaire. Les valeurs par défaut des conditions initiales du sol (température et humidité) ont été maintenues et ne sont pas basées sur des mesures in situ. La chaleur émise par la climatisation ainsi que le flux anthropique causé par les voitures et les industries n'ont pas été pris en considération dans les calculs d'ENVI-met. La durée de la simulation du modèle était de 24 heures, de 00h00 à 23h00 pour chaque simulation.

## **5.5 l'analyse des résultats de la simulation du scénario de base**

### **5.5.1 La comparaison entre les résultats d'ENVI-met et les données mesurées**

Pour vérifier la différence entre les valeurs mesurées et simulées, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur moyenne absolue (MAE) et l'indice de concordance (d) ont été calculés. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (en anglais, Root mean square error), est une mesure utilisée pour calculer les différences entre les valeurs prédites par un modèle ou un estimateur et les valeurs observées ou mesurées. Elle est calculée à partir de la racine carrée de la moyenne des différences au carré entre les valeurs prédites et les valeurs observées (source : wikipedia.org). MAE représente la différence absolue moyenne entre les valeurs ajustées par le modèle et les données historiques observées (source : <https://www.ibm.com>). L'indice (d) est une mesure standardisée du degré d'erreur de prédiction du modèle qui varie entre 0 et 1. La valeur 1 indique une correspondance parfaite, tandis que 0 indique l'absence totale de conformité (Willmott, 1981). Le tableau 4.3 illustre ces indicateurs pour la simulation du modèle de base et indique un bon accord entre les paramètres simulés et observés.

La simulation de la température de l'air a donné un RMSE de 1,20 °C avec une erreur absolue moyenne de 0,85 °C, sauf entre 9h et 10h où le modèle sous-estimait la température de l'air observée de 3,5 °C à 4 °C, respectivement. Pour le reste de la journée, les écarts entre les températures observées et simulées étaient inférieurs à 1 °C (figure 5.14), ce qui correspond à

la précision de l'instrument de mesure à bord de la station météorologique PCE-FWS-20, selon le manuel de la station météorologique PCE-FWS-20 de 2016.

**Tableau 5.2** : Les conditions météorologiques initiales prises sur place pendant la campagne de mesure, et utilisé comme données d'entrée pour générer le forçage simple du modèle.

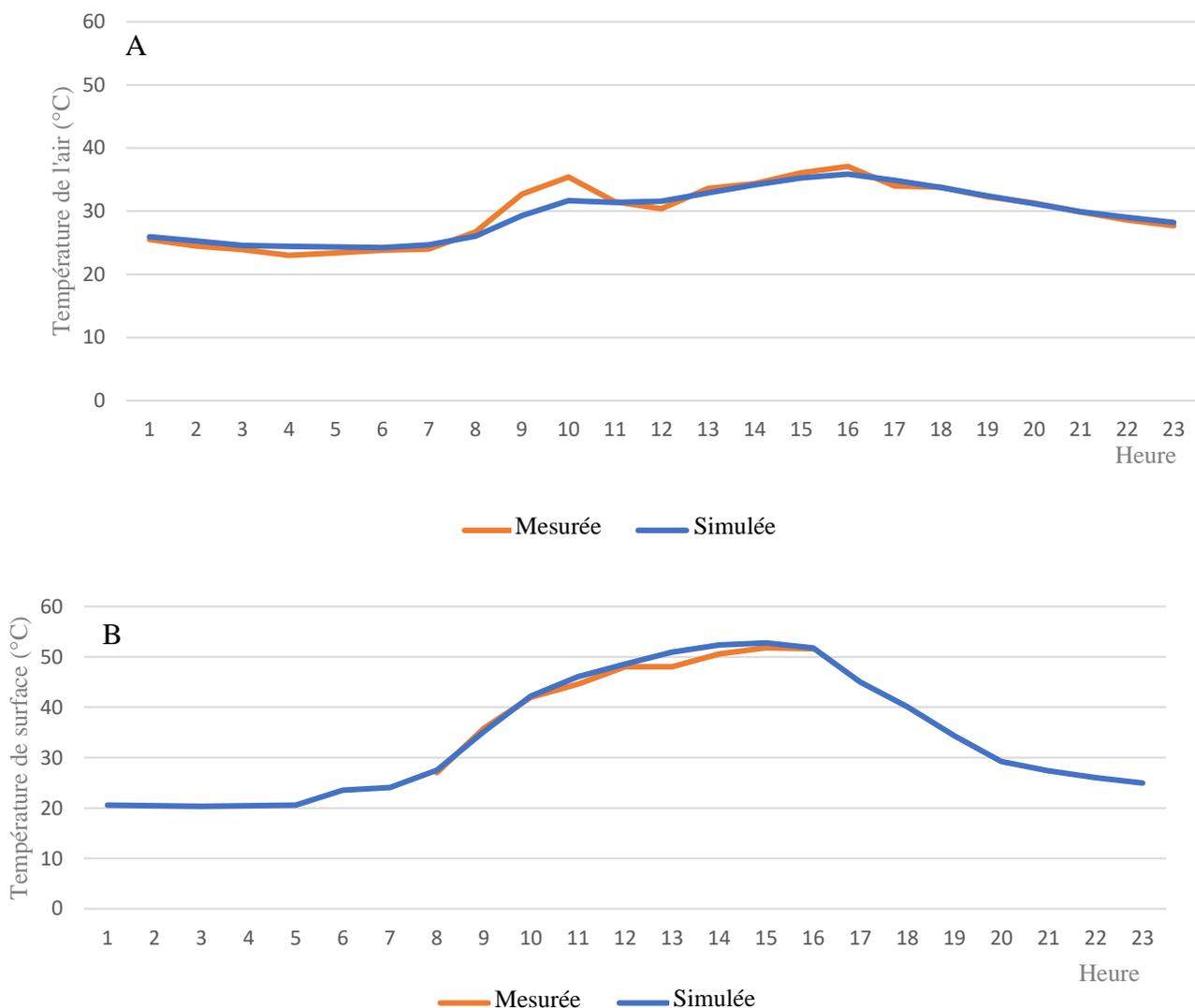
<b>Start and duration of mode run:</b>	
Start date of simulation	25/07/2020
Start time	00 :00 :00
Total simulation times	24
<b>Initial meteorological conditions</b>	
Wind speed at 10m heigh (m/s)	3
Wind direction (deg)	225
Roughness length at measurement site	0,01
Min. and max. temperature of atmosphere (°C)	14 min – 37.1 max
Min. and max. relative humidity in 2m (%)	21 min – 88 max
<b>Building temperature</b>	25 °C (constant)
<b>Output intervals</b>	
Receptors and buildings (min)	30
All other files (min)	60
<b>Initial soil conditions</b>	Soil humidity (%) Initial temperature (°C)
Upper layer (0-20 cm)	70 19.85 (default values)
Middle layer (20-50 cm)	75 19.85 (default values)
Deep layer (50- 200 cm)	75 19.85 (default values)
Bedrock layer (below 200 cm)	75 19.85 (default values)
<b>Solar radiation</b>	
Adjustment factor for solar radiation	1

**Tableau 5.3** : Mesures quantitatives de la performance de la simulation du modèle de base.

Variable	Root Mean Square Error (RMSE)	Maximum Absolute Error (MAE)	index of agreement (d)
Température de l'air °C	1.20	0.85	0.98
Température de surface °C	1.99	1.46	0.98

D'autre part, la simulation de la température de surface, qui implique la résolution du bilan énergétique de surface dans le modèle, a montré un meilleur accord avec les mesures diurnes (figure 5.14). La

précision du thermomètre infrarouge 59 MAX+ est de 2 °C, selon le manuel du thermomètre infrarouge 59MAX/59 MAX+ de 2013. Nos relevés de la température de surface ont été écourtés en raison de contraintes indépendantes de notre volonté (confinement imposé par le COVID19). Cependant, l'objectif principal de notre simulation était d'évaluer l'effet de la distribution spatiale de la végétation et le choix des essences d'arbres sur le microclimat urbain pendant la période estivale, en supposant que l'abondance de la végétation non stressée peut atténuer le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Par conséquent, dans ce contexte, la comparaison des résultats entre scénarios est beaucoup plus importante en termes d'interprétation que la différence entre la température de l'air mesurée et simulée.



**Figure 5.14:** Températures mesurées sur site et simulées pour le scénario de base A) : température de l'air et B) température de surface. Pour la température de surface, les mesures ont été restreintes à cause du Covid19 (confinement imposé de 16h à 8h).

### 5.5.2 Les résultats de la température de l'air

La distribution spatiale de la température de l'air ambiant pour le modèle de base est représentée dans les figures 5.15 et 5.16. À 9 heures du matin, l'écart entre les températures minimales et maximales est plus élevé que celui observé à 14 heures, où il atteint une valeur de 9,14 °C. Cependant, à 14 heures, on observe que les températures maximales sont les plus élevées, atteignant une valeur de 36,48 °C, ce qui correspond à l'heure la plus chaude de la journée.

A 14h, la température de l'air simulée autour de la zone des bâtiments (figure 5.15) varie entre 33°C et 34°C, légèrement inférieure à celle des bâtiments du côté gauche du site qui présente des températures supérieures à 36°C. Cependant, dans la forêt actuelle (voir les figures 5.3 et 5.4), la température simulée varie entre 34°C et 35°C, supérieure d'environ 1°C à celle du sol nu autour des bâtiments. On pense que cela est dû au stress physiologique des plantes, qui résulte probablement d'une combinaison de température ambiante élevée et d'un manque de précipitations à cette période de l'année dans la région d'étude. En effet, la principale espèce peuplant la forêt existante est le pin d'Alep : une composition d'arbres à feuilles persistantes aiguilles caractérisée par une température de demi-inhibition pour la photosynthèse d'environ 30°C (Sellers et al., 1996). Cela signifie qu'à cette température, les arbres ferment leurs stomates à moitié, et donc la majeure partie de l'énergie solaire absorbée est dirigée vers la chaleur sensible au lieu de la chaleur latente de transpiration, augmentant ainsi la température. Notre simulation sur cette zone a abouti à des températures comprises entre 34°C et 35°C, ce qui dépasse le seuil de la température de demi-inhibition de l'arbre.

Sur la route principale, principalement recouverte d'asphalte et séparant les bâtiments de la forêt, les températures simulées sont les plus élevées, variant entre 35 °C et 36 °C (voir Figure 5.15). Les distributions spatiales des températures et les écarts entre les zones sont les mêmes à 14 heures qu'à 9 heures, mais avec des valeurs inférieures à cette dernière heure.

Sur le côté gauche de la zone d'étude, un tissu urbain différent existe, composé d'un groupe de logements résidentiels à deux étages construits en béton et en brique creuse. Ces constructions se réchauffent rapidement pendant la journée et atteignent leur maximum vers midi. En cas de vent nord-ouest, la chaleur est advectée entre les bâtiments et le long des rues du site d'étude.

Pendant la période nocturne, l'écart entre les températures minimales et maximales à 01h est de 4,41 °C, tandis qu'à 05h il est de 3,05 °C (voir Figure 5.16). Contrairement aux valeurs de température enregistrées pendant la période diurne, à 01h la température simulée dans le sol nu entre les bâtiments varie entre 27°C et 28°C, soit une différence de 1°C par rapport à celle de

la forêt. En effet, le rayonnement solaire absorbé par l'asphalte qui compose le sol nu pendant la journée est stocké et restitué la nuit sous forme de chaleur, ce qui rend cette zone plus chaude que la forêt.

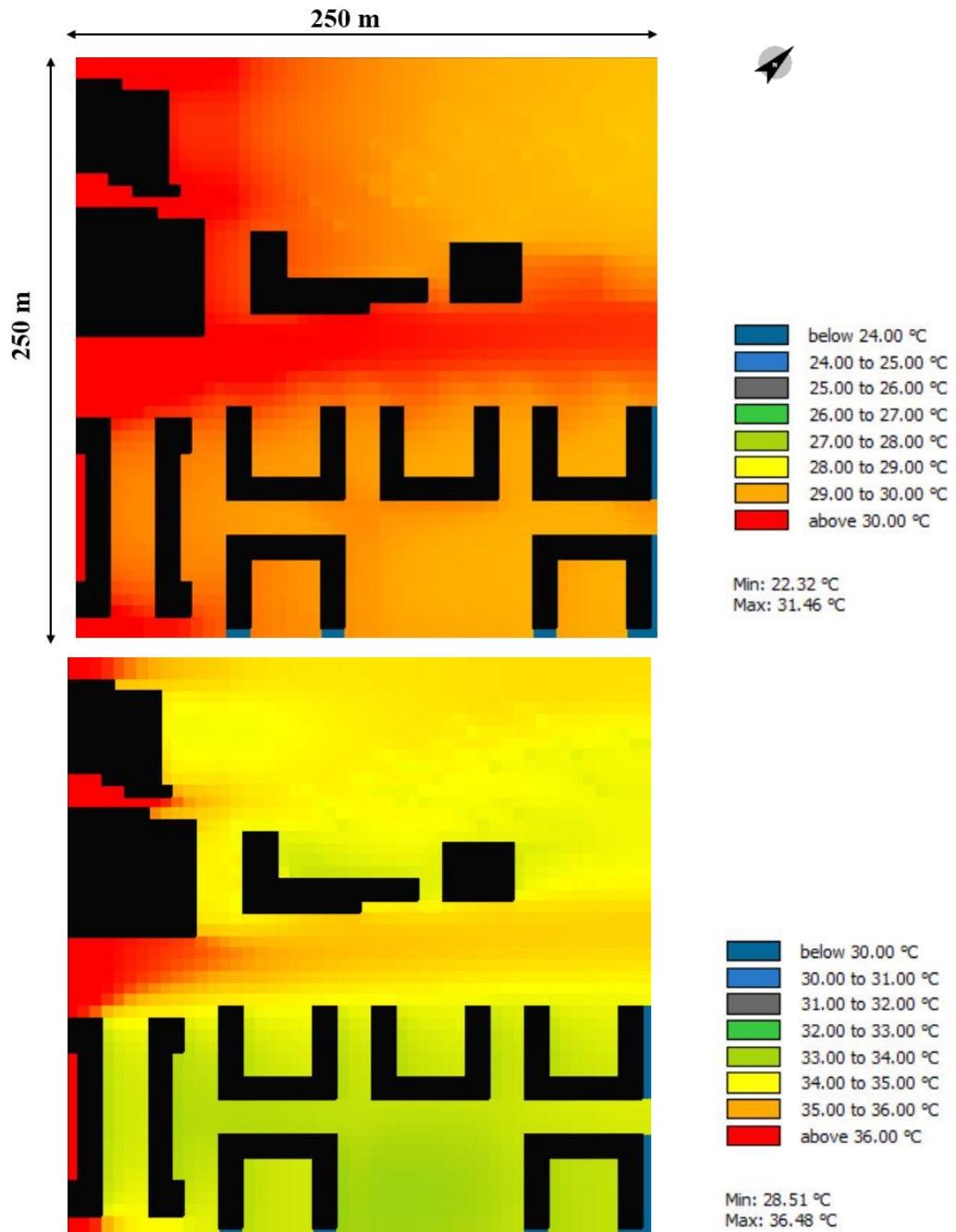


Figure 5.15 : Cartes des températures de l'air diurne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.

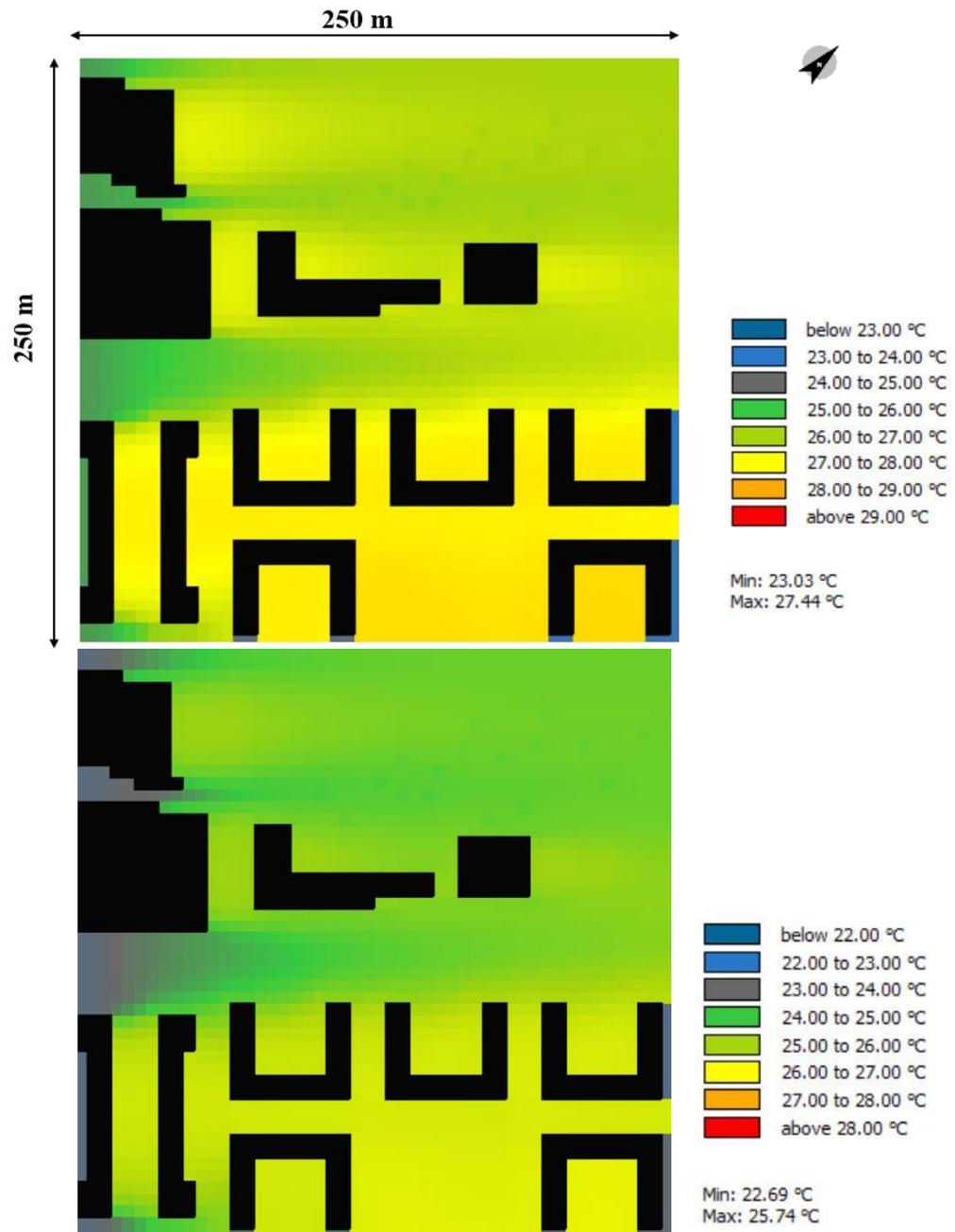
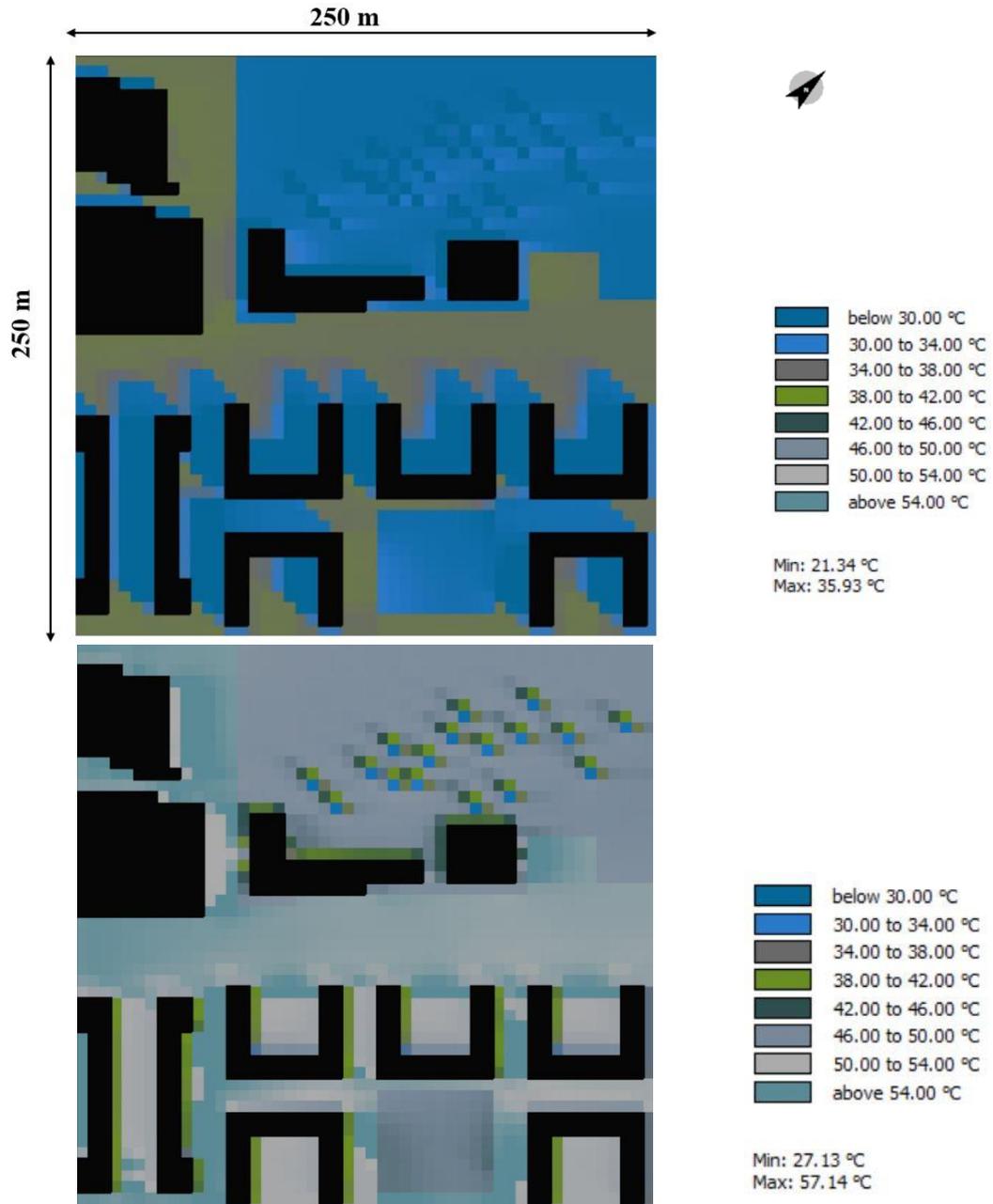


Figure 5.16 : Cartes des températures de l'air nocturne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.

### 5.5.3 La température de surface du sol

Pendant la journée, un écart entre les températures de surface minimales et maximales a été enregistré à 9h de 14,59 °C et à 14h de 30,01 °C (voir Figure 5.17). En période nocturne, on note cependant un écart de 5,22 à 1h et de 7,11 à 5h (voir Figure 5.18). La température de surface des voiries est la plus élevée. Par exemple, à 9h, les routes atteignent une température de surface comprise entre 38 °C et 42 °C, tandis qu'à 14h, considérée comme l'heure la plus chaude de la journée, ces valeurs augmentent entre 50 °C et 54 °C. Les routes du site sont principalement construites en asphalté, un matériau caractérisé par un faible albédo compris

entre 0,05 et 0,15 (Parlow, 2011) (voir Figure 5.19). Cette valeur correspond à un rayonnement réfléchi de 5% à 10% (tableau 5.4). La majeure partie de l'énergie solaire est absorbée par le matériau, ce qui le rend très chaud pendant la journée. En revanche, les trottoirs sont en béton, avec un albédo légèrement plus élevé compris entre 0,15 et 0,37 (Parlow, 2011) (voir Figure 5.19) et un rayonnement réfléchi variant de 15% à 25% (tableau 4.5). Cela caractérise ce matériau par une température moins élevée que l'asphalte pendant la journée.

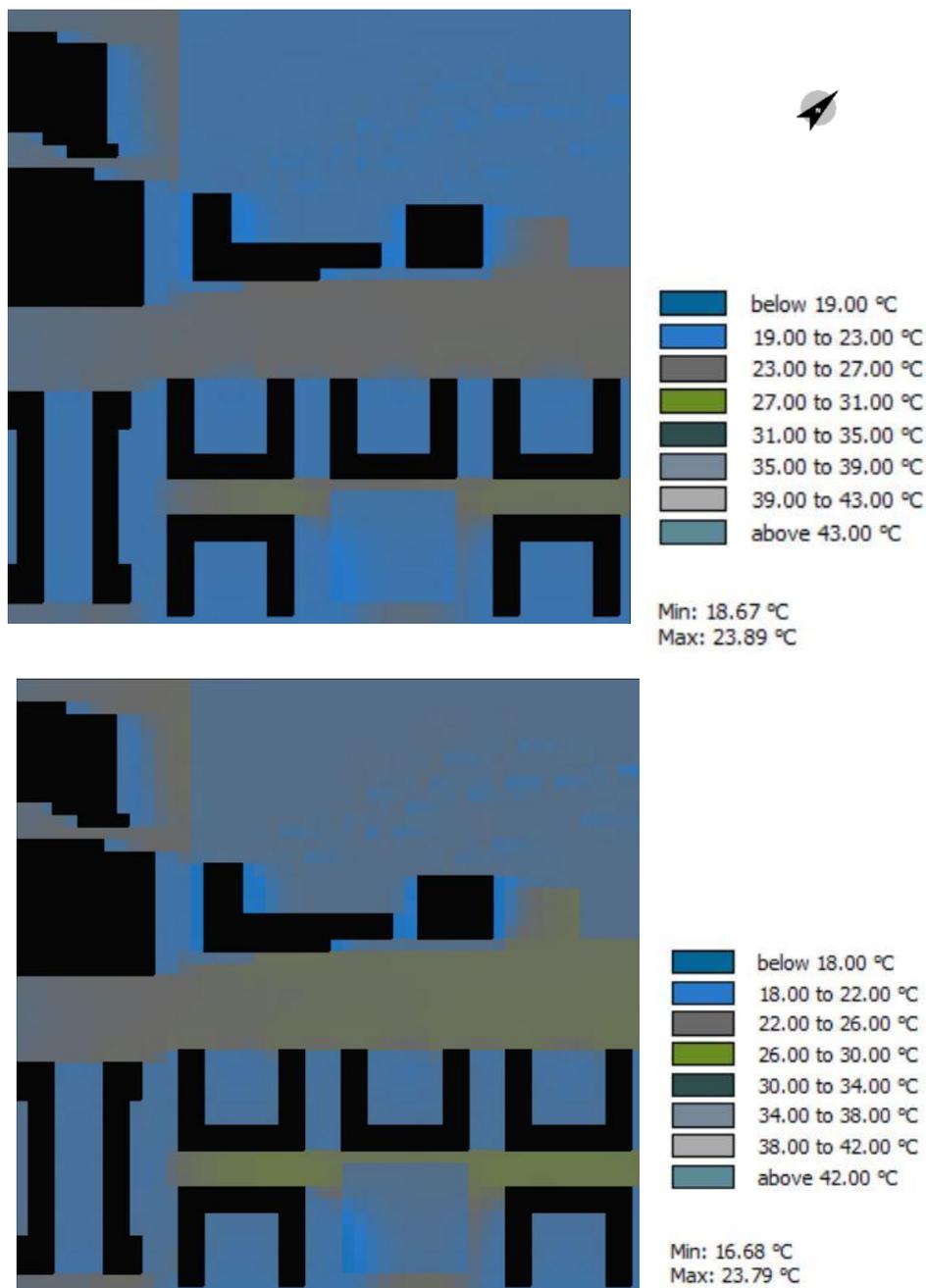


**Figure 5.17 :** Cartes des températures de surfaces diurne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.

À 9h du matin, la température du sol autour des constructions est la moins élevée sur le site, comprise entre 30°C et 34°C, grâce à l'ombre portée par les bâtiments. Cette même température

est enregistrée dans la zone forestière. À 14h, on constate une augmentation de la température du sol sur l'ensemble du site, dépassant les 54°C sur les routes principales.

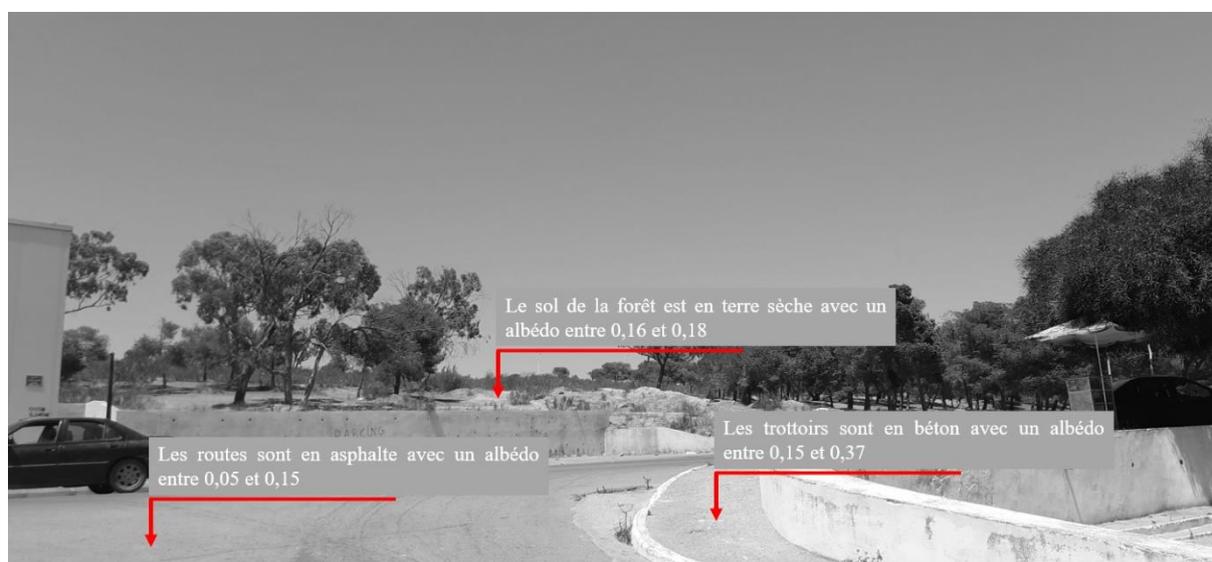
Pendant la période nocturne, la route principale séparant les bâtiments de la forêt a enregistré des températures de surface entre 23°C et 27°C à 01h, tandis qu'à 05h, ces températures ont augmenté pour atteindre des valeurs entre 26°C et 30°C.



**Figure 5.18:** Cartes des températures de surfaces nocturne à une hauteur de 1.5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.

**Tableau 5.4 :** Valeurs de réflexion du rayonnement ou albédo pour différents matériaux. Source : Rens, 2012.

SURFACE	ALBÉDO
Neige fraîche	81 à 88 %
Neige ancienne	65 à 81 %
Glace	30 à 50 %
Terre	35 %
Rochers	20 à 25 %
Béton	15 à 25 %
Bois	5 à 15 %
Asphalte	5 à 10 %
...	

**Figure 5.19:** Les valeurs de l'albédo des matériaux (selon le tableau de Parlow,2011) composant la surface du sol du site. Source : N. BACHIR.

#### 5.5.4 La température moyenne radiante

Les figures 5.20 et 5.21 présentent la distribution spatiale de la température moyenne radiante (Tmrt) simulée pendant les périodes diurnes et nocturnes.

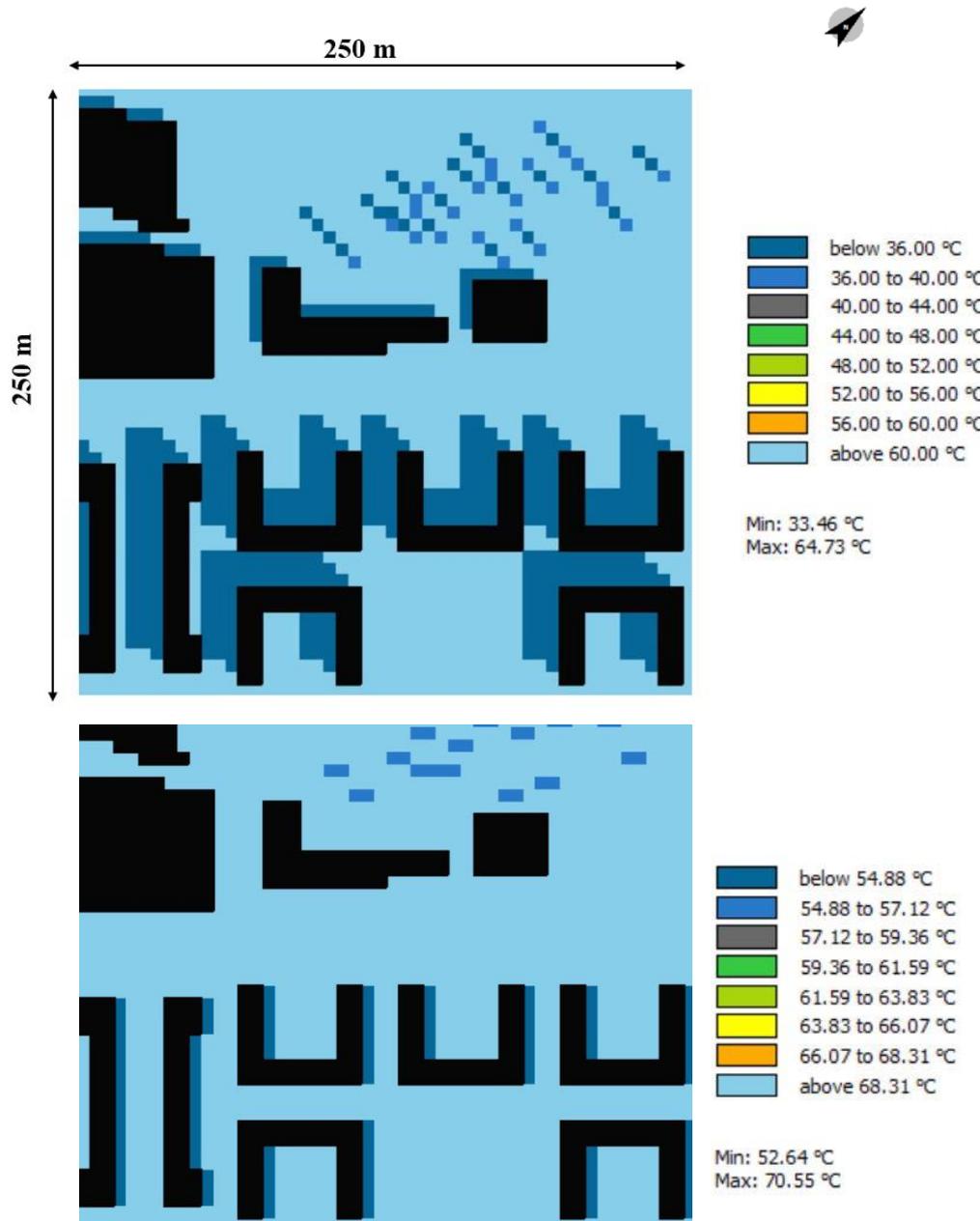
La Tmrt est une mesure de la somme des échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Elle est très importante dans le bilan thermique de l'homme et est un facteur clé dans le calcul des indices de confort (Ali-Toudert et Mayer, 2006 ; Fahed, 2019). ENVI-met calcule la Tmrt à travers l'équation (4,48) présentée dans le chapitre précédent, qui prend en compte les différents flux de radiations à grandes et à courtes longueurs d'onde absorbés par le corps humain (Fahed, 2019).

La mesure la plus efficace pour réduire les valeurs maximales de la  $T_{mrt}$  durant la journée est l'ombre des bâtiments et de la végétation. Les cartes nocturnes de la figure 5.21 montrent que la valeur de la température moyenne radiante est la plus élevée dans les rues étroites caractérisées par un faible prospect séparant les bâtiments, ainsi que dans la zone de la forêt, où elle est maximale et comprise entre 16 °C et 20 °C à 01h (figure 5.21). En revanche, pendant la journée, la  $T_{mrt}$  atteint des valeurs minimales dans ces zones, surtout pendant les heures ensoleillées, car ces zones sont ombragées par les bâtiments et la végétation. A 09h, les parties ombragées ont une  $T_{mrt}$  comprise entre 30 °C et 40°C, tandis que les parties les plus exposées au soleil ont des valeurs maximales qui dépassent les 60 °C. Vers 14h, cette valeur augmente substantiellement pour dépasser les 68 °C sur la majorité des zones du site d'étude (figure 5.20). Le manque d'effet d'ombre des bâtiments et de la végétation est la principale cause de cette augmentation. À partir de cette analyse, on constate qu'un faible FVC (facteur de vue du ciel) engendre des faibles températures radiantes durant la journée, tandis qu'un faible FVC produit des  $T_{mrt}$  élevées la nuit. Nos résultats sont en très bonne concordance et confirment l'étude menée par Fahed (2019) sur un quartier de la région de Dora à Beyrouth, une ville qui jouit du même climat méditerranéen que celui de Mostaganem.

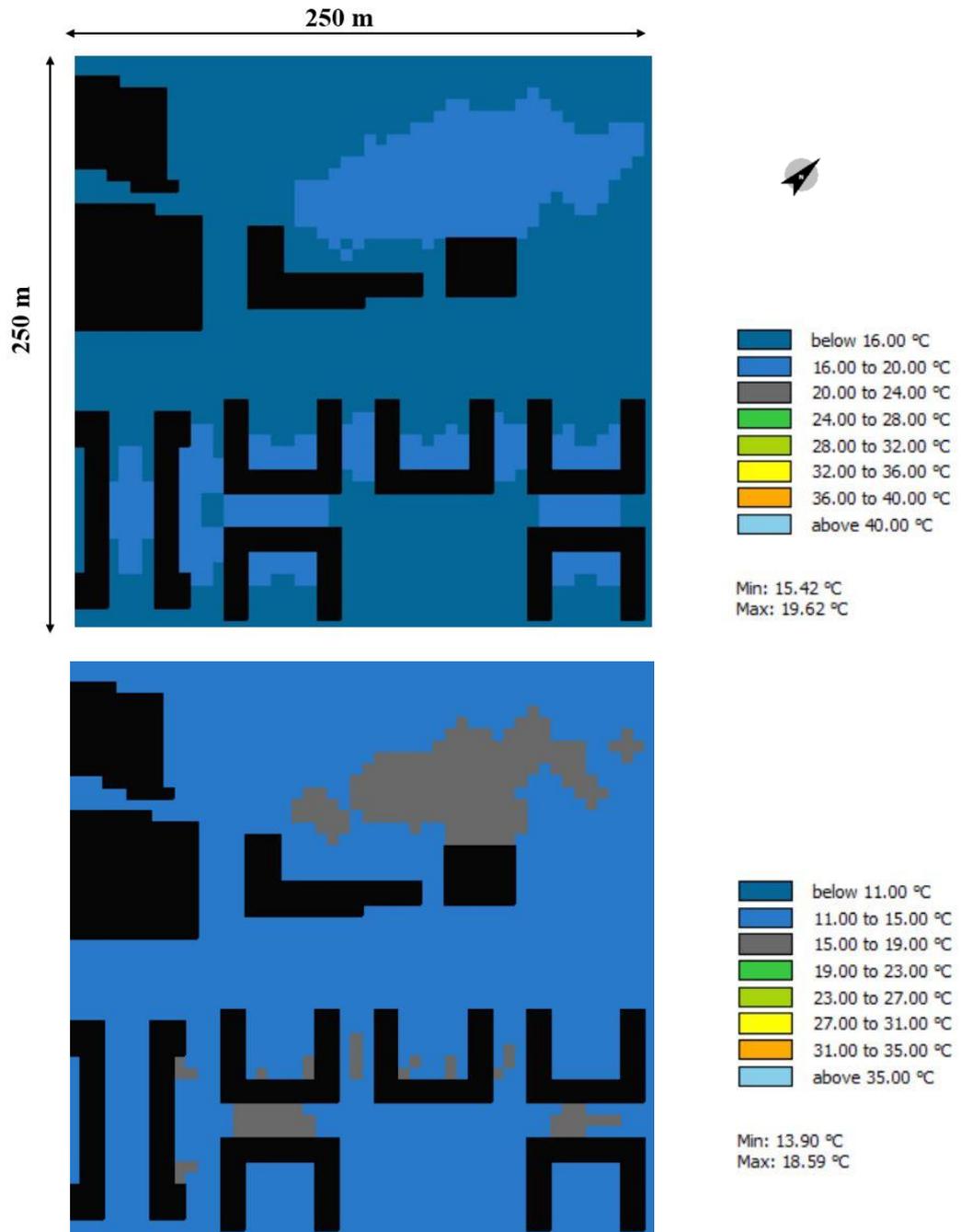
Selon Hami et al. (2019), il existe une relation relativement forte entre le facteur de vue du ciel et la température moyenne radiante pendant la journée. L'ombrage est l'un des facteurs atténuant le stress thermique, car il réduit le transfert de chaleur convectif des bâtiments et des surfaces du sol exposés au rayonnement solaire (Spronken-Smith et Oke, 1999). L'ombre réduit également le rayonnement direct à ondes courtes atteignant les constructions, les surfaces du sol ainsi que les humains (Ridha, 2017). La figure 4.22 montre la distribution du facteur de vue du ciel simulé à une hauteur de 1,5 m dans le site d'étude. Le tableau 5.5 compare les valeurs du FVC obtenues à partir d'ENVI-met et déjà calculées par le logiciel Rayman à partir des photos de type fisheye (voir la section 5.1 de ce chapitre). Pour les quatre points, les résultats sont en bonne corrélation.

Les rues étroites séparant les bâtiments (par exemple le point 03 dans la figure 5.22) sont caractérisées par un FVC moyen égal à 0,31. Dans ces rues, la  $T_{mrt}$  est réduite durant la journée, en particulier à 9h, du fait de la distance entre les bâtiments qui améliore l'exposition au soleil. Les valeurs les plus élevées de la  $T_{mrt}$  diurne ont été enregistrées dans les espaces dégagés et sans végétation, comme par exemple le point 02 (figure 5.22), qui est défini par un FVC élevé égal à 0,7 (tableau 5.5). Cela peut s'expliquer par le niveau élevé de rayonnement direct et réfléchi à ondes courtes, ainsi que par le rayonnement à ondes longues émis par les surfaces

environnantes exposées au rayonnement solaire. Dans son étude, Fahd (2019) affirme également qu'une zone urbaine avec un faible FVC offre un confort thermique dans les espaces publics durant la journée. (Fahd, 2019).



**Figure 5.20 :** Cartes des températures moyennes radiantes diurne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.



**Figure 5.21:** Cartes des températures moyennes radiantes nocturne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.

**Tableau 5.5 :** Comparaison entre les valeurs du FVC calculées par le logiciel Rayman et simulées par ENVI-met.

Points	1	2	3	4
SVF calculé par Rayman	0,66	0,7	0,31	0,4
SVF simulé par ENVI-met	0,57 – 0,67	0,67 – 0,78	0,25 – 0,36	0,36 – 0,57

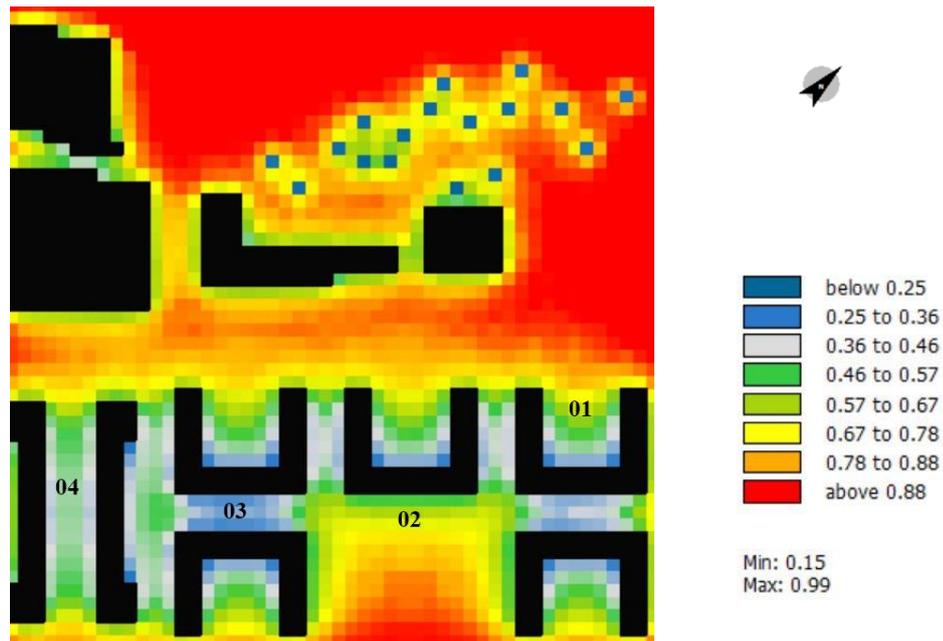


Figure 5.22: La distribution des valeurs du FVC à une hauteur de 1,5 m.

### 5.5.5 Le PMV

Le Predicted Mean Vote (PMV) est choisi comme indice d'évaluation du confort thermique, comparant la valeur moyenne des votes d'un large groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique. Cette échelle utilise les 7 points suivants (Fanger, 1970) : +3 très chaud, +2 chaud, +1 légèrement chaud, 0 ni chaud ni froid, -1 légèrement froid, -2 froid, -3 très froid.

Le modèle de Fanger a été remis en question par plusieurs chercheurs (par exemple, Fergus Nicol, 2004), et c'est le cas pour la plupart des modèles. Cependant, dans le cadre de son application, le PMV de Fanger est largement utilisé pour évaluer le confort thermique du corps humain. Le modèle PMV est développé sur la base d'expériences où le corps humain est proche de l'état thermique neutre, lorsque la relation entre la température de la peau, le taux de transpiration et l'intensité de l'activité humaine est linéaire. Les figures 5.23 et 5.24 illustrent la distribution spatiale du PMV pour les différentes heures de la journée.

Le calcul du PMV est réalisé par ENVI-met à l'aide de l'outil Bio-met en considérant les paramètres humains suivants :

- La personne est un homme âgé de 35 ans, pesant 75 kg et mesurant 1,75 m.

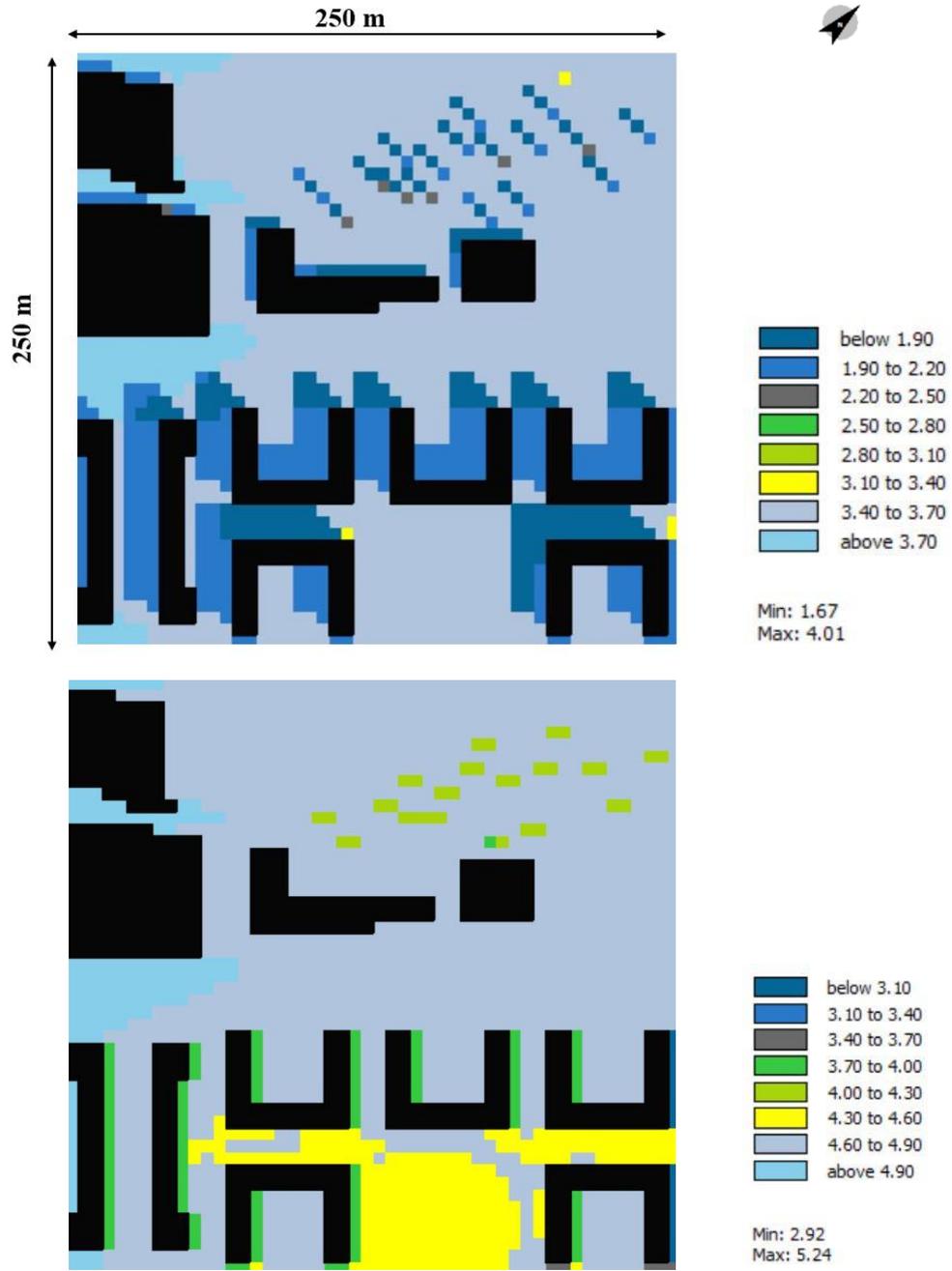


Figure 5.23: Cartes des valeurs du PMV diurne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 09h et en bas à 14h.

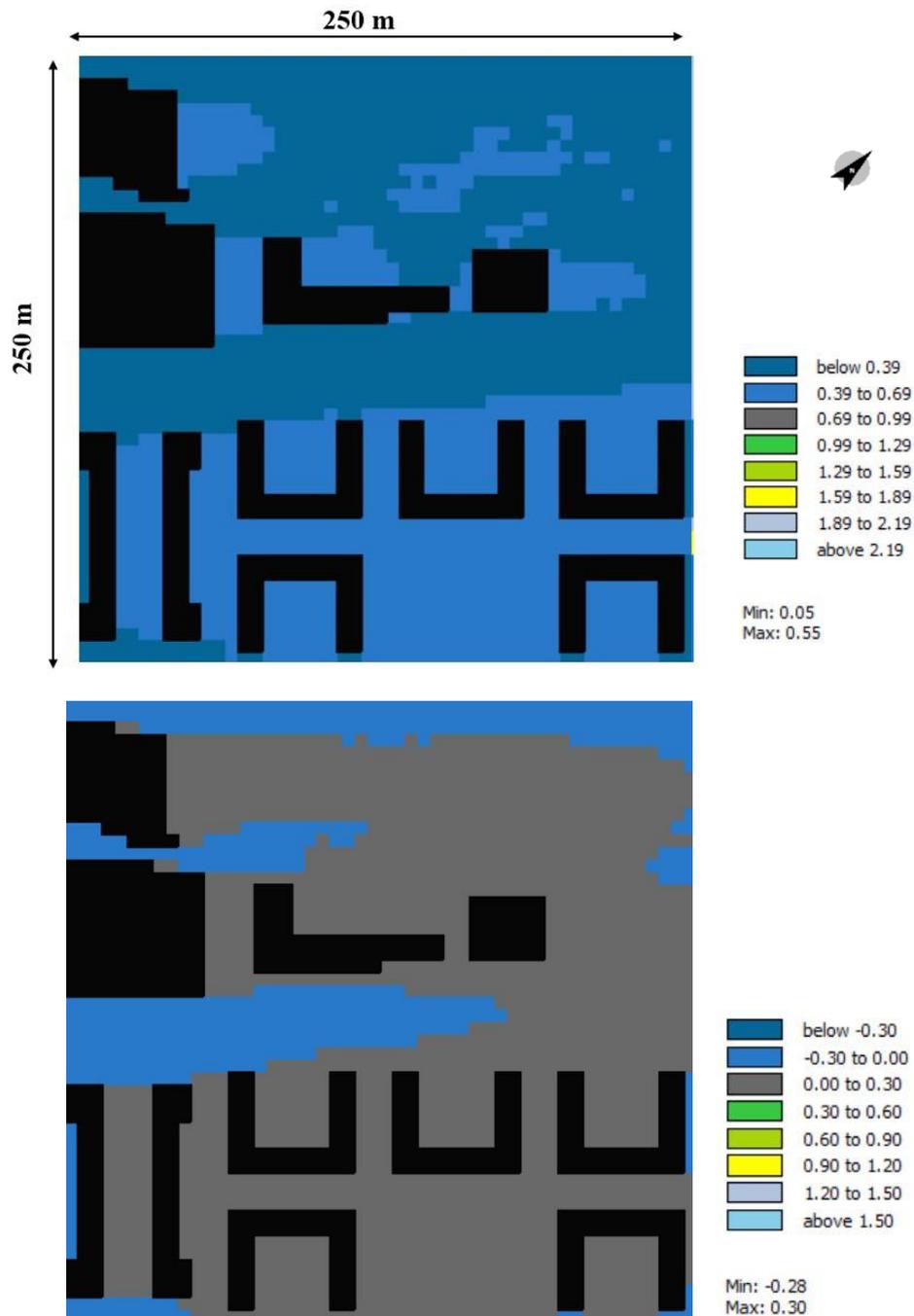


Figure 5.24: Cartes des valeurs PMV nocturne à une hauteur de 1,5 m, en haut à 01h et en bas à 05h.

- Il marche à une vitesse de 1,2 m/s.
- L'isolation thermique de sa tenue est de 0,5 clo. Le clo est l'unité de mesure de l'isolation thermique des vêtements, où 1 clo équivaut à 0,155 K.m<sup>2</sup>/W.
- Le métabolisme de la personne (production de chaleur interne) est de 164,49 W.

À 9h, les valeurs maximales et minimales du PMV enregistrées sont respectivement de 4,01 et 1,67. Ces valeurs augmentent jusqu'à 14h pour atteindre un PMV maximal de 5,24 et un PMV minimal de 2,92 (voir figure 5.23). Ces valeurs sont élevées et ne correspondent pas au niveau de confort thermique neutre déterminé par Fanger (1970). Elles dépassent même la valeur tolérable de 3. D'après ces résultats, on constate que le niveau d'inconfort thermique extérieur est très élevé durant la journée en période estivale à Mostaganem. À 1h, on note des valeurs de PMV qui se rapprochent de 0 (niveau de confort thermique neutre). Cependant, à 5h, particulièrement au niveau de la route principale, le PMV est compris entre -0,3 et 0 (voir figure 5.24) et dépasse le niveau neutre.

### **Conclusion**

Dans ce présent chapitre, et après avoir confronté les données de la simulation du cas de base de notre étude réalisée par ENVI-met avec les mesures effectuées sur le terrain pour une journée chaude de juillet, les résultats ont montré une bonne corrélation entre les données simulées et mesurées. Ces résultats confirment les conclusions de plusieurs autres études (par exemple : Jansson, 2006 ; Yu et Hien, 2006 ; Ghaffarianhoseini et al., 2015).

Une fois les résultats confirmés et le modèle calibré, l'analyse des paramètres microclimatiques de l'ICU étudié dans une partie de la cité El Houria à Mostaganem a révélé que la température de l'air ambiant dépassait les 36°C à 14h dans cette zone. À la même heure, la température de surface a atteint un maximum de 57°C et la température radiante moyenne a dépassé les 68°C. Dans ces conditions microclimatiques, le niveau d'inconfort thermique dans les espaces extérieurs est très élevé. Les valeurs de l'indice PMV (Predicted Mean Vote) ont dépassé la valeur tolérable de 3, ce qui a des répercussions sur la consommation d'énergie consacrée à la climatisation et sur la santé des citoyens.

La végétation, en tant que régulateur thermique, influe fortement sur ces paramètres microclimatiques urbains à travers différents mécanismes. Après validation de la simulation du cas de base, notre travail se concentrera sur l'étude de l'effet de rafraîchissement de la végétation dans l'ICU étudié sous différents scénarios.

## CHAPITRE 06

# LES RESULTATS DES SIMULATIONS DE L'IMPACT DE LA DISTRIBUTION SPATIALE DE LA VEGETATION ET DU CHOIX DES ESSENCES D'ARBRES SUR L'ATTENUATION DE L'ICU DE LA CITE EL-HOURIA A MOSTAGANEM



*« ...Cependant, nous n'avons pas trouvé dans la bibliographie d'étude sur l'impact de la répartition spatiale de la végétation, qui nous permette de statuer sur un intérêt à regrouper la végétation en grandes surfaces ou au contraire à la disperser ». Musy et al., 2014.*

## Introduction

La végétation est souvent considérée comme l'une des solutions d'atténuation des îlots de chaleur urbains (ICU). Elle présente de nombreux avantages en ville, notamment sa capacité d'évaporation (du sol) et de transpiration (des plantes), ou d'évapotranspiration lorsque ces deux phénomènes se produisent simultanément. Cette capacité est particulièrement bénéfique en été et dans les climats chauds. Les plantes présentes dans la ville, sous différentes formes et quantités, ont des influences variées sur son microclimat. Par exemple, Oliveira et al. (2011) ont constaté qu'un parc urbain de 0,24 hectare affecte la température de l'air des rues environnantes, sur la base de mesures in situ effectuées dans le quartier Campo de Ourique à Lisbonne. Shashua-Bar et Hoffman (2002) et Shashua-Bar et al. (2010) ont montré qu'il existe une corrélation importante entre la couverture de la canopée et l'effet de refroidissement des arbres dans une rue d'Athènes. Les auteurs ont calculé l'effet de refroidissement des arbres en prenant la différence entre la température de l'air calculée dans la rue avec des arbres et celle calculée dans la même rue sans arbres. Cependant, une différence de température de l'air de 2°C a été enregistrée entre un terrain herbeux d'un parc et des surfaces en asphalte et en béton dans des parkings. Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures de la température de l'air au-dessus d'un parc dans la ville nouvelle de Tama à Tokyo (Ca et al., 1998). Bounoua et al. (2015) affirment que le choix et la quantité d'espèces végétales dans les villes jouent un rôle déterminant pour moduler la température de surface globale des villes, et peut être utilisé comme mécanisme de « refroidissement » potentiel pour atténuer le réchauffement excessif généré par des surfaces imperméables et réduire la consommation d'énergie domestique. Les différentes études sur la végétation et son effet sur le microclimat sont généralement réalisées à l'aide de modèles, qui retracent les aménagements (construction, arbres, masses d'eau, etc.), puis simulent leurs effets sur la température, le vent, l'ensoleillement et l'humidité de l'air (Ali Toudert, 2005 ; Robitu et al., 2006 ; Bouyer, 2009 ; Bounoua et al., 2009, 2015).

Dans ce contexte, après la calibration du logiciel dans le chapitre précédent, notre intérêt dans ce chapitre porte en premier lieu sur la simulation de l'impact de la répartition spatiale de la végétation urbaine sur le microclimat d'un milieu urbain. En second lieu, nous nous intéressons à l'effet du choix des espèces d'arbres sur le refroidissement de l'air. Nos résultats obtenus quant à l'effet de la végétation dans le quartier El-Houria peuvent être généralisés à plusieurs villes côtières algériennes, puisque ce quartier présente des caractéristiques physiques similaires à celles des nouvelles extensions de ces villes.

## **6.1 La simulation de l'impact de la distribution spatiale de la végétation sur le microclimat urbain dans une partie de la cité El-Houria à Mostaganem**

Musy et al. (2014) ont déclaré qu'ils n'ont pas trouvé dans la bibliographie d'étude sur l'impact de la configuration spatiale de la végétation sur le microclimat urbain. Cependant, en 2015, Denis et al. ont confirmé dans leur recherche menée à Sao Paulo que la configuration du scénario avec des arbres denses le long du trottoir a montré les valeurs de température de l'air les plus basses et une distribution la plus homogène de l'effet de refroidissement de la végétation. Dans le cas de cette partie de notre étude, l'objectif était d'analyser quatre configurations spatiales de la végétation : forêt urbaine, alignement d'arbres, parc urbain et enfin, l'impact combiné des trois arrangements précédents de la végétation dans le quartier El-Houria.

### **6.1.1 La conception de différents scénarios de végétalisation**

Après la calibration du logiciel (voir chapitre 05), quatre scénarios ont été conçus sur le site d'étude. Les trois premiers scénarios ont été réalisés en modifiant la disposition spatiale de la végétation tout en conservant la même forme urbaine et les mêmes matériaux. Le quatrième scénario représente une combinaison des trois premiers scénarios.

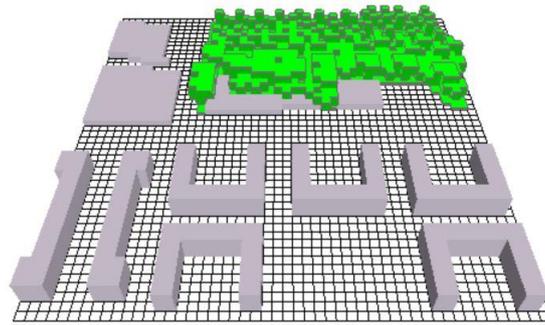
Pour le premier scénario, l'objectif était de densifier la forêt existante en regroupant la végétation dans une grande zone du site, sous la forme d'une forêt urbaine afin d'évaluer son effet sur le microclimat (figure 6.1, ).

Contrairement à la version précédente d'ENVI-met 3, qui contenait une base de données de plantes en 1D, la version ENVI-met 4 possède une base de données en 3D, avec la possibilité de créer de nouveaux types de végétation et de plantes (Duarte et al., 2015) (voir chapitre 05, partie 5.1). Dans cette étude, les arbres ont été personnalisés en utilisant la deuxième catégorie de la bibliothèque d'Albero pour s'adapter aux espèces présentes dans la forêt du site (feuillus et conifères), avec une tolérance au stress climatique local méditerranéen.

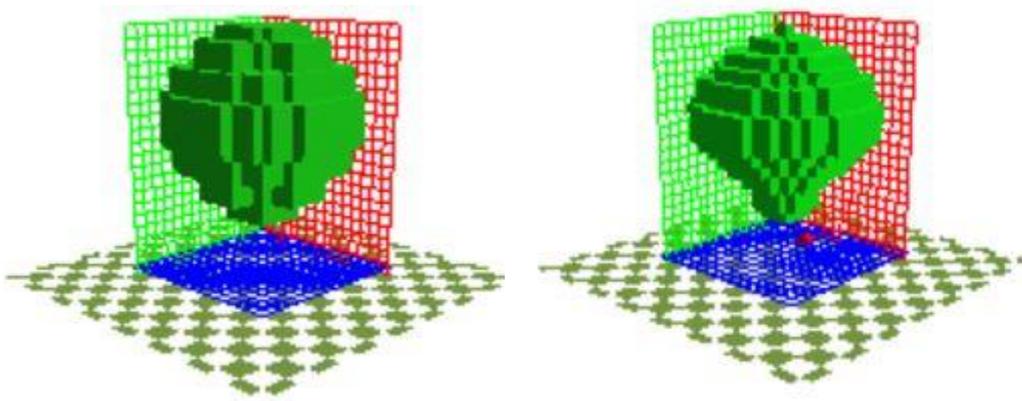
La forêt a été densifiée dans le scénario B (Figure 6.7) en utilisant des espèces forestières méditerranéennes, à savoir :

Des conifères d'environ 10 m de hauteur pour *P. nigra* et 20 m pour *Platanus* (Figure 6.2).

Le sol a été recouvert d'un tapis herbacé d'une densité moyenne de 25 cm. Selon Jean-Paul Hétier et Charles (1989), cette couverture herbacée se comporte différemment dans les espaces boisés des régions méditerranéennes.

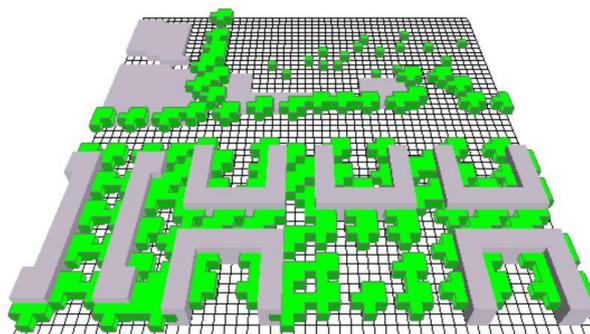


**Figure 6.1 :** Le scénario de la forêt (B), réalisé par ENVI-met 4.4.5.



**Figure 6.2 :** Les arbres 3D utilisées dans le scénario de la forêt : à gauche Platanus de 20 m et à droite P.Nigra de 10m .

Dans le deuxième scénario, la végétation est disposée en alignement le long des rues pour évaluer l'impact des couverts de végétation dispersés sur le microclimat de la zone (Figure 6.3).



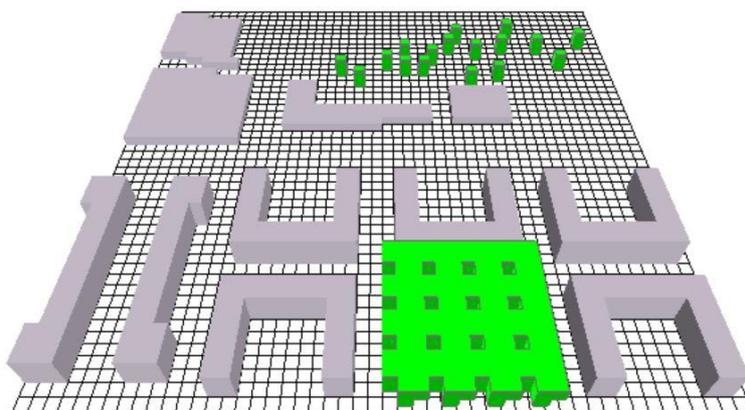
**Figure 6.3 :** Le scénario des alignements d'arbres (C), réalisé par ENVI-met 4.4.5.

Dans le troisième scénario, un parc urbain a été aménagé dans l'espace central entre les bâtiments (Figure 6.4), afin d'évaluer l'effet d'un parc urbain de taille moyenne sur la température de surface du site expérimental. Pour le deuxième scénario d'alignement d'arbres

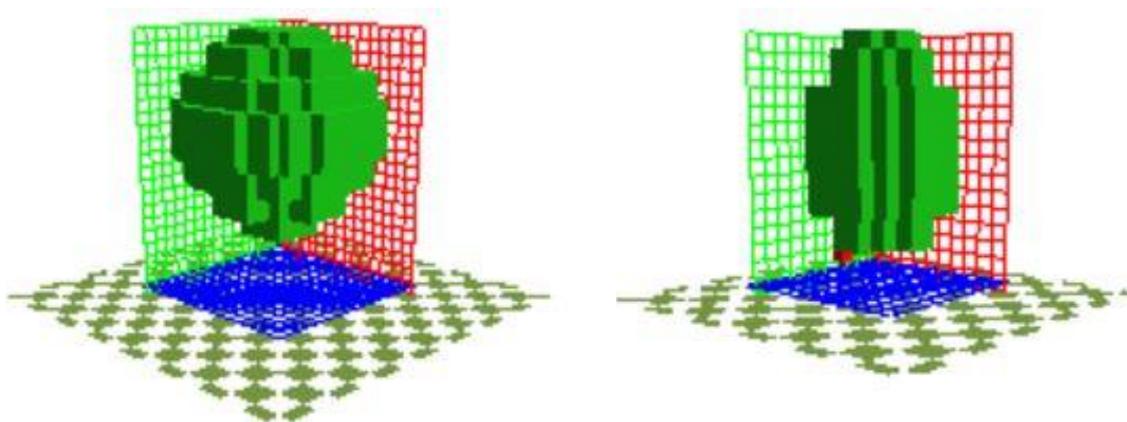
(C) et le parc urbain (D), les platanes suivants ont été utilisés avec les hauteurs indiquées (figure 6.5) :

- Platanus (15 m)
- pseudoplatanus (15 m).

Le platane est en effet un arbre d'alignement couramment utilisé pour structurer les grands axes routiers des villes et villages coloniaux en Algérie.

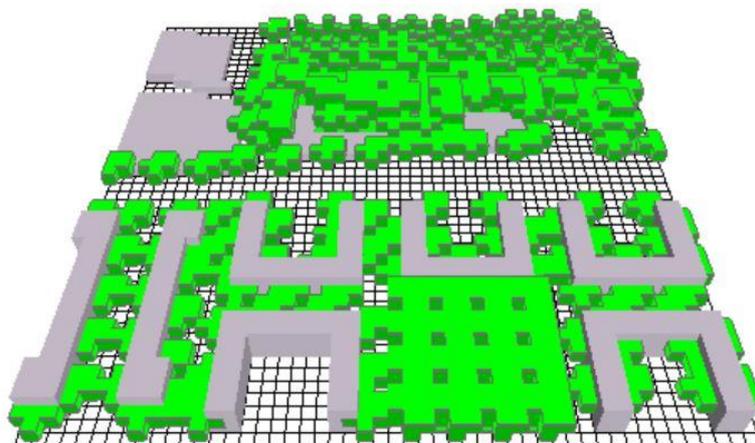


**Figure 6.4** : Le scénario du parc urbain (D), réalisé par ENVI-met 4.4.5.



**Figure 6.5** : Les arbres 3D utilisées dans les deux scénarios (C) et (D) : à gauche Platanus de 15 m et à droite Pseudoplatanus de 15m.

Enfin, le quatrième scénario présente l'impact combiné des différents arrangements de végétation sur le microclimat de la zone (Figure 6.6). Il contient les mêmes arbres dans les mêmes dispositions que dans les scénarios individuels.



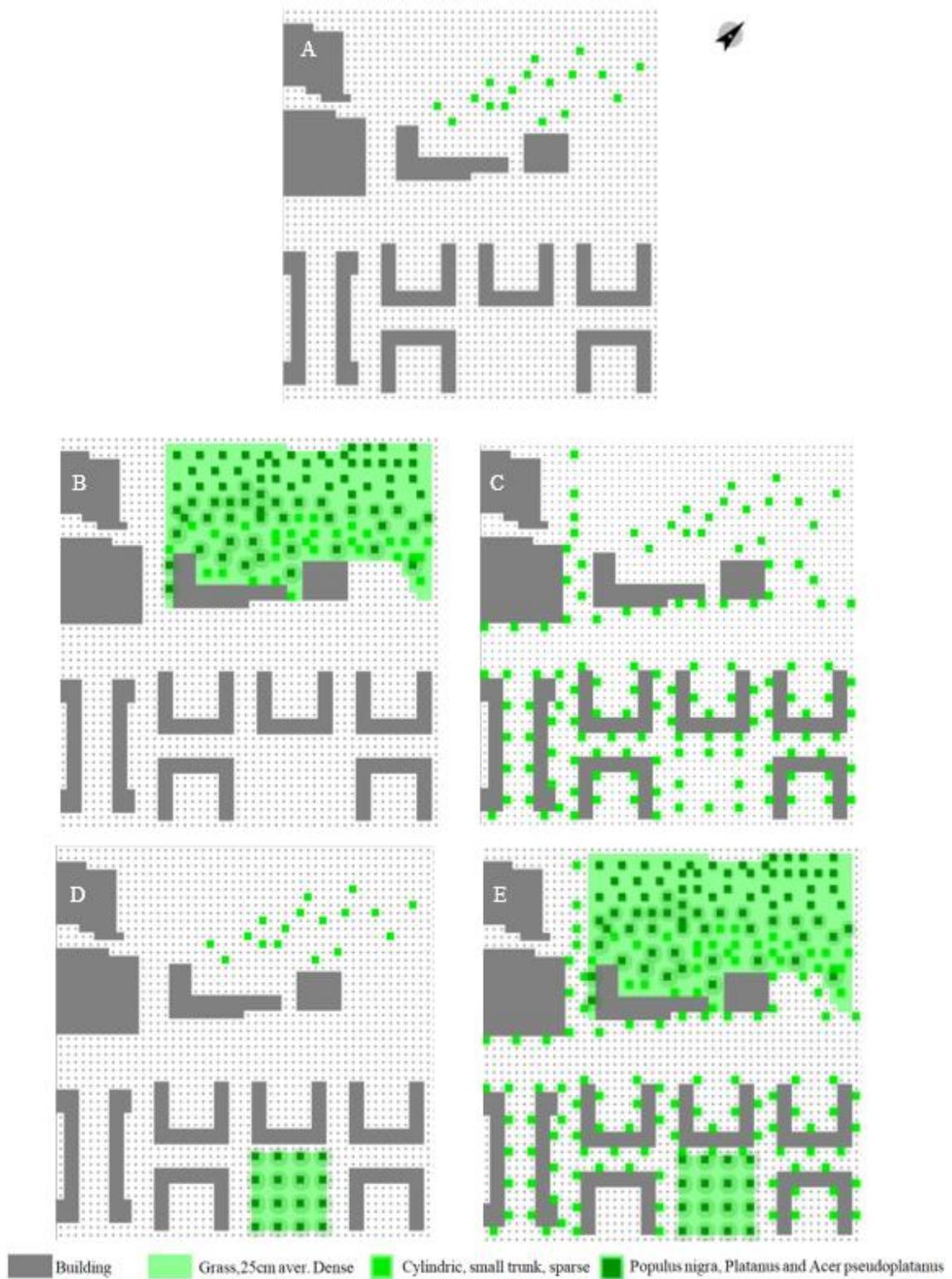
**Figure 6.6** : Le scénario combiné (E), réalisé par ENVI-met 4.4.5.

Tous les scénarios sont représentés en 2D dans la figure 6.7. En effet, le changement du type, du nombre et de la localisation des arbres peut influencer la comparaison de l'impact de la distribution spatiale des arbres dans différents scénarios. Cependant, dans notre cas, la nature des scénarios nécessitait un nombre, un type et un emplacement spécifiques d'arbres. Par exemple, le nombre d'arbres dans la forêt est supérieur à celui d'un parc de taille moyenne. De plus, pour étudier l'effet de l'impact de la répartition spatiale, regrouper la végétation sur de grandes ou moyennes surfaces ou la répartir dans le site a nécessité différentes localisations des arbres. Pour ce qui est de l'hypothèse d'irrigation, de nouvelles techniques sont privilégiées, présentant l'avantage de minimiser l'utilisation de l'eau grâce à une irrigation juste et localisée. Cela les rend plus efficaces pour réduire les pertes par interception et évaporation. Parmi ces techniques, on trouve les sacs d'irrigation, qui ont prouvé leur efficacité dans plusieurs villes à travers le monde.

### **6.1.2 Résultat des simulations**

Les résultats des simulations pour différents paramètres du microclimat tels que la température de l'air, la température moyenne radiante, la température de surface, l'humidité, la vitesse du vent, ainsi que les indices de confort, sont obtenus et analysés par l'outil ENVI-met Leonardo. Les résultats sont présentés sous forme de distribution en 2D et de variations diurnes et nocturnes des paramètres du microclimat. Les valeurs moyennes et d'autres statistiques sont également présentées. Pour cette étude, les valeurs moyennes sont obtenues pour la zone représentée en jaune (Figure 6.8). Cette zone est considérée comme importante

dans le site en raison de la concentration des bâtiments. En général, l'analyse de la valeur moyenne d'une



**Figure 6.7:** Scénarios réalisés : (A) - Scénario de base, (B) – Scénario de la forêt, (C) – Scénario des alignements d'arbres (D) – Scénario du parc, (E) - Scénario combiné.



**Figure 6.8:** L'espace en couleur jaune représente la zone sélectionnée pour calculer la moyenne des sorties du modèle. A représente une partie de la forêt d'El Houria, et B l'espace central entre les bâtiments de la zone d'étude.

zone dans un site d'expérimentation est plus représentative que celle d'un seul récepteur qui représente un point du site (Duarte et al., 2015). La végétation dans les scénarios B et E est située à l'extérieur de cette zone de contrôle, cependant notre objectif était d'analyser l'effet de ces scénarios sur cette zone de contrôle. Cela peut être réalisé en transportant une partie de l'effet de la végétation (par exemple, la température de l'air, l'humidité relative) dans la zone sélectionnée par le vent.

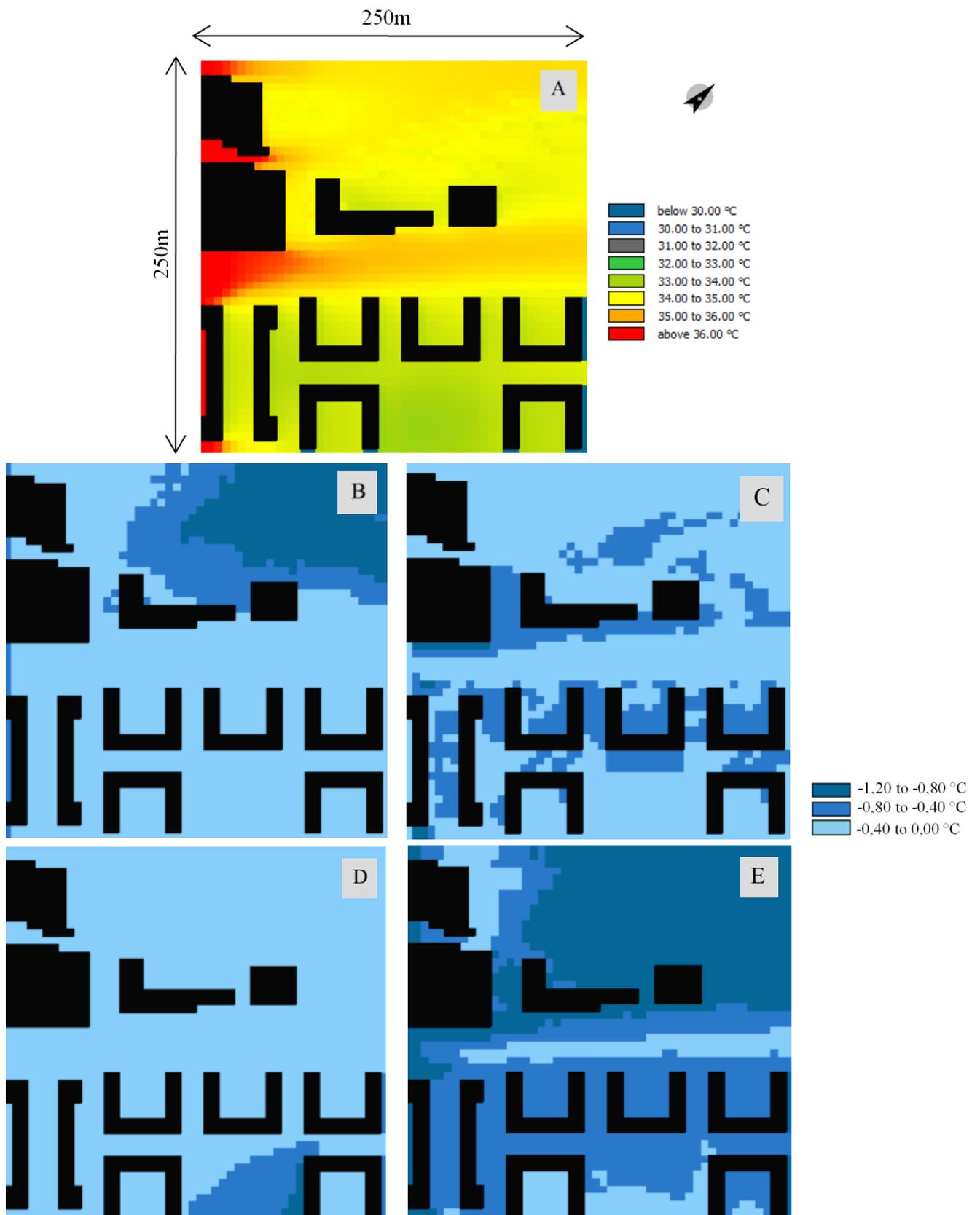
Dans la présente étude, les paramètres du microclimat analysés sont la température de l'air, la température moyenne radiante et la température de surface. Ils sont simulés à une hauteur de 1,5 mètres. Pour évaluer le confort thermique extérieur, le vote moyen prévisible (PMV) est choisi comme indice de confort.

### 6.1.2.1 La température de l'air

Dans le premier scénario (Figure 6.7 B), où la forêt a été densifiée par des arbres plus tolérants aux stress de chaleur et de sécheresse, le modèle a simulé un refroidissement remarquable allant jusqu'à 1,20°C sur la zone densément boisée (figure 6.9 B), tandis que les zones forestières environnantes présentaient également un refroidissement significatif, compris entre 0,40°C et 0,80°C. Ce refroidissement peut également être dû à une modification de la couverture du sol. Ailleurs, aucun changement significatif de température n'a été simulé. Ce résultat montre que la densification de la forêt avec des essences appropriées a permis la création d'un îlot de fraîcheur, ce qui va dans le sens des études antérieures (par exemple, Imhoff et al., 2010), qui

ont montré que dans les villes construites en zones arides, les arbres contribuent à refroidir le noyau urbain et à créer un îlot de fraîcheur par rapport à leur environnement désertique. Dans le scénario d'alignement d'arbres (Figure 6.9 C), la température de l'air a été réduite de manière significative, avec une valeur variant entre 0,40°C et 0,80°C dans la plupart des zones couvertes d'arbres.

Ce refroidissement, un peu plus faible, était attendu et est dû à la faible densité des arbres. Cependant, en raison du vent faible du sud-ouest (le long de la rue principale), il n'y a pas eu de mélange de vent de travers, et la température de la rue n'a montré aucun changement significatif. De même, dans le scénario du parc (figure 6.9C), l'impact sur la température était un refroidissement compris entre 0,40 °C et 0,80 °C, avec une petite zone à l'ombre du bâtiment montrant une diminution de la température atteignant 1,2 °C. Dans les zones où aucun arbre n'a été ajouté, la différence de température entre le scénario et la ligne de base était comprise entre -0,40 et +0,00, ce qui est considéré comme non significatif. Dans les trois scénarios, la température de l'air a diminué. Cependant, la densification de la forêt semble avoir le plus fort impact sur la température, alors que l'alignement des rues a refroidi une plus grande surface. Ainsi, en considérant la température moyenne de la zone comme une métrique, le scénario d'alignement des rues semble être la configuration la plus appropriée pour moduler la température de la ville, car elle couvre une plus grande surface. Ce résultat était attendu car le scénario a la plus grande fraction d'arbres et est conforme aux résultats de plusieurs études précédentes (Spronken-Smith et Oke, 1998 ; Hamada et Ohta, 2010 ; Duarte et al., 2015 ; Yang et al., 2018). Le quatrième scénario (figure 6.9 E) se compose essentiellement de la superposition spatiale des effets des trois premiers scénarios. Bien que le même niveau de refroidissement soit observé, la couverture spatiale s'est étendue pour couvrir l'ensemble de la zone. Nous avons créé un scénario analogue à partir des effets individuels des scénarios B, C et D, moyennés spatialement sur l'ensemble de la zone à 14h (Tableau 6.1). La similarité entre l'impact obtenu avec le scénario analogue et le scénario combiné suggère que les interactions entre l'occupation du sol et la température de l'air sont linéairement additives et peuvent donc être traitées indépendamment. Cela signifie que, pendant les journées sans vent, comme dans ces simulations, la température de chaque parcelle de terrain est déterminée par son effet de couverture végétale, qui semble être local. Cette linéarité est peu susceptible de se maintenir en cas de vents modérés, ce qui entraînera une advection horizontale de la température et son homogénéisation sur l'ensemble de la zone, ce qui suggère que les arbres à haute densité auront un effet plus fort.



**Figure 6.9 :** Résultat de la température de l'air à 14h pour : (A) le scénario de base, (B) la différence entre la température de l'air du scénario et la référence : (C) idem (B) mais pour le scénario d'alignement des arbres, (D) idem (B) mais pour le scénario parc, (E) comme (B) mais pour le scénario combiné. L'air chaud sur le bord gauche du domaine dans le scénario de base est dû à l'advection par la brise du nord provenant des habitations résidentielles chaudes en béton.

La figure 6.10 présente la variation diurne de la différence de température moyenne de la zone entre les trois premiers scénarios et le scénario de base, et révèle clairement le rôle joué par la végétation dans la modulation de la température de l'air en milieu urbain. Il est à noter que pendant la nuit, lorsque la végétation est en dormance et qu'il n'y a pas de transpiration, les trois scénarios ont à peu près la même température moyenne et sont plus chauds que la ligne de base. Cela est plus évident pour les scénarios de forêt et de parc que pour le scénario de rue. Pendant la nuit, les arbres agissent comme une barrière au rayonnement sortant à longues ondes et le piégeant dans la couche limite de surface. Dans le scénario de base, caractérisé par peu d'arbres clairsemés dans la zone boisée, une plus grande partie du rayonnement à ondes longues sortant est perdue dans l'atmosphère. En revanche, pendant la journée, lorsque les arbres sont physiologiquement actifs, les trois scénarios sont plus frais que la ligne de base, en particulier entre 14h et 16h heure locale, où le refroidissement par évaporation et l'ombrage dans le scénario d'alignement des arbres ont entraîné une moyenne de refroidissement proche de 1,2 °C. Ceci suggère que le choix des espèces d'arbres et leur densité jouent un rôle important dans le refroidissement de la température et doivent être pris en compte lors de la planification urbaine, de l'atténuation de la chaleur et de la consommation d'énergie (Bounoua et al., 2015).

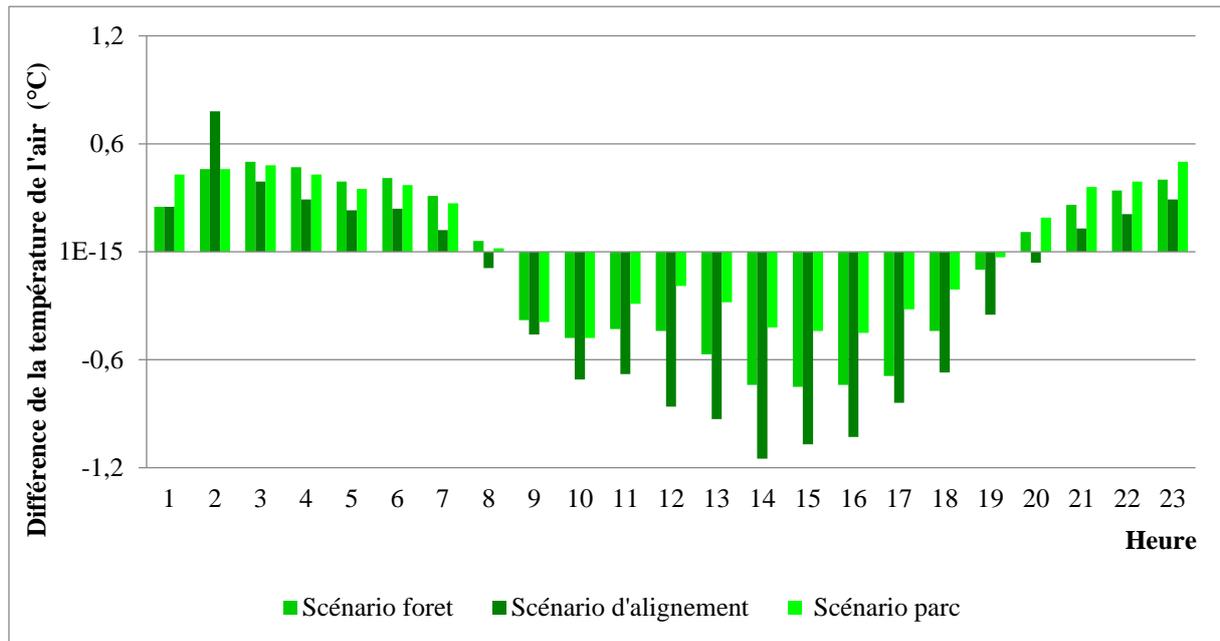
**Tableau 6.1** : Température moyenne à 14h et différence entre les scénarios et la ligne de base. La valeur de l'analogique a été obtenue en ajoutant les différences des trois scénarios (voir le texte pour plus de détails).

	Scenario de base	Foret	Alignement d'arbre	Parc	Combiné	Analog
Température	33.93	33.5	33.55	33.74	32.89	
différence de température	-	-0.43	-0.38	-0.19	-1.04	-1

### 6.1.2.2 La température moyenne radiante

L'élément principal qui influence la température radiante moyenne est l'ombrage des arbres et des bâtiments. L'ombre peut limiter la quantité de rayonnement solaire reçue par les bâtiments et les rues, réduisant ainsi la quantité de chaleur absorbée par les surfaces dures. La température radiante moyenne simulée à 14 h à l'ombre des bâtiments et des arbres varie entre 50 °C et 53 °C pendant la simulation du scénario de base. Au cours des trois scénarios, l'ajout d'arbres a entraîné un refroidissement moyen de la température radiante allant de -3,72 °C pour le scénario

du parc à  $-10,58$  °C pour le scénario d'alignement d'arbres (Tableau 6.2).



**Figure 6.10** La différence entre la température moyenne de l'air du scénario de base et les trois scénarios de végétation dans la zone sélectionnée.

La variation diurne de la MRT pour les trois scénarios (non représentés) révèle un léger réchauffement pendant la nuit et un fort refroidissement pendant la journée par rapport à la ligne de base, similairement à la température de l'air. À 14 h, la plus grande différence est observée dans le scénario d'alignement des arbres (C) avec un refroidissement maximal de la MRT de  $-10,58$ °C. Ceci s'explique par le fait que l'ombre est également répartie sur le site, ce qui entraîne une température de rayonnement moyenne plus basse. En effet, dans leur étude, Yang et al. (2018) ont montré que la végétation a un impact plus important sur la MRT que d'autres paramètres tels que l'albédo des matériaux.

**Tableau 6.2** La différence entre la température moyenne radiante du scénario de base et les trois scénarios de végétation à 14h.

Scenarior forêt	Scenarior alignement d'arbre	Scenarior parc
$-4,88$ °C	$-10,58$ °C	$-3,72$ °C

### 6.1.2.3 La température de surface du sol

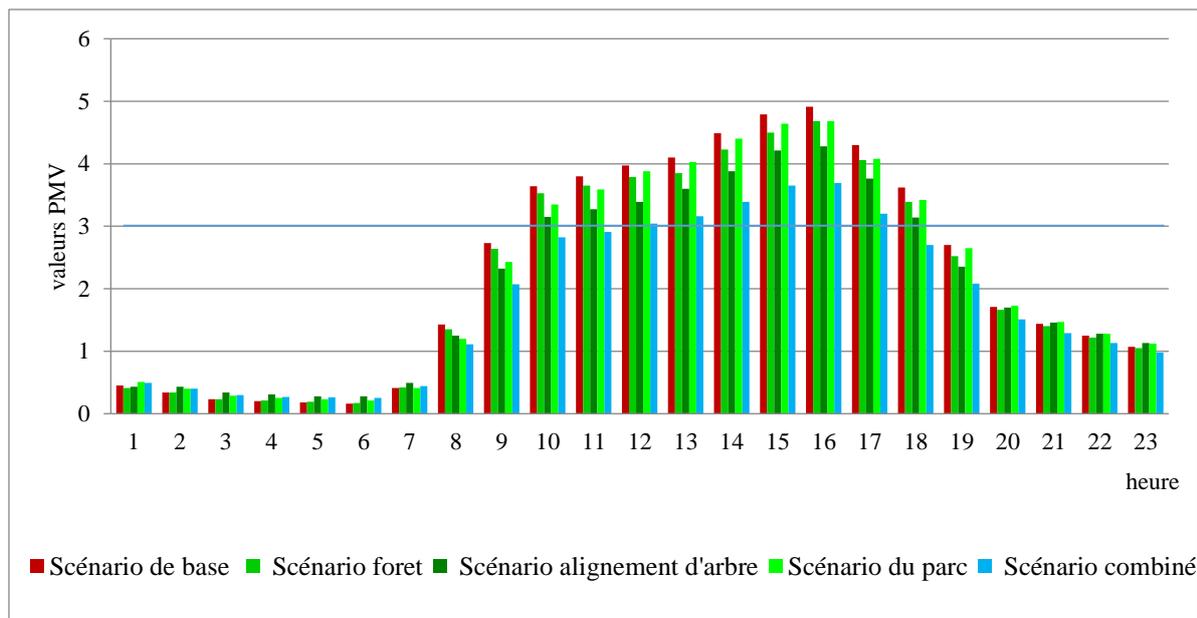
La contribution de la végétation à la réduction de la température de surface est également plus évidente. L'aménagement des arbres dans les trois scénarios a entraîné une diminution de la température de surface du sol de  $-3$ °C à  $-4$ °C, avec le scénario d'alignement des arbres

provoquant un refroidissement maximal de  $-4,2^{\circ}\text{C}$  à 14h. Cependant, il est important de noter que nos simulations ont montré une réduction de la température de surface du sol beaucoup plus faible que celle rapportée par Spangenberg et al. (2008), qui ont trouvé une diminution de  $12^{\circ}\text{C}$  de la température de surface du sol après la plantation d'arbres denses. Nous pensons que la différence d'intensité du refroidissement réside dans le rapport hauteur/largeur du canyon, qui était presque deux fois plus élevé dans l'étude de Spangenberg et al. (2008) par rapport à notre étude. Dans le scénario de base, la simulation a enregistré une température maximale de surface du sol variant entre  $53^{\circ}\text{C}$  et  $56^{\circ}\text{C}$  sur les surfaces d'asphalte, qui couvrent la majeure partie de la surface au sol du site (rues et espaces entre les bâtiments) avec très peu de végétation, à l'exception des arbres de la forêt. La différence de température de surface du sol simulée entre une allée asphaltée à l'intérieur des bâtiments dans le scénario de référence et le scénario d'alignement des arbres est de  $-3^{\circ}\text{C}$ . Dans le cas de la forêt où le sol est nu, la température de surface du sol mesurée à 14h était entre  $42^{\circ}\text{C}$  et  $44^{\circ}\text{C}$ . Après la disposition des arbres et du tapis herbacé, une diminution de  $4^{\circ}\text{C}$  a été simulée. En effet, la cité d'El Houria a été construite dans les années 1990 suite à une politique d'urbanisation mal conçue, alimentée par une augmentation rapide de la population et de la demande de logements. Cette situation a conduit à la création de quartiers denses négligeant les règles environnementales de base, telles que le choix des matériaux, les espaces verts et l'inclusion de plans d'eau dans les milieux urbains. Tout cela a contribué à créer un espace urbain avec des températures de surface élevées en été. La différence de température entre le noyau urbain imperméable et les terres végétalisées environnantes suggère un îlot de chaleur urbain d'environ  $1,2^{\circ}\text{C}$ . Il convient de noter que les îlots de chaleur urbains de surface sont relativement liés à la taille de l'aire urbaine (Li et al., 2017).

#### **6.1.2.4 Paramètre du confort thermique PMV**

La figure 6.11 montre la variation diurne des valeurs de PMV pour les quatre scénarios par rapport à la ligne de base. Pour être considéré comme neutre, le PMV doit être autour de zéro, indiquant une sensation ni chaude ni froide. Les résultats montrent que aucune des quatre simulations n'atteint le niveau de confort neutre. En effet, le seul moment où les valeurs de PMV sont comprises entre 0 et 1 est pendant la nuit, entre 1h et 7h heure locale (Figure 6.11). Ce niveau de confort nocturne est principalement déterminé par le climat ambiant et non par la composition de l'environnement urbain. Pendant cette période, les valeurs de PMV sont similaires pour tous les scénarios, y compris la ligne de base.

Il est cependant remarquable qu'à mesure que le soleil se lève, le PMV augmente rapidement pour atteindre un niveau au-delà de la valeur tolérable de 3 à 10 heures et reste élevé jusqu'à environ 18 heures pour tous les cas. Cela suggère qu'en été, dans la ville de Mostaganem, le niveau d'inconfort lié à la chaleur est élevé pendant toute la journée et une partie de la soirée, ce qui a des implications à la fois sur la santé et sur la consommation d'énergie. L'introduction de la végétation dans le site a eu pour effet global de baisser la température de l'air et donc d'améliorer relativement le niveau de confort par rapport au scénario de référence. Individuellement, le scénario d'alignement de rue semble offrir le plus de confort par rapport aux deux autres scénarios. Cependant, cela ne suffit pas à réduire l'inconfort à un niveau acceptable pendant la journée (Figure 6.11). Le quatrième scénario, qui combine les trois scénarios, conduit à des niveaux de confort bien inférieurs, avec un maximum de 3 pendant la majeure partie de la journée, sauf de 13 heures à 17 heures, suggérant que la ville doit non seulement avoir une densité d'arbres plus élevée, mais aussi des espèces d'arbres résistantes à la chaleur et à la sécheresse. La variation diurne des valeurs PMV pour tous les cas, y compris la ligne de base, renseigne sur la capacité de rétention de chaleur dans la ville. L'énergie solaire absorbée par le matériau de construction culmine vers 16 heures, et tandis que le coucher de soleil local dans la ville se produit entre 20 et 21 heures, la température reste élevée jusqu'après minuit, ce qui entraîne des PMV supérieurs à 1 dans tous les cas. Compte tenu de l'impact des scénarios de végétation et de la température de référence, il devrait être théoriquement possible d'agencer les éléments d'occupation du sol (arbres, bâtiments, plans d'eau, zones herbeuses) pour obtenir une température de surface souhaitée avec un PMV inférieur à 3 pendant le pic d'ensoleillement. On suppose que l'irrigation des arbres peut abaisser davantage la température dans tous les cas, conduisant ainsi à une valeur de PMV pour le scénario combiné qui se situe dans la plage acceptable de 1 à 2. Pour réduire l'inconfort à un niveau acceptable pendant la journée, la végétation peut être simultanément intégrée aux paramètres de la ville tels que la forme urbaine, puisque la configuration urbaine peut modifier les bilans énergétiques et influencer l'environnement thermique local (Yue et al., 2019).

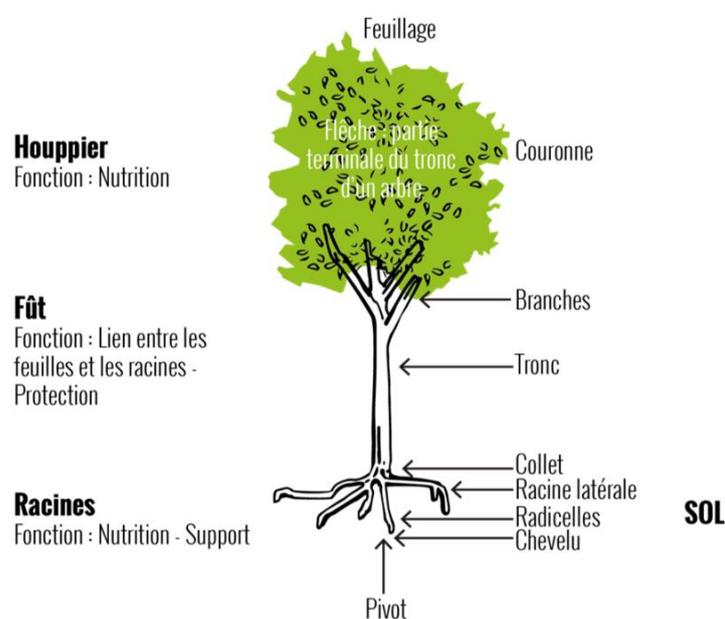


**Figure 6.11** Variation diurne du PMV pour les quatre scénarios par rapport à la référence. La ligne horizontale bleu clair représente la valeur d'inconfort la plus élevée de 3 (voir le texte pour plus de détails).

## 6.2 La simulation de l'impact du choix des essences d'arbres d'alignement des rues sur le microclimat urbain dans une partie du quartier El-Houria à Mostaganem

L'augmentation de la couverture végétale est prometteuse pour atténuer les îlots de chaleur urbains et améliorer la santé humaine ainsi que le bien-être de la population urbaine. Une couverture végétale dense peut intercepter le rayonnement solaire, fournir de l'ombre et rafraîchir l'air ambiant par évapotranspiration (Bounoua et al., 2015 ; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003 ; Shashua-Bar & Hoffman, 2000). La végétation urbaine sous ses différentes formes : pelouses, arbustes, arbres, forêts, toits et façades vertes, offre tous des services écosystémiques uniques (Hamada et Ohta, 2010 ; De Munck, 2013 ; Tan et al., 2014 ; Ossola et al., 2016 ; Mexia et al., 2018 ; Fung et Jim, 2019 ; Richards et al., 2020). Cependant, ce sont surtout les arbres urbains qui sont recommandés pour améliorer le confort thermique extérieur (Rahman et al., 2011 ; Shashua-Bar et al., 2011 ; Morakinyo et al., 2017), en raison de leur capacité à réfléchir le rayonnement à ondes courtes, à réémettre le rayonnement à ondes longues, à fournir de l'ombre et à se refroidir par transpiration. Par ailleurs, l'impact des arbres urbains sur le microclimat peut être influencé par leurs propriétés physiologiques, leur longévité, l'architecture de leurs feuillages ainsi que la forme de leurs couronnes ou houppiers (Sanusi et al., 2017) (voir la figure 6.12 qui illustre la structure d'un arbre). Dans ce contexte, le choix des essences d'arbres est important pour obtenir une meilleure efficacité dans l'atténuation des îlots de chaleur urbains. Plusieurs études se sont intéressées à cette question ; par exemple, aux États-

Unis, Souch et Souch (1993) n'ont trouvé aucune différence significative entre trois espèces d'arbres dans l'Indiana. Cependant, Sanusi et al. (2017) ont examiné l'influence de trois espèces d'arbres différentes, avec des caractéristiques de feuillage et de canopée distinctes, sur le microclimat de la rue et le confort thermique des piétons. Cette étude démontre que les rues avec des espèces d'arbres comme *Ulmus procera* et *Platanus x acerifolia* ont apporté un plus grand bénéfice au microclimat de la rue. Cette partie de notre travail s'inscrit dans cette thématique et a pour objectif d'analyser l'impact du choix du type d'arbre d'alignement sur les paramètres microclimatiques du site étudié (une partie de la cité El-Houria) et sur l'atténuation des îlots de chaleur urbains dans un contexte méditerranéen.



**Figure 6.12** La structure d'un arbre. Source : <https://arbres.grenoblealpesmetropole.fr/801-glossaire.htm>.

### 6.2.1 Le choix des types d'arbres

Cette étape consiste à choisir les types d'arbres d'alignement pour la réalisation des scénarios et l'évaluation de l'impact de chaque type sur le microclimat. En effet, le décret exécutif n° 09-67 du 11 Safar 1430 correspondant au 7 février 2009 de la République Algérienne propose une nomenclature des arbres urbains et des arbres d'alignement dans le journal officiel N° 10 (tableau 6.3). En se basant sur cette nomenclature et sur le critère de la résistance à la chaleur et à la sécheresse, notre choix s'est porté sur trois essences d'arbres d'alignement qui sont répertoriées à la fois dans cette nomenclature et dans la bibliothèque d'Albero d'ENVI-met 4.4.5. Chaque espèce présente des caractéristiques d'arbre différentes, notamment la taille des

feuilles, la forme de la couronne et la hauteur. Les trois types sélectionnés sont (tableau 6.3 et 6.4) :

- **Populus alba ou Peuplier blanc** : Cet arbre à croissance rapide fait partie de la famille des Salicacées. Sa hauteur peut atteindre 20 à 30 mètres et sa longévité peut s'étendre sur 300 ans. Il se caractérise par une silhouette ample et élancée, un tronc droit blanc verdâtre, un houppier ample et des feuilles caduques ovales à marge sinueuse vert sombre dessus et blanches dessous (tableau 6.4). Avant l'apparition du feuillage, les fleurs s'épanouissent en longs chatons compacts. Le Peuplier blanc a un grand besoin de lumière et d'une grande humidité atmosphérique pour prospérer. Il est souvent planté comme arbre d'alignement
- **Robinia pseudo-acacia ou Robinier faux-acacia** : Le robinier faux acacia appartient à la famille des Fabacées ou légumineuses et est considéré comme un arbre d'ornement. Comme le premier type, sa hauteur peut atteindre 20 à 30 mètres. Son tronc est de couleur gris brun et est souvent double. Le robinier se caractérise par un houppier assez large et des feuilles caduques de couleur vert vif, mesurant de 15 à 20 cm de long, avec de nombreuses folioles ovales, ainsi que des fleurs blanches (tableau 6.4) parfumées et très mellifères (le miel est appelé miel d'Acacia). Ces fleurs blanches apparaissent entre mai et juin. Cet arbre possède de nombreuses qualités, notamment sa résistance au froid, à la sécheresse et à la pollution, ainsi que sa facilité de culture et sa croissance rapide, etc.
- **Jacaranda mimosifolia ou Jacaranda à feuilles de Mimosa** : Un arbre qui se distingue principalement par sa floraison bleue extrêmement spectaculaire, c'est un arbre ornemental exceptionnel. Il fait partie de la famille des Bignoniacées (tribu des Jacarandées) originaire du Brésil et du sud-ouest de l'Argentine. Il est composé d'un tronc de couleur brun rougeâtre couvert de lenticelles blanches. Son feuillage caduc de type fougère est de couleur vert vif. Ses feuilles sont disposées de façon opposée et peuvent atteindre jusqu'à 50 cm de longueur, ce qui fait de cet arbre un excellent arbre d'ombrage. La Jacaranda possède des grappes de fleurs parfumées de couleur bleu lavande (tableau 6.4), elles peuvent apparaître à tout moment d'avril à août. Elles peuvent mesurer jusqu'à 5 cm de long et sont regroupées en panicules de 30 cm. La Jacaranda contient un fruit déhiscent de couleur marron en forme de cosse d'environ 5 à 7 cm. Cet arbre a une croissance rapide et légère, mais avec des taux de mortalité élevés.

### 6.2.2 La conception des scénarios

Notre étude sur l'impact de la distribution spatiale de la végétation sur le microclimat urbain dans une partie du quartier El-Houria à Mostaganem a montré que le scénario d'alignement d'arbres en bordure des rues est la configuration la plus appropriée pour abaisser la température de la ville, car elle couvre une plus grande surface avec des arbres tolérants à la chaleur et à la sécheresse.

**Tableau 6.3** Nomenclature des arbres urbains et des arbres d'alignement du journal officiel N° 10. Les arbres choisis sont soulignés en jaune. Source : journal officiel N° 10 de la république Algérienne

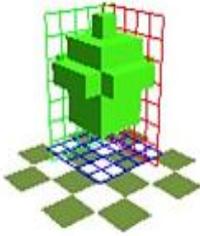
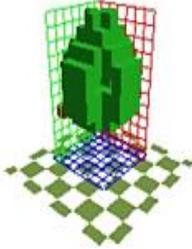
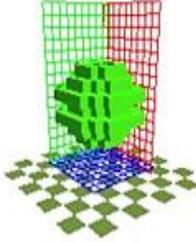
NOMBRE	NOM VERNACULAIRE	NOM SCIENTIFIQUE
1	Aulne glutineux	Alnus glutinosa
2	Catalpa	Catalpa bignonioides
3	Caroubier	Ceratonia siliqua
4	Cyprès toujours vert	Cupressus sempervirens
5	Cyprès de l'Arizona	Cupressus arizonica
6	Cyprès d'Italie	Cupressus italica
7	Eucalyptus	Eucalyptus ficifolia
8	Frêne	Fraxinus exelsior
9	Février d'Amérique	Gleditschia triacanthos
10	Grévillers	Grevillia robusta
11	Magnolia à grandes fleurs	Magnolia grandiflora
12	Melia	Melia azedarach
13	Murier blanc	Morus alba
14	Platane d'occident	Platanus occidentalis
15	Peuplier blanc	Populus alba
16	Peuplier noir	Populus nigra
17	Pin pignon ou parasol	Pinus pinea
18	Robinier faux-acacia	Robinia pseudo-acacia
19	Saule blanc	Salix alba
20	Jacaranda à feuilles de Mimosa	Jacaranda mimosifolia
21	Tamaris de France	Tamarix gallica
22	Cyprès chauve	Taxodium distichum
23	Tipa	Tipa tipuana Phúnix
24	Palmier phúnix	canariensis
25	Palmier washingtonia	Washingtonia filifera
26	Palmier cocotier	Cocos nucifera
27	Micocoulier	Celtis australis

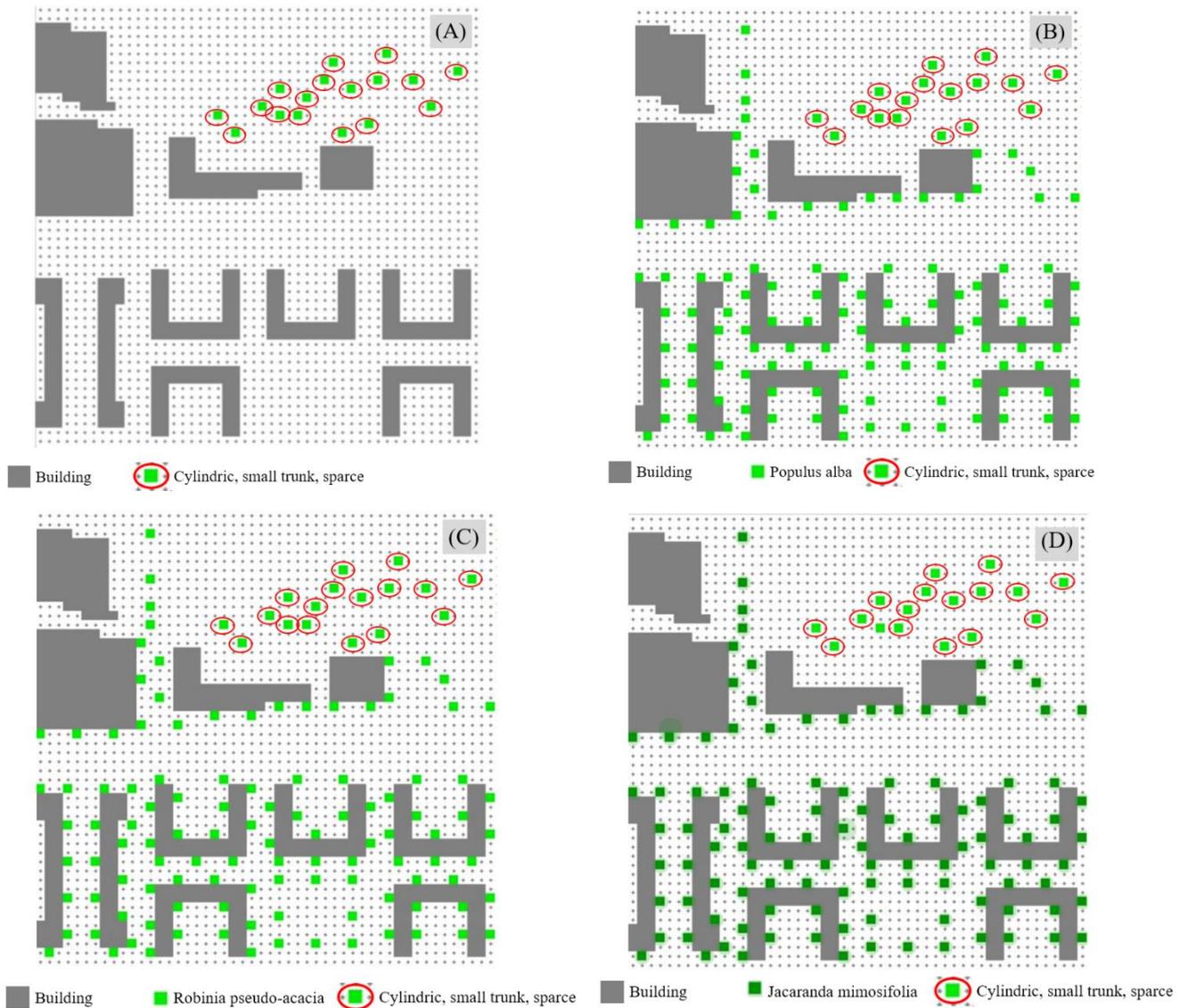
**Tableau 6.4** Forme des trois arbres choisis et de leurs feuilles.

TYPE D'ARBRE	FORME D'ARBRE	FORME DES FEUILLES
Peuplier blanc ou <i>Populus alba</i>		
Robinier faux-acacia ou <i>Robinia pseudo-acacia</i>		
Jacaranda à feuilles de Mimosa ou <i>Jacaranda mimosifolia</i>		

Dans cette partie de notre étude, nous avons conservé la même configuration d'alignement avec le même nombre et les mêmes positions d'arbres dans le quartier EL-Houria pour concevoir trois scénarios avec les trois types d'arbres choisis : *Populus alba* pour le scénario (B), *Robinia pseudo-acacia* pour le scénario (C) et *Jacaranda mimosifolia* pour le scénario (D) (tableau 6.5) (figure 6.13). Les propriétés par défaut de la bibliothèque Albero d'Envi-met pour ces arbres ont été conservées, car ils présentent des caractéristiques physiques prédéfinies (figure 6.13).

Tableau 6.5 Les propriétés dans Albéro des arbres utilisés dans les scénarios.

Populus alba (scénario B)	Robinia pseudo-acacia(scénario C)	Jacaranda mimosifolia scénario D)
		
<div data-bbox="236 734 580 1666"> <p><b>General Information</b></p> <p>ID: 0000PA Color: <span style="color: green;">■</span></p> <p>Name: Populus Alba</p> <p>Alternative Name: Silverleaf Poplar</p> <p><b>Plant geometry</b></p> <p>Height (m): 7.00</p> <p>Width (m): 5.00</p> <p>Cells: 5 x 5 x 7</p> <p>Resolution (m): 1.00</p> <p><b>Basic properties</b></p> <p>CO2 fixation type: C3-Plant</p> <p>Leaf type: Deciduous Leafs</p> <p>Foliage Shortwave Albedo: 0.70</p> <p>Foliage Shortwave Transmittance: 0.30</p> <p><b>Advanced Properties</b></p> <p>Leaf Weight [g/m<sup>2</sup>]: 100.00</p> <p>Isoprene Capacity: 12.00</p> <p><b>Root Settings</b></p> <p>Depth of roots (m): 2.00 <span>Edit root data...</span></p> <p>Diameter of roots (m): 10.00</p> <p><input type="checkbox"/> Display Root Zone</p> </div>	<div data-bbox="628 734 973 1666"> <p><b>General Information</b></p> <p>ID: 000003 Color: <span style="color: green;">■</span></p> <p>Name: Robinia Pseudoacacia</p> <p>Alternative Name: Black Locust</p> <p><b>Plant geometry</b></p> <p>Height (m): 12.00</p> <p>Width (m): 7.00</p> <p>Cells: 7 x 7 x 12</p> <p>Resolution (m): 1.00</p> <p><b>Basic properties</b></p> <p>CO2 fixation type: C3-Plant</p> <p>Leaf type: Deciduous Leafs</p> <p>Foliage Shortwave Albedo: 0.18</p> <p>Foliage Shortwave Transmittance: 0.30</p> <p><b>Advanced Properties</b></p> <p>Leaf Weight [g/m<sup>2</sup>]: 100.00</p> <p>Isoprene Capacity: 12.00</p> <p><b>Root Settings</b></p> <p>Depth of roots (m): 1.50 <span>Edit root data...</span></p> <p>Diameter of roots (m): 10.00</p> <p><input type="checkbox"/> Display Root Zone</p> </div>	<div data-bbox="1021 734 1366 1666"> <p><b>General Information</b></p> <p>ID: 0000NN Color: <span style="color: green;">■</span></p> <p>Name: Jacaranda mimosifolia</p> <p>Alternative Name: Fern Tree</p> <p><b>Plant geometry</b></p> <p>Height (m): 15.00</p> <p>Width (m): 9.00</p> <p>Cells: 9 x 9 x 15</p> <p>Resolution (m): 1.00</p> <p><b>Basic properties</b></p> <p>CO2 fixation type: C3-Plant</p> <p>Leaf type: Deciduous Leafs</p> <p>Foliage Shortwave Albedo: 0.60</p> <p>Foliage Shortwave Transmittance: 0.30</p> <p><b>Advanced Properties</b></p> <p>Leaf Weight [g/m<sup>2</sup>]: 100.00</p> <p>Isoprene Capacity: 12.00</p> <p><b>Root Settings</b></p> <p>Depth of roots (m): 2.00 <span>Edit root data...</span></p> <p>Diameter of roots (m): 10.00</p> <p><input type="checkbox"/> Display Root Zone</p> </div>



**Figure 6.13** : Scénarios réalisés : (A) - Scénario de base, (B) – Scénario du *Populus alba*, (C) – Scénario du *Robinia pseudo-acacia*, (D) – Scénario de *Jacaranda mimosifolia*.

## 6.2.3 L'analyse des résultats des simulations

### 6.2.3.1 Effet de la forme et la taille des arbres sur les rues

La plantation des trois types d'arbres de différentes formes et tailles dans les scénarios : *Populus alba* avec une hauteur de 7 m et une largeur de 5 m, *Robinia pseudo-acacia* de 12 m de hauteur et de 7 m de largeur et enfin *Jacaranda mimosifolia* de 15 m de hauteur et de 9 m de largeur, a modifié les rues du site d'étude. Les coupes réalisées au niveau des trois rues (figure 6.14) nous montrent l'importance des propriétés physiques des arbres dans cette modification.

La coupe A-A avec une largeur de rue de 36,5 m et une hauteur de bâtiments de 15 m présente un ratio de 0,14. À cet endroit, l'intégration du premier type d'arbre a peu modifié l'ouverture au ciel ou le facteur de vue du ciel. Par contre, les deux autres types d'arbres avec leurs tailles ont eu des effets plus importants que le premier. La coupe B-B représente une rue de 11,8 m de largeur et la même hauteur des bâtiments, ce qui donne un ratio de 1,27. Dans cette rue, l'intégration des arbres a eu un impact très considérable, notamment le troisième type du *Mimosifolia* qui se caractérise par un houppier large et peut influencer certains paramètres tels que : le facteur de vue du ciel, l'ombre portée sur les surfaces de la rue et des bâtiments, la réduction de la vitesse du vent, etc. Ces mêmes effets peuvent être remarqués dans la rue représentée dans la coupe C-C qui se caractérise par un ratio de 1,45, avec une largeur de 21,8 m et la même hauteur des bâtiments également.

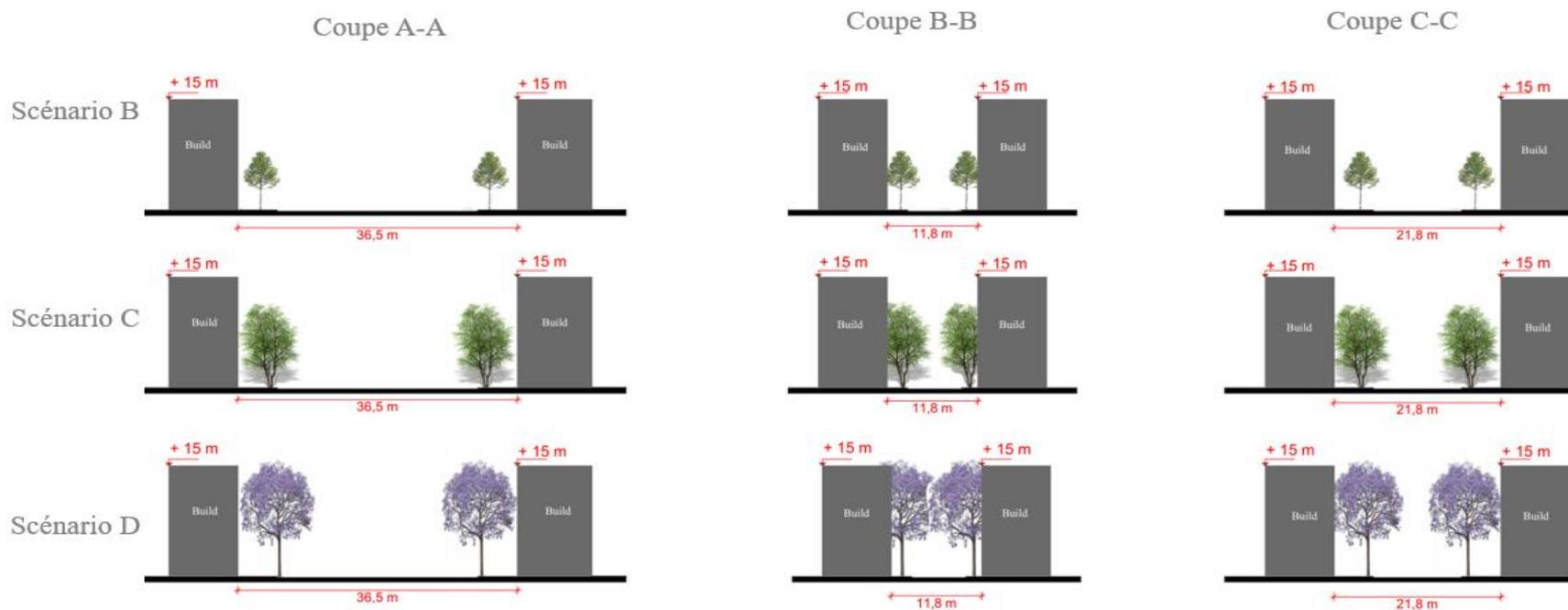
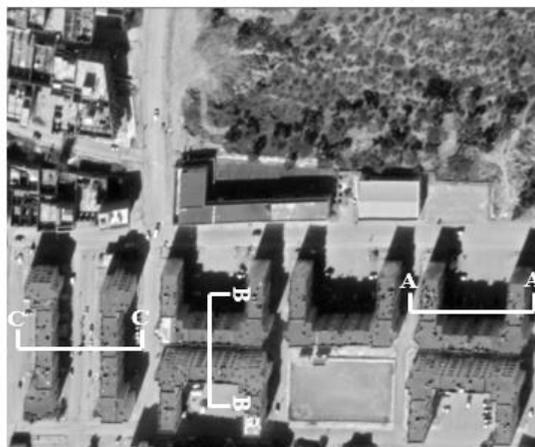
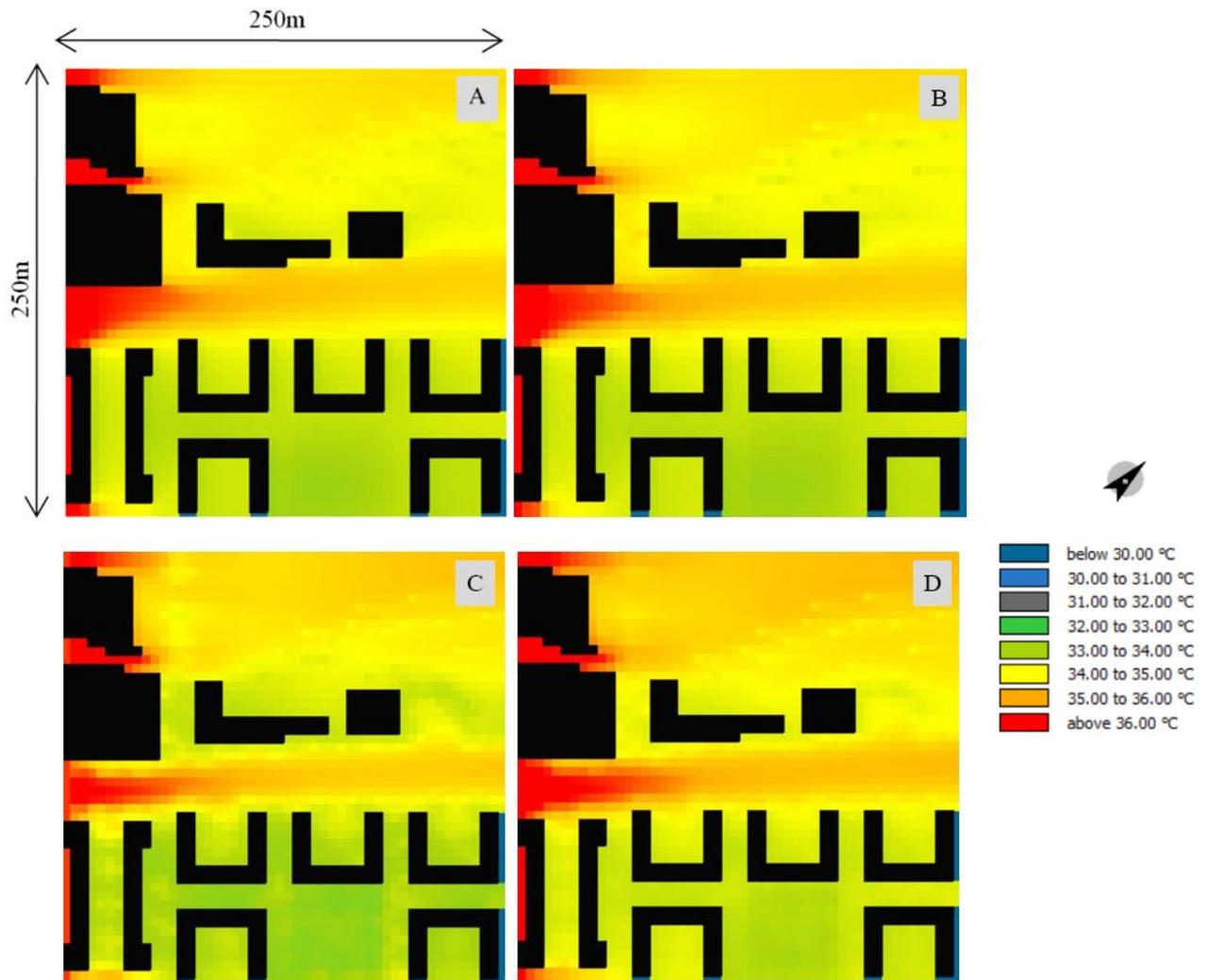


Figure 6.14 : Coupes : A-A, B-B, C-C, réalisées pour les trois scénarios : B, C, D avec les trois types d'arbres choisis.

### 6.2.3.2 Effet sur la température de l'air

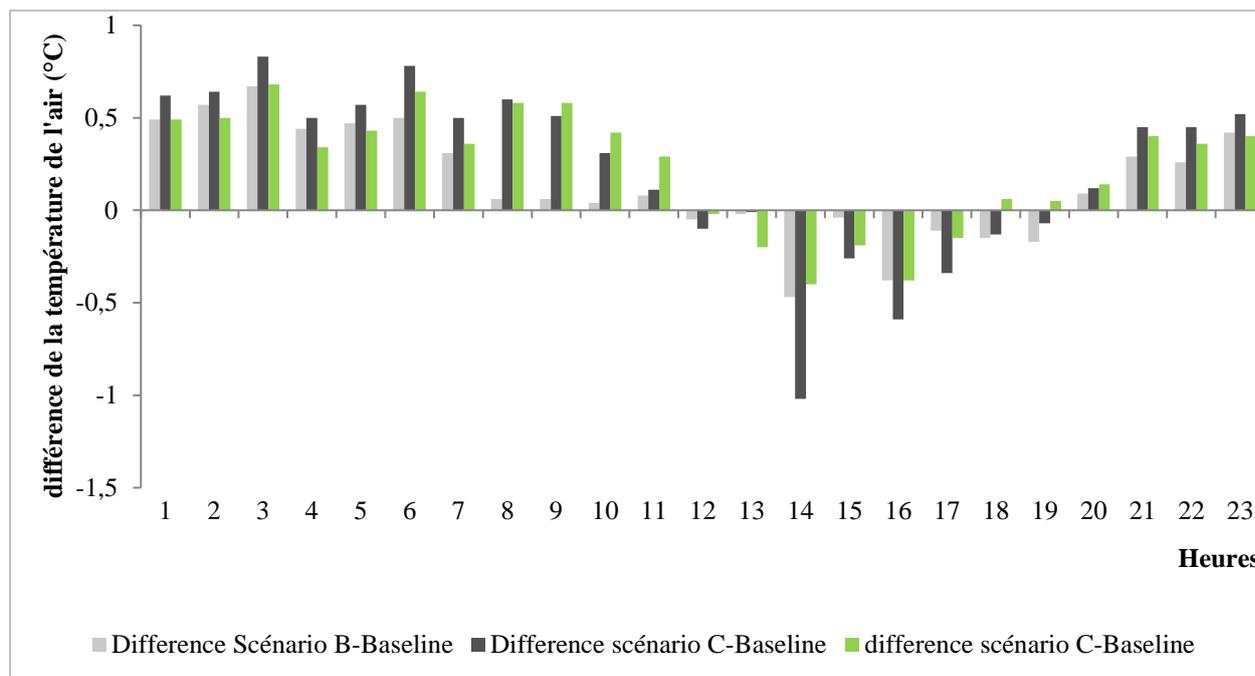
Les scénarios B et D qui ont été conçus avec les arbres *Populus alba* et *Jacaranda mimosifolia* ont eu peu d'impact sur la température de l'air. La différence est peu visible dans la figure 6.15 qui représente la distribution spatiale de la température de l'air à 14h, heure d'insolation maximale, où la température de l'air est restée presque la même que pour le scénario de base.



**Figure 6.15 :** Résultats de la température de l'air à 14h pour le scénario de base (A), le scénario du *Populus alba* (B), scénario du *Robinia pseudo-acacia* (C), et le scénario du *Jacaranda mimosifolia*.

**Tableau 6.6** Les moyennes diurne et nocturne des températures de l'aires pour tous les scenarios et les différences entre les scénarios B, C, D et le cas de base.

Heure	Air température scénario de base (Scenario A)	Populus alba trees (Scénario B)	Robinia pseudo-acacia (Scénario C)	Jacaranda (Scénario D)	Difference Scénario B-Baseline	Difference scénario C-Baseline	différence scénario C-Baseline
1	26,35	26,84	26,97	26,84	0,49	0,62	0,49
2	25,71	26,28	26,35	26,21	0,57	0,64	0,5
3	25,05	25,72	25,88	25,73	0,67	0,83	0,68
4	24,82	25,26	25,32	25,16	0,44	0,5	0,34
5	24,7	25,17	25,27	25,13	0,47	0,57	0,43
6	24,6	25,1	25,38	25,24	0,5	0,78	0,64
7	24,95	25,26	25,45	25,31	0,31	0,5	0,36
8	26,21	26,27	26,81	26,79	0,06	0,6	0,58
9	29,29	29,35	29,8	29,87	0,06	0,51	0,58
10	31,67	31,71	31,98	32,09	0,04	0,31	0,42
11	31,62	31,7	31,73	31,91	0,08	0,11	0,29
12	31,82	31,77	31,72	31,8	-0,05	-0,1	-0,02
13	32,9	32,88	32,89	32,7	-0,02	-0,01	-0,2
14	35,57	35,1	34,55	35,17	-0,47	-1,02	-0,4
15	34,99	34,95	34,73	34,8	-0,04	-0,26	-0,19
16	33,93	33,55	33,34	33,55	-0,38	-0,59	-0,38
17	34,73	34,62	34,39	34,58	-0,11	-0,34	-0,15
18	33,71	33,56	33,58	33,77	-0,15	-0,13	0,06
19	32,58	32,41	32,51	32,63	-0,17	-0,07	0,05
20	31,5	31,59	31,62	31,64	0,09	0,12	0,14
21	30,33	30,62	30,78	30,73	0,29	0,45	0,4
22	29,48	29,74	29,93	29,84	0,26	0,45	0,36
23	28,72	29,14	29,24	29,12	0,42	0,52	0,4



**Figure 6.16** La différence entre les moyennes des températures d'aire des scénarios B, C, D et le scénario de base.

Elle est comprise entre 34 et 35 °C sur la zone plantée d'arbres, et aucun changement n'a été remarqué dans la rue principale où la température dépasse toujours les 36 °C. Cependant, dans le scénario C où les arbres Pseudo-Acacia sont plantés en alignement, une diminution de 1 °C a été observée le long des alignements, et la température dans le scénario B, qui était initialement entre 34 et 35 °C dans le scénario de base (A), a enregistré des valeurs variant entre 33 et 34 °C. Une diminution de température a également été observée dans la rue principale, où des températures entre 35 et 36 °C ont été enregistrées (voir figure 6.15). Aucun impact n'a été observé dans la zone de la forêt, car les arbres utilisés dans les trois scénarios sont caractérisés par de petites feuilles, ce qui entraîne des températures de houppier plus basses (Cuny et Rathgeber, 2016).

Les données des valeurs moyennes diurnes et nocturnes calculées pour la zone d'intérêt (voir la figure 6.8) de tous les scénarios, ainsi que les différences entre les trois scénarios et le scénario de base, sont présentées dans le tableau 6.6 et la figure 6.16. Pendant la nuit, lorsque la végétation est en dormance et qu'il n'y a pas de transpiration, les trois scénarios sont plus chauds que le scénario de base. Cela est plus évident pour le scénario du Robinia pseudo-acacia que pour les deux autres scénarios. Comme déjà expliqué, pendant la nuit, les arbres agissent comme une barrière au rayonnement sortant à longues ondes et le piègent dans la couche limite de surface. En revanche, à partir de 12h, les trois types d'arbres sont physiologiquement actifs,

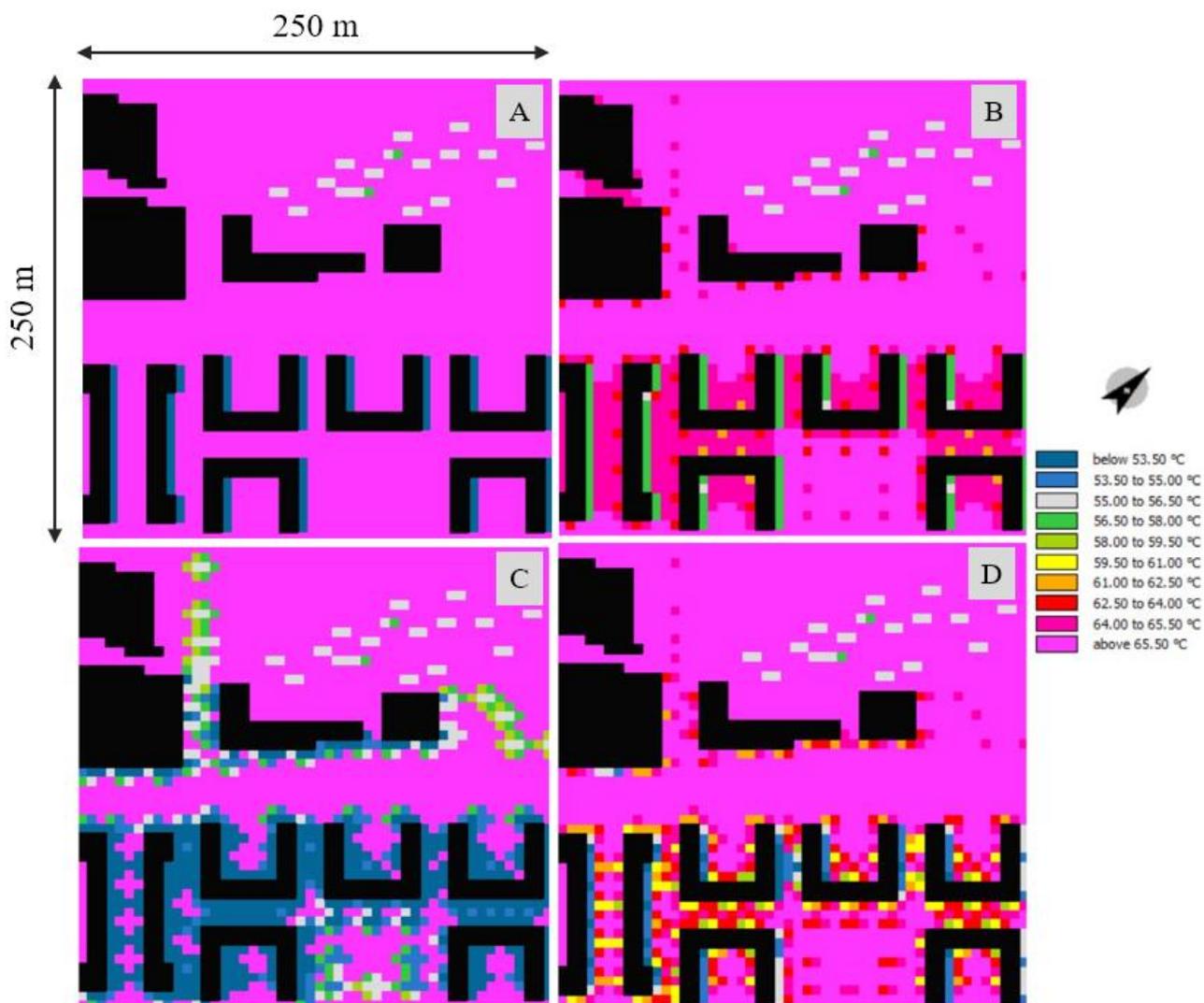
et tous les scénarios sont plus frais que le scénario de base, en particulier entre 14h et 19h heure locale, où le refroidissement par évaporation et ombrage dans le scénario du *Robinia pseudo-acacia* a entraîné une moyenne de refroidissement égale à 1°C.

### 6.2.3.3 Effet sur la température moyenne radiante

La TMR (Température Moyenne Radiante) représente un paramètre microclimatique important dans la définition du confort thermique en extérieur. La réduction de la MRT par l'ombre comprend à la fois une diminution du rayonnement direct, diffus et réfléchi du soleil en ondes courtes, ainsi que des températures de surface plus basses, entraînant une réduction du rayonnement thermique (à ondes longues) des surfaces urbaines. Plusieurs études (Duarte et al., 2015 ; Yang et al., 2018 ; Fahed, 2019) ont affirmé que l'ombre projetée par les bâtiments et les arbres influence de manière significative la Température Moyenne Radiante (TMR).

La figure 6.17 illustre la distribution spatiale de la température moyenne radiante (TMR) de tous les scénarios à 14h. Les trois types d'arbres utilisés dans les scénarios ont des formes de houppier différentes, ce qui signifie que la surface d'ombre projetée pendant la journée varie. Selon la figure 6.17, la TMR ponctuelle sous les arbres du scénario B varie entre 62,5°C et 64°C, avec une différence de -3°C par rapport au scénario de base. En revanche, le scénario C représente le scénario qui a entraîné le refroidissement le plus important, avec des valeurs de la TMR sur les alignements variant entre 53,5°C et 55°C, et dans certains alignements entre 58°C et 59,5°C, ce qui donne un écart par rapport à la ligne de base compris entre -6°C et -12°C. Dans ce scénario, la diminution est observée sur une surface plus grande et non pas uniquement ponctuelle sous les arbres. Dans le dernier scénario, la TMR varie entre 59,5°C et 61°C, et sous certains arbres, elle est comprise entre 62,5°C et 64°C, avec une différence entre -3°C et -6°C.

L'ajout d'arbres dans les rues du site d'étude a diminué le facteur de vue du ciel (SVF). Cette diminution a entraîné des températures moyennes radiantes plus basses, produisant ainsi un effet d'îlot de fraîcheur pendant les heures chaudes de l'été. Dans ce contexte, Fahed (2019) a montré dans son étude une diminution de la TMR due à la végétation atteignant une valeur de 17°C. Cependant Duarte et al (2015) ont enregistré des différences de 19.5 °C de la TMR entre des scénarios de végétalisation et un scénario de base.



**Figure 6.17** : Résultats de la température moyenne radiante à 14h pour le scénario de base (A), le scénario du *Populus alba* (B), scénario du *Robinia pseudo-acacia* (C), et le scénario du *Jacaranda mimosifolia*.

#### 6.2.3.4 Effet sur la température de surface

Selon la figure 6.18, à 14h, la température de surface dépasse les 54°C sur les surfaces d'asphalte dans le scénario de base. La plantation de *Populus alba* a permis une réduction ponctuelle de -3°C sur les arbres (Figure 6.18). En revanche, *Robinia pseudo-acacia* a créé une différence importante de -12°C (Figure 6.18). Cette différence est similaire à celle trouvée par Spangenberg et al. (2008), malgré la différence de rapport hauteur/largeur des rues. Enfin, *Jacaranda mimosifolia* a réduit la température de surface de -9°C (Figure 6.18). Les données des valeurs moyennes diurnes et nocturnes, ainsi que les différences de températures de surface entre les scénarios et le scénario de base, sont représentées dans la

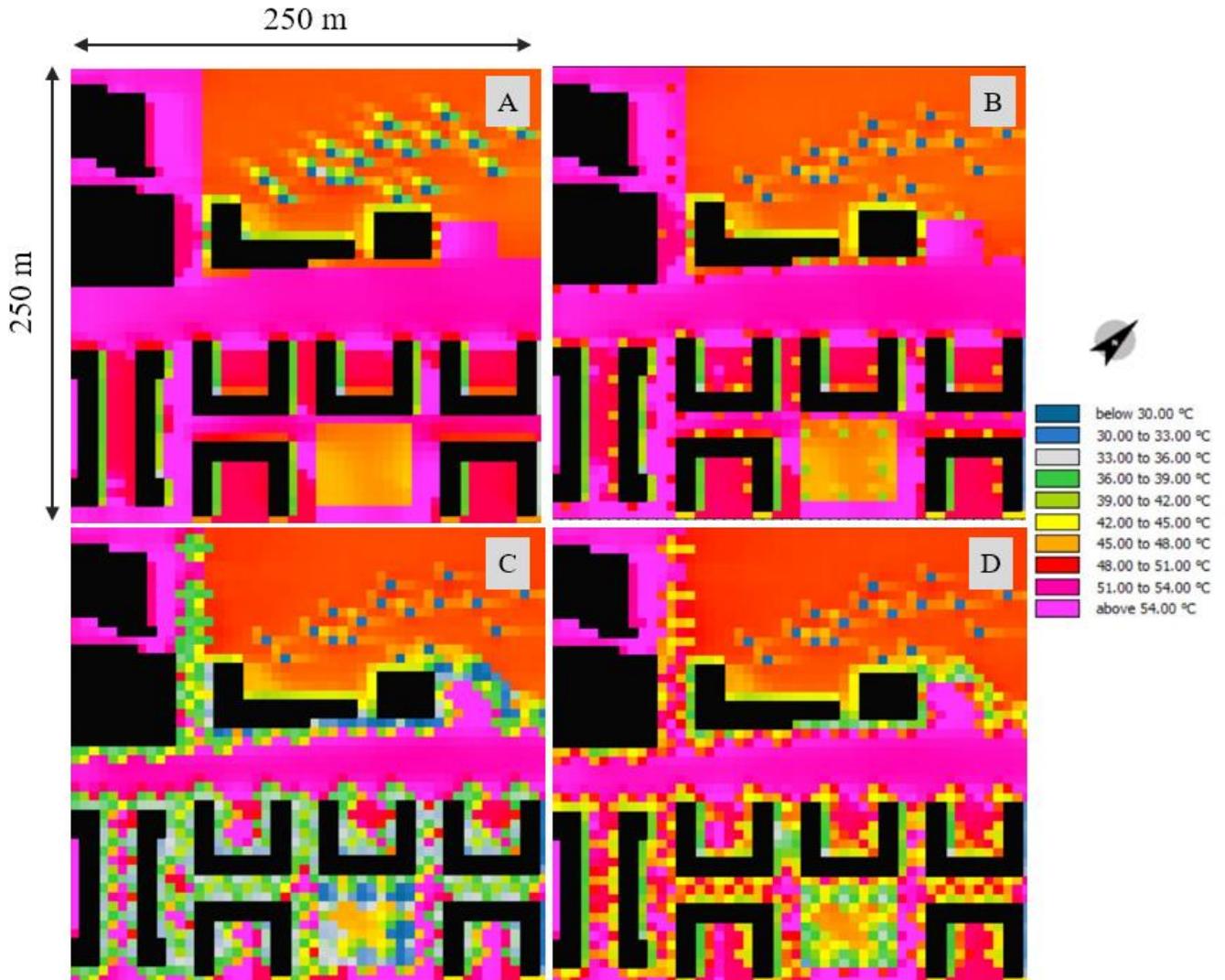


Figure 6.18 : Résultats de la température de surface à 14h pour le scénario de base (A), le scénario du Populus alba (B), scénario du Robinia pseudo-acacia (C), et le scénario du Jacaranda mimosifolia.

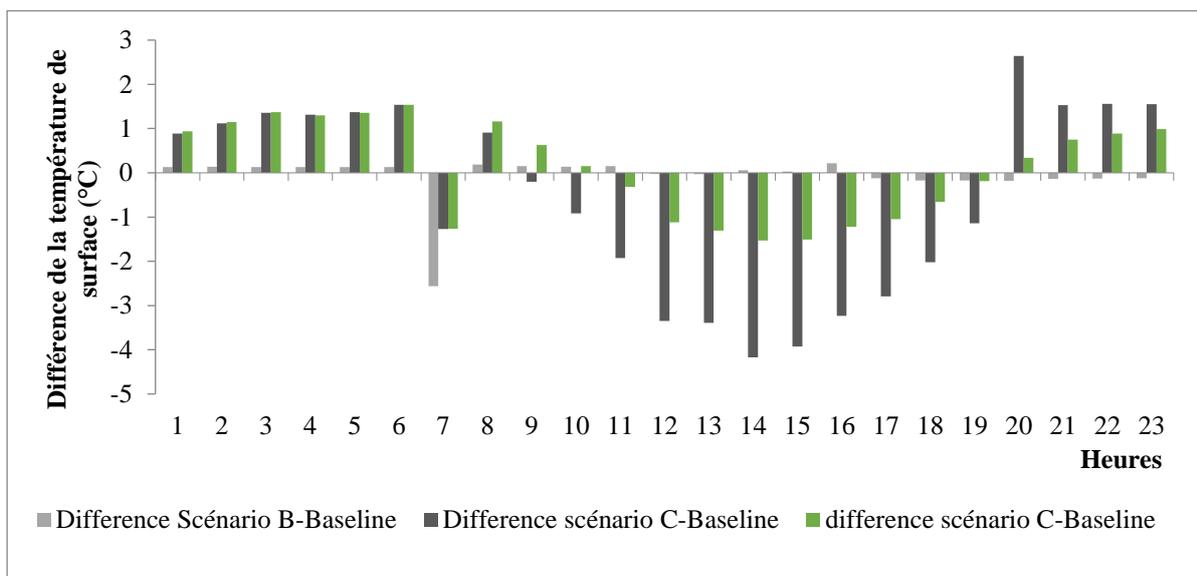


Figure 6.19 : La différence entre les moyennes des températures de surface des scénarios B, C, D et le scénario de base.

**Tableau 6.7** Les moyennes diurnes et nocturnes des températures de surface pour tous les scénarios et les différences entre les scénarios B, C, D et le cas de base.

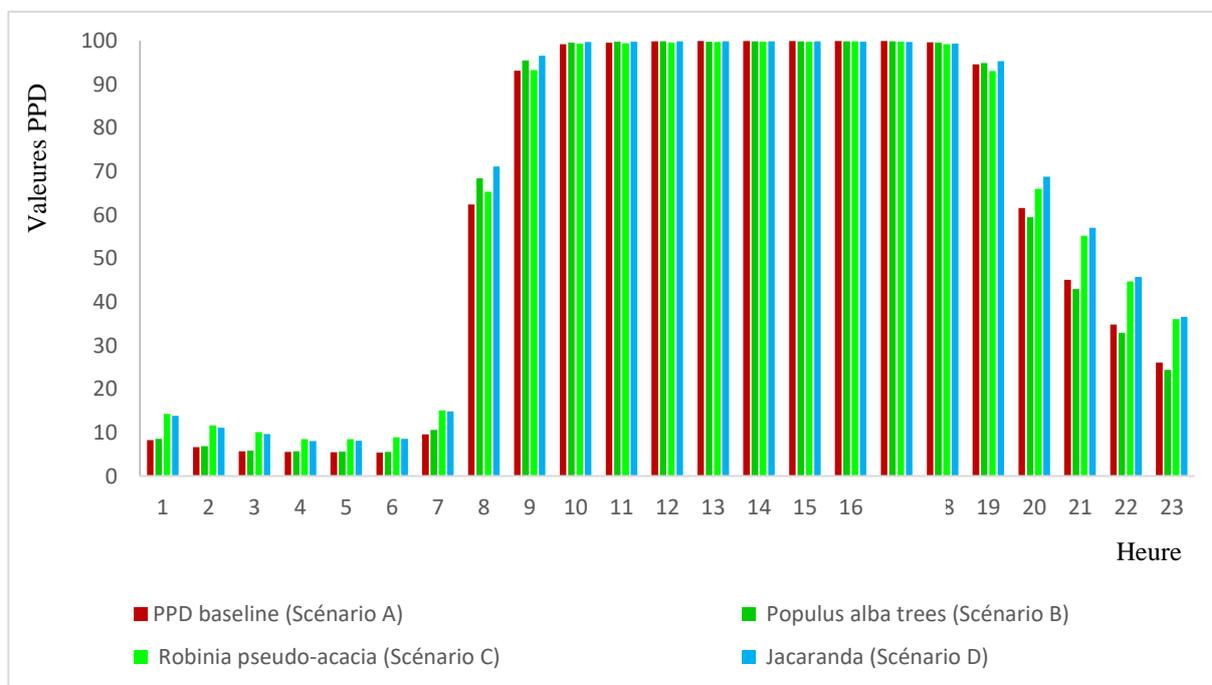
Heure	Température de surface scénario de base (Scenario A)	Populus alba trees (Scénario B)	Robinia pseudo- acacia (Scénario C)	Jacaranda (Scénario D)	Difference Scénario B-Scénario de base	Difference scénario C- Scénario de base	différence scénario C- Scénario de base
1	21,18	21,31	22,07	22,12	0,13	0,89	0,94
2	21,16	21,3	22,28	22,31	0,14	1,12	1,15
3	20,99	21,12	22,35	22,36	0,13	1,36	1,37
4	20,96	21,09	22,27	22,26	0,13	1,31	1,3
5	20,95	21,08	22,32	22,31	0,13	1,37	1,36
6	20,92	21,05	22,46	22,46	0,13	1,54	1,54
7	23,95	21,39	22,68	22,69	-2,56	-1,27	-1,26
8	24,33	24,52	25,24	25,49	0,19	0,91	1,16
9	29,54	29,69	29,34	30,17	0,15	-0,2	0,63
10	34,86	35	33,94	35,01	0,14	-0,92	0,15
11	38,57	38,72	36,64	38,25	0,15	-1,93	-0,32
12	42,45	42,43	39,1	41,33	-0,02	-3,35	-1,12
13	45,65	45,62	42,26	44,34	-0,03	-3,39	-1,31
14	48,21	48,27	44,04	46,68	0,06	-4,17	-1,53
15	49,14	49,17	45,21	47,63	0,03	-3,93	-1,51
16	47,64	47,86	44,41	46,42	0,22	-3,23	-1,22
17	44,51	44,39	41,72	43,46	-0,12	-2,79	-1,05
18	40,47	40,3	38,45	39,81	-0,17	-2,02	-0,66
19	35,99	35,82	34,85	35,8	-0,17	-1,14	-0,19
20	32,21	32,03	34,85	32,55	-0,18	2,64	0,34
21	30,37	30,23	31,9	31,12	-0,14	1,53	0,75
22	29,05	28,92	30,61	29,94	-0,13	1,56	0,89
23	27,98	27,86	29,53	28,97	-0,12	1,55	0,99

figure 6.19 et le tableau 6.7. Pour les trois scénarios, les arbres ont participé à la diminution de la température de surface pendant la journée. Cette diminution est plus évidente pour le scénario C planté par *Robinia pseudo-acacia*.

### 6.2.3.5 Effet sur le paramètre du confort thermique P.P.D

En plus des valeurs du PMV, le logiciel ENVI-met fournit les valeurs du PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui représentent le pourcentage de personnes insatisfaites des conditions climatiques données. Les valeurs du PPD ont été obtenues à partir de l'outil Bio-met en conservant les mêmes paramètres humains utilisés dans la simulation de base (voir le chapitre 05, section 5.5.5). Selon la figure 6.20 et le tableau 6.8, pour les quatre scénarios, les valeurs du PPD pendant les heures de la journée sont très éloignées d'une situation de confort thermique correspondant à un PPD inférieur à 10%. Entre 9h et 18h, le pourcentage d'inconfort atteint ses valeurs maximales de 100%.

Pendant la nuit, entre 01h et 07h, les valeurs du PPD sont légèrement supérieures à 10 pour les scénarios C et D. Pour les deux autres scénarios A et B, ces valeurs sont inférieures à 10. Cette situation de confort est essentiellement déterminée par le climat ambiant et non par la composition de l'aire urbaine. Entre 20h et 23h, on remarque que les valeurs du PPD des scénarios C et D sont supérieures par rapport au scénario de base.



**Figure 6. 20** Variation diurne et nocturne du PPD pour les quatre scénarios par rapport à la référence. La ligne horizontale bleu clair représente la valeur d'inconfort la plus élevée de 10.

**Tableau 6.8** Les moyennes d'urnes et nocturnes du PPD pour tous les scénarios et les différences entre les scénarios B, C, D et le cas de base.

Heure	PPD scénario de base (Scénario A)	Populus alba trees (Scénario B)	Robinia pseudo-acacia (Scénario C)	Jacaranda (Scénario D)	Difference Scénario B-Baseline	Difference scénario C-Baseline	différence scénario C-Baseline
1	8,27	8,56	14,28	13,81	0,29	6,01	5,54
2	6,66	6,84	11,64	11,14	0,18	4,98	4,48
3	5,72	5,84	10,09	9,63	0,12	4,37	3,91
4	5,56	5,68	8,48	8,05	0,12	2,92	2,49
5	5,48	5,61	8,44	8,08	0,13	2,96	2,6
6	5,42	5,55	8,9	8,55	0,13	3,48	3,13
7	9,54	10,57	15,1	14,87	1,03	5,56	5,33
8	62,41	68,45	65,36	71,13	6,04	2,95	8,72
9	93,13	95,51	93,3	96,57	2,38	0,17	3,44
10	99,2	99,63	99,36	99,76	0,43	0,16	0,56
11	99,62	99,8	99,42	99,84	0,18	-0,2	0,22
12	99,92	99,88	99,59	99,89	-0,04	-0,33	-0,03
13	99,94	99,82	99,77	99,87	-0,12	-0,17	-0,07
14	99,99	99,87	99,81	99,88	-0,12	-0,18	-0,11
15	99,99	99,9	99,84	99,86	-0,09	-0,15	-0,13
16	99,99	99,92	99,86	99,82	-0,07	-0,13	-0,17
17	99,98	99,9	99,81	99,74	-0,08	-0,17	-0,24
18	99,64	99,61	99,22	99,37	-0,03	-0,42	-0,27
19	94,63	94,94	93,09	95,38	0,31	-1,54	0,75
20	61,59	59,46	66,03	68,76	-2,13	4,44	7,17
21	45,07	42,97	55,19	57,04	-2,1	10,12	11,97
22	34,78	32,89	44,7	45,77	-1,89	9,92	10,99
23	26,12	24,43	36,04	36,55	-1,69	9,92	10,43

Une fois de plus, ces résultats confirment que pour obtenir une situation de confort thermique à l'extérieur de Mostaganem, il est important de manière théorique de bien agencer les différents éléments d'occupation du sol, tels que les arbres, les bâtiments, les plans d'eau et les zones herbeuses."

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, notre analyse montre que la température de l'air dans la ville de Mostaganem pendant la période estivale peut atteindre plus de 36 °C durant la journée et est fortement corrélée à l'occupation du sol. La température de surface est encore plus chaude. Dans les limites de la ville, dans les scénarios qui introduisent une végétation distribuée selon des configurations différentes, la température a diminué jusqu'à 1,20 °C.

En prenant en compte le changement moyen de température dans la zone étudiée comme critère de comparaison, nous avons constaté que le scénario d'alignement des rues était la configuration la plus appropriée pour abaisser la température de la ville, car il permettait de couvrir une plus grande surface avec des arbres résistants à la chaleur et à la sécheresse. Bien que la densification d'une forêt urbaine existante et la création d'un parc aient également réduit la température, ce n'était pas aussi efficace que le scénario d'alignement des rues. En réalité, nos résultats sont en contradiction avec une étude antérieure d'Oliveira et al. (2011), qui avait conclu qu'un parc urbain de 0,24 ha était suffisant pour influencer la température de surface. Notre scénario de parc a eu un impact plus limité.

Le rôle de la végétation dans la modulation de la température urbaine a été discuté dans plusieurs études (Duarte et al., 2015 ; Bounoua et al., 2015 ; Lachir et al., 2016). Par évapotranspiration, les arbres créent un mécanisme de refroidissement et, s'ils sont choisis de manière appropriée et plantés en abondance dans le tissu urbain, ils pourraient atténuer les îlots de chaleur urbains, réduire le risque de problèmes de santé et diminuer la consommation d'énergie. Dans cette optique, la deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude de l'importance du choix des espèces d'arbres pour le rafraîchissement urbain. Nos résultats ont prouvé que l'arbre *Robinia pseudo-acacia* a une capacité de diminution de la température de l'air de 1°C et de la température de surface de 12°C, ce qui en fait l'espèce la plus efficace pour atténuer les îlots de chaleur urbains dans la cité El-Houria par rapport aux deux autres espèces choisies : le *Populus alba* et la *Jacaranda* (Scénario D).

# CONCLUSION GENERALE



## **Conclusion générale**

Ce travail de recherche avait pour objectif principal de démontrer qu'une configuration spatiale homogène de la végétation (alignée le long des rues) permettant un meilleur rafraîchissement estival en milieu urbain dans la ville de Mostaganem, en Algérie. L'originalité de cette thèse réside dans le fait qu'elle propose une stratégie d'atténuation de la chaleur basée sur l'élément végétal, dans un îlot de chaleur urbain dans la ville de Mostaganem, en croisant deux méthodes : la télédétection et la simulation.

Cette recherche aborde la thématique de l'impact de la répartition spatiale et du choix d'espèces de végétation sur le microclimat urbain, qui est très peu traitée dans la littérature. L'outil de simulation ENVI-met utilisé dans ce travail se caractérise également par sa capacité à étudier à la fois les aspects thermodynamiques et aérauliques du microclimat urbain, tout en tenant compte des effets de la végétation.

Pour pouvoir répondre à notre question principale et démontrer notre hypothèse, le travail a été divisé en quatre parties :

L'analyse de la première partie du cadre théorique liée au concept d'ICU, nous a permis de prendre connaissance en détail des phénomènes microclimatiques urbains ainsi que de leurs causes et de la genèse de leur formation. Le bilan énergétique d'une ville comparé à celui d'une zone rurale fortement végétalisée nous a montré l'importance du rôle de l'évapotranspiration de la végétation dans l'augmentation du flux de chaleur latente. Ainsi, le remplacement de la végétation dans la ville par des matériaux à faible albédo est considéré comme la principale cause de la formation des ICU. Par conséquent, la végétalisation des villes est souvent avancée comme une stratégie pour faire face au changement climatique global.

Les processus physiques de la végétation qui impactent le microclimat urbain ont été abordés dans la deuxième partie du cadre théorique de cette thèse. L'évapotranspiration et l'ombre générée par la végétation sont les principaux mécanismes physiques qui modifient le bilan énergétique des surfaces urbaines. À la fin de cette partie, un état de l'art des études portant sur l'impact de la végétation sur les paramètres microclimatiques des villes, sous différentes formes et méthodes, a été présenté. L'analyse de cet état de l'art nous a permis de mettre en évidence les limites de ces études.

L'analyse du climat de la ville de Mostaganem a révélé que la température maximale peut dépasser les 45 °C. Cependant, les projections futures indiquent une augmentation de 2,4 °C de la température moyenne entre 2021 et 2050. Cette augmentation importante va intensifier les îlots de chaleur urbains dans la ville, surtout pendant l'été. Il est donc nécessaire d'adopter des stratégies pour lutter contre le réchauffement de la ville.

Parallèlement à cette étude du climat global de la ville, l'évolution de la présence de la végétation à travers le développement urbain a été réalisée. Cette évolution nous a montré que la majorité des espaces verts de la ville sont situés dans le tissu colonial. En revanche, les nouvelles extensions sont presque dépourvues de ces espaces verts.

Après avoir étudié le climat global et l'évolution de la végétation de la ville, nous avons analysé les températures de surface LST (land surface temperature) et l'indice de végétation par différence normalisée NDVI de la ville de Mostaganem en utilisant la télédétection. Cette partie de notre travail a été réalisée en collaboration avec Bounoua Lahouari, Professeur et directeur associé du laboratoire "Biospheric Sciences Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center", et Joseph Nigro, chercheur dans le même laboratoire. Cette étape représente une partie primordiale de notre thèse, car elle nous a permis d'examiner la relation entre la température de surface et la végétation, ainsi que de localiser les îlots de chaleur urbains (ICU) dans la ville de Mostaganem. À partir de cette localisation, nous avons choisi un ICU pour mener notre étude de simulation. En effet, l'intervention par des simulations dans un point chaud de la ville, qui représente un ICU, nous a paru très importante pour répondre à notre problématique principale : le rôle de la répartition spatiale de la végétation dans l'atténuation des ICU.

Les résultats de la température de surface en période d'été nous ont enseigné que la moyenne du LST atteint ses valeurs maximales, atteignant 45 °C au-dessus des espaces construits de la ville. Cependant, l'NDVI est le plus élevé en période d'hiver et varie entre 0,22 et 0,39, ce qui indique une présence modérée de végétation pendant cette saison. De plus, une corrélation négative importante a été observée lors de l'analyse de la relation entre ces deux paramètres. Ces résultats sont pertinents car ils mettent en évidence l'impact significatif de la végétation sur les températures de surface à l'échelle de la ville.

Dans la dernière partie de cette phase de télédétection, six îlots de chaleur urbains (ICU) ont été localisés à partir de la carte de température de surface (LST). Ces ICU se trouvent principalement dans la périphérie sud de la ville. Parmi ces ICU détectés dans la ville de

Mostaganem, celui de la Cité El-Houria a été choisi comme cas d'étude pour la réalisation des simulations.

Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel ENVI-met. Ce logiciel a été choisi pour sa grande capacité à traiter les interactions complexes entre la végétation et les éléments du bâti d'une ville, et à fournir des résultats précis à grande échelle.

Afin de calibrer le logiciel ENVI-met, il a été nécessaire de valider la simulation d'un cas réel de base par des mesures des paramètres météorologiques prises sur le terrain. Pour cela, une campagne de mesure a été menée par nos soins à l'ICU de la cité El-Houria le 25 juillet 2020. Les mesures ont été prises à l'aide d'une station météorologique de type PCE-FWS-20 et d'un thermomètre infrarouge de type FLUKE 59 MAX+. Cette journée était considérée comme une journée chaude d'été. Les résultats de la simulation du cas de base, ont montré une excellente corrélation entre les données simulées et mesurées.

Après la calibration du logiciel, l'analyse des paramètres microclimatiques de ce scénario réel a révélé que la température de l'air à 14h dépassait les 36°C, avec une température de surface atteignant un maximum de 57°C. De plus, la température moyenne radiante a dépassé les 68°C à cette même heure. Les valeurs de l'indice PMV (Predicted Mean Vote) enregistrées dépassaient la valeur tolérable de 3, ce qui indique un niveau élevé d'inconfort thermique dans les espaces extérieurs de l'ICU étudié. Cette situation d'inconfort a des répercussions sur la consommation énergétique des bâtiments dédiés à la climatisation, ainsi que sur la santé des citoyens. Dans de telles conditions, la végétation peut avoir un effet significatif dans l'atténuation de cet inconfort thermique urbain.

Une fois la simulation du cas de base validée, les simulations des différents scénarios de végétalisation ont été effectuées afin de répondre à notre objectif initial. Cette dernière partie de notre travail s'est concentrée sur deux axes : la simulation de l'impact de la configuration spatiale de la végétation urbaine sur l'atténuation de l'ICU étudié, et la simulation de l'effet du choix des espèces d'arbres pour obtenir un meilleur rendement d'atténuation de l'ICU.

Les résultats de ces simulations ont montré que le scénario des alignements d'arbres dans les rues représente la configuration la plus appropriée pour abaisser la température de l'aire de l'ICU étudié, avec une diminution de 0.8 °C. Ce scénario couvre une plus grande surface avec des arbres tolérants à la chaleur.

Pour l'impact du choix d'espèce d'arbre sur le scénario d'alignement des rues, trois arbres ont été sélectionnés. Il s'agit de :

- *Populus alba* ou Peuplier blanc
- *Robinia pseudo-acacia* ou Robinier faux-acacia
- *Jacaranda mimosifolia* ou Jacaranda à feuilles de Mimosa

Les résultats ont prouvé que l'arbre *Robinia pseudo-acacia* a eu un meilleur impact sur le microclimat étudié par rapport aux deux autres types. En effet, il a entraîné une diminution de la température de l'air d'un degré celsius et de la température de surface de 12 degrés celsius. Les platanes qui ont été utilisés dans la première section ont également montré une performance considérable en ce qui concerne la température de l'air, avec une diminution de 0,8 degré celsius.

Enfin, nos résultats de simulation ont permis de répondre à la question de recherche et de valider l'hypothèse de départ. Nous avons confirmé que les alignements d'arbres dans les rues représentent la configuration spatiale la plus appropriée pour l'atténuation des îlots de chaleur urbains à Mostaganem, comparée aux autres configurations (parc et forêt urbaine). Cette configuration est encore plus efficace en utilisant des arbres tels que le *Robinia pseudo-acacia* qui s'adaptent au microclimat de la zone étudiée.

Toutefois notre travail présente des limites. En effet, certains aspects tels que les obstacles de croissance des arbres dans un environnement urbain, l'ombre portée par les bâtiments qui limite l'énergie solaire nécessaire à la photosynthèse et à l'évapotranspiration des arbres, la pollution urbaine, les obstacles de croissance des racines, n'ont pas été pris en compte lors des simulations effectuées dans notre travail. Il est donc essentiel de prendre en compte ces conditions urbaines réalistes dans des études futures.

## **Perspectives**

L'étude présentée dans cette thèse sur l'impact de la distribution spatiale de la végétation dans l'atténuation des îlots de chaleur urbains a mis en évidence des résultats encourageants. Toutefois, ces résultats doivent être approfondis et explorés dans d'autres études de cas réels. Par conséquent, la configuration d'alignement d'arbres proposée comme solution de rafraîchissement urbain dans un climat méditerranéen peut être étudiée dans d'autres conditions climatiques pour consolider nos résultats.

En effet, dans un contexte de températures élevées en été et de forts épisodes de sécheresse, le stress hydrique des plantes peut limiter leur croissance et impacter leur évapotranspiration. Cela peut réduire leur capacité à rafraîchir l'environnement urbain. Pour une meilleure quantification des ressources en eau réservées à la végétation urbaine, il est essentiel de prendre en compte l'hydrologie dans des simulations futures. Cela permettra de garantir le maintien de leur pouvoir rafraîchissant pendant la saison estivale.

Les toitures et les façades végétales sont des dispositifs végétaux différents des arbres en ville. Ces dernières années, ces deux dispositifs ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Certaines recherches ont montré que la toiture végétale procure un effet limité sur le climat urbain et le confort thermique extérieur, mais elle peut avoir un impact considérable en période estivale sur la consommation énergétique des bâtiments difficiles à isoler. En revanche, la façade végétale est considérée comme efficace pour les bâtiments très hauts, qui ne bénéficient pas de l'ombre portée par les arbres d'alignement dans les rues. L'effet des toitures et des façades végétales sur le climat urbain représente une perspective essentielle de notre travail de thèse, car il n'a pas fait l'objet de recherche dans le contexte des villes algériennes.

Enfin, pour obtenir des résultats dans des prochaines études plus précis et significatifs avec ENVI-met, il est recommandé d'introduire davantage de données d'entrée en utilisant le forçage complet (voir le chapitre 04) du logiciel, qui nécessite plus de données expérimentales que le forçage simple.

## Bibliographie

- Achour-Bouakkaz Nawel., 2006. La Relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bati : cas de la ville d'Alger. Thèse de magister.
- Admi, 2015. L'Algérie est un pays à fort risque de changement climatique. Algérie 360.
- Akbari, Hashem & Taha, Haider, 1992. "The impact of trees and white surfaces on residential heating and cooling energy use in four Canadian cities," *Energy*, Elsevier, vol. 17(2), pages 141-149.
- Akpinar, A., 2016. How is quality of urban green spaces associated with physical activity and health? *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 76–83.
- Alberti, Marina., 2008. *Advances in urban ecology. Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. Seattle, Washington, USA: Springer US.
- Alexabdri, E., Jones, P., 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480-493.
- Ali-Toudert F., 2005. *Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate*, PhD thesis, Freiburg, Germany.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108.
- Alonso, L., 2017. *Caractérisation des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains lyonnais à l'aide de mesures satellitaires, mobiles et participatives*. Mémoire de Master. Université Lyon III.
- Ambast, S.K., Keshari, A.K., Gosain, A.K., 2008. Estimating Regional Evapotranspiration Using Remote Sensing: Application to Sone Low Level Canal System, India. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134, 13-25.
- Anderson, M.C., Allen, R.G., Morse, A., Kustas, W.P., 2012. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment* 122, 50-65.
- Angel, S., S. C. Sheppard, and D. L. Civco. 2005. *The dynamics of global urban expansion*. In *Transport and Urban Development Department*. The World Bank, Washington D.C, USA, 18p.
- Anquetil et al., 2014. *Présence végétale en ville : quelle connaissance ?* In : *Une ville verte, les rôles du végétal en ville*. Editions Quæ.
- APUR. 2012, *Les îlots de chaleur urbains à Paris*. Phase 1. Décembre 2012.
- Armson, D., 2012. *The effect of trees and grass on the thermal and hydrological performance of an urban area*, these de doctorat, université de Manchester, Royaume-Uni, 133p.
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R., 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(3), 245–255.
- Arnaud, R., 1968. Mostaganem. Ville Française entre 1833-1962. *Echo de l'Oranie*. N° 42.
- ASHRAE., 2009, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers Inc.

- Athamena, K., 2012. Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartier. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Nantes.
- Azam, M-H., 2021. "Simulation du bâtiment au quartier : Exploration du potentiel de la PGD paramétrique comme méthode de réduction de modèles pour des calculs précis et rapides." Thèse de Doctorat. Université de Nantes.
- Bachir, N., Bounoua, L., Aiche, M., Maliki, M., Nigro, J., & El Ghazouani, L., 2021. The simulation of the impact of the spatial distribution of vegetation on the urban microclimate: A case study in Mostaganem. *Urban Climate*, 39, 100976.
- Bacour, C., 2001. Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectances : analyses de sensibilité comparatives et configuration optimales, pp. 228, Université Paris 7.
- Bandeem, W.R., Hanel, R.A., John, L., Stampfl, R.A., Stroud, W.G., 1961. Infrared and reflected solar radiation measurements from the TIROS II meteorological satellite. *J.geophys. Res.*, 65, 3169-3185.
- Bannehr, L., Luhmann T., Piechel, J., Roelfs, T., Schmidt, A., 2011. Extracting roof parameters and heat bridges over the city of Oldenburg from hyperspectral, thermal, and airborne laser scanning data. In: ISPRS Hannover, Allemagne, ISPRS, vol. XXXVIII-4/W19, 17-22, C.Heipke, K. Jacobsen, F. Rottensteiner, S. Muller et U.Sorgel édit.
- Barthélémy, M. 2020. La croissance des villes vue par la physique statistique. *Reflets de la Physique* n° 67.
- Barton, I. J., 1992. Satellite-derived Sea Surface Temperatures-A Comparison between Operational, Theoretical, and Experimental Algorithms. *Journal of Applied Meteorology*, 31(5), 433–442.
- Benejam, A., 1977. Il y a un demi-siècle...Moastaganem. Le cauchemar d'une nuit. *Echo de l'Oranie*. N° 132.
- Benhadj, I., 2008. Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech. Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- Benharkat, S et Rouag-Saffidine, D., 2016. "Approche adaptative du confort thermique dans les espaces d'enseignement universitaire à Constantine (Algérie)," *Nature and Technology*, vol. 14, pp. 19–28.
- Benmecheta, A., 2017. Contribution à l'étude des problèmes de l'environnement intégrant la télédétection et modélisation des processus environnementaux. Thèse de doctorat. UNIVERSITE ORAN 1 - AHMED BEN BELLA (UNIVERSITE ES-SENIA).
- Bentekhici, N., Youcefi, D.J., 2013. Analyse de l'étalement urbain de la ville de Mostaganem à l'aide des données satellitales multi-dates. *Bulletin des sciences géographiques*. Volume 2. Numéro 28, 51–62.
- Benyagoub, E.B., 2011. Reconversion des friches industrielles dans la perspective d'un développement durable : Le cas de la ville de Mostaganem. Thèse de Magister. Université Abd El Hamid Ibn Badis Mostaganem.
- Birky, A. K., 2001. NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics. *Ecological Modelling*, 143(1-2), 43–58.
- Boucherf, D., 2004. Les changements climatiques en Algérie. ONM Alger.

- Bouchef, D., 2010. Etude spatio-temporelle et prévision saisonnière des températures sur le Nord de l'Algérie. thèse de magister, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene.
- Bouketta, S., Bouchahm, Y., 2012. L'effet de la géométrie urbaine sur l'écoulement du vent et la ventilation naturelle extérieure. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°4 (2012) 639 – 659.
- 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, Université Mohamed Khider - Biskra.
- Boukhelkhal, I., & Bourbia, P. F. (2016). Thermal Comfort Conditions in Outdoor Urban Spaces: Hot Dry Climate -Ghardaia- Algeria. *Procedia Engineering*, 169, 207–215.
- Boulaine, J., 1955. Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie au 1/200.000. Feuille de Mostaganem n°21. Pédologie – CS, n°6, Alger.
- Bounoua, L., Nigro, J., Zhang, P., Thome, K., Lachir, A., 2018. Mapping urbanization in the United States from 2001 to 2011. *Appl. Geogr.* 90, 123–133.
- Bounoua, L., Safia, A., Masek, J., Peters-Lidard, C., Imhoff, M.L., 2009. Impact of urban growth on surface climate: a case study in Oran, Algeria. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48 (2), 217–231.
- Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., Toure, A.M., 2015. Impact of urbanization on US surface climate. *Environ. Res. Lett.* 10 (8), 084010.
- Bounoua, L., Zhang, P., Nigro, J., Lachir, A., Thome, K., 2017. Regional impacts of urbanization in the United States. *Can. J. Remote. Sens.* 43 (3), 256–268.
- Bouyer J., Musy M., Huang Y., and Athamena K., 2009. Mitigating Urban Heat Island Effect by Urban Design: Forms and Materials, Fifth Urban Research Symposium.
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. *Energie électrique*. Université de Nantes.
- Bowden, L.W., 1975. Urban environments: inventory and analysis. *Manual of Remote Sensing*, first edition (American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia).
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.
- Bozonnet, E., 2005. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle.
- Braden, H., 1982. Simulationsmodell für den wasser- energie- und stoffhaushalt in pflanzenbeständen. *Rep. Inst. Meteorol. Uni. Hannover*, 23.
- Brun, S., Band, L., 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(1), 5–22.
- Brunet, Y., 2016. Impact de la végétation sur le microclimat urbain et la qualité de l'air. *La chimie et les grandes villes*. Pp. 218-233.
- Bruse, M., H. Fler., 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model, *Environ. Modell. Softw.*, 13, 373-384 (PDF) Numerical modeling of the urban climate - a preview on ENVI-met 4.0.
- Ca, V. T., Asaeda, T., & Abu, E. M., 1998. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park. *Energy and Buildings*, 29(1), 83–92.

- Cao, X., Onishi, A., Chen, J., Imura, H., 2010. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape Urban Plann.* 96 (4), 224–231.
- Carlson, T.N., 1986. Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements. *Remote Sensing Reviews*, 1, pp. 197–247.
- Carmona, M., Heath, T., Oc, T., & Tiesdell, S., 2003. *Urban Spaces-Public Places: The Dimensions of Urban Design*. Oxford : Architectural Press.
- Cavayas F. et Baudouin Y., 2008. Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM, Volets 1 et 2 : Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005). Conseil Régional de l'Environnement de Laval 123p.
- Chandler, T. J., 1962. London's Urban Climate. *The Geographical Journal*, 128(3), 279.
- Chang, C.-R., Li, M.-H., & Chang, S.-D., 2007. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 386–395.
- Chen-Yi S., 2012. The cool effect of green space in a tropical city, Taipei. In: proceedings of 8<sup>th</sup> international conference on urban climate and 10<sup>th</sup> Symposium on the Urban Environment, 8-10 aout 2012, Dublin, Irlande, paper 459, international Association for urban climate and américain Meteorological Society's board of the Urban Environment.
- Choay, Françoise. 1965. *Urbanisme, utopies et réalités. Une anthologie*, Paris : Seuil.
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., de la Riva, J., Pérez, F., 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment* 92, 322-331.
- Coll, C., Caselles, V., Galve, J.M., Valor, E., Niclòs, R., Sánchez, J.M., Rivas, R., 2005. "Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 97, no. 3, pp. 288–300.
- 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 de l'Université Paris-Est, 539 pages.
- Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988. [www.institut-numerique.org](http://www.institut-numerique.org).
- Cordeau, E., 2014. La vulnérabilité de la ville à la chaleur par l'approche Zones climatiques locales, Note rapide, n°661, IAU.
- Cramer, W., Guiot, J., Marini, K., 2019. Risks associated to climate and environmental changes in the Mediterranean region. *MedECC*.
- Cuny, H. E., & Rathgeber, C. B. K., 2016. Xylogenesis: Coniferous Trees of Temperate Forests Are Listening to the Climate Tale during the Growing Season But Only Remember the Last Words! *Plant Physiology*, 171(1), 306–317. doi:10.1104/pp.16.00037
- Da Cunha, A., 2009. Introduction : urbanisme végétal et agriurbanisme. La ville entre artifice et nature, Urbia : urbanisme végétal et agriurbanisme. URL : [http://www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/URBIA/urbia\\_08/urbia\\_08\\_complet.pdf#page=46](http://www.unil.ch/webdav/site/ouvdd/shared/URBIA/urbia_08/urbia_08_complet.pdf#page=46).

- Dania, M. A., Abdulsalam, A. S, Nabeel Y. A., 2015. Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption - The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate. *American Journal of Environmental Engineering*. 5(5) : 131-140.
- Daniel Kunzi, blvdr., 2019. In : Plan stratégique de végétalisation en ville. Département de l'environnement urbain et de la sécurité, Ville de Genève.
- De Munck, C., 2013. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse de doctorat. L'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT).
- De Munck, C., Lemonsu, A., 2014. CNRS/Météo France. Les stratégies de végétalisation pour aider la ville à faire face à la canicule. *Rapp. tech.* 1– 6, 662.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the Urban Environment: Microclimatic Analysis and Benefits. *Energy Build*, 35, 69-76.
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76.
- Document APPA Nord-Pas de Calais., 2014. Végétation urbaine, les enjeux pour l'environnement et la santé.
- Doick, K. J., Peace, A., & 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.
- Donnay, J.-P., Barnsley, M.J., & Longley, P.A. (Eds.), 2000. *Remote Sensing and Urban Analysis: GISDATA 9* (1st ed.). CRC Press.
- Doulos, L., Santamouris, M., & Livada, I., 2004. Passive cooling of outdoor urban spaces. The rôle of Materials. *Solar Energy*, 77(2), 231–249.
- Du Plessis, W. P., 1999. Linear regression relationships between NDVI, vegetation and rainfall in Etosha National Park, Namibia. *J. of Arid Environments*, 42, 235-260.
- Duarte, D.H.S., Shinzato, P., dos Gusson, C.S., Alves, C.A., 2015. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance-built density in a subtropical changing climate. *Urban Clim.* 14, 224–239.
- El'Atari, A. ; ABOU F., 2015. Ilot de chaleur urbain, université de Tanger, Maroc.
- Erell E., Pearlmutter D., Williamson T., 2011. *Urban Microclimate Designing the Spaces between Buildings*, New York.
- Ewa BEREZOWSKA-AZZAG., 2011. *Projet Urbain, Guide méthodologique. Volume 1 : Connaître le contexte de développement durable.* Collection Urbanisme, Editions Synergie, Alger, 245 p.
- Ewa BEREZOWSKA-AZZAG., 2016. L'Algérie et la COP21, espoirs et déceptions. *Newsletter VUDD n°2.*
- Fabbri, K., 2015. *Indoor Thermal Comfort Perception A Questionnaire Approach Focusing.* Switzerland : Springer.
- Faci, M., Matari, A., 2017. Contribution à l'étude des canicules en Algérie (Cas d'Oran et de Béchar). *International Journal of Innovative Technical and Applied Science.* 1 (2017) 001–01.
- Fahed, J., 2019. Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des ilots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.

- Faisal, A.-A., Kafy, A.-A., Al Rakib, A., Akter, K. S., Jahir, D. M. A., Sikdar, M. S., ... Rahman, M. M., 2021. Assessing and predicting land use/land cover, land surface temperature and urban thermal field variance index using Landsat imagery for Dhaka Metropolitan area. *Environmental Challenges*, 4, 100192.
- Fanger, P., 1972. *Thermal Comfort*. New York, USA : McGraw Hill place City Book.
- Fanger, P., 1982. *Thermal comfort*. Malabar, FL, USA: Robert E. Krieger Publishing Company.
- Fanger, P.O. ,1970. *Thermal Comfort*. Danish Technical Press. Copenhagen.
- Farah, A., 2014. *Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien*. Thèse de magistère.
- Feng C., Meng Q., Zhang Y., 2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and buildings*, 42 (6), 959-965.
- Fischer, E. M. and Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves', *Nature Geoscience*, 3(6) 398–403.
- Fischetti, M., 2008. Green roofs, living cover, *Scientific American*, Vol. 298, pp. 104-105.
- Foissard, X., 2015. *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennais*. Thèse de Doctorat. Préparée à l'Unité Mixte de Recherche 6554 CNRS LETG Rennes COSTEL, Université Rennes 2 Haute- Bretagne.
- Fouzia, B., Fatiha, B., 2011. Impact de la conception des rues sur le droit d'ensoleillement des façades et le confort thermique - cas d'un milieu semi-aride. *The égyptian Journal of Environmental change*. Volume 3. Number 1.
- Franck, G., Yves, B., 2015. *Euroméditerranée-Marseille : Un projet urbain face au changement climatique*. In *Villes et changement climatique, îlots de chaleur urbains*. Edition Parentheses Eds.
- Fung, C.K.W., Jim, C.Y., 2019. Microclimatic resilience of subtropical woodlands and urban-forest benefits. *Urban For. Urban Green*. 42 (May), 100–112.
- Gamon, J.A., Huemmrich, K.F., Peddle, D.R., Chen, J., Fuentes, D., Hall, F.G., Kimball, J.S., Goetz, S., Gu, J., McDonald, K.C., Miller, J.R., Moghaddam, M., Rahman, A.F., Roujean, J.L., Smith, E.A., Walthall, C.L., Zarco-Tejada, P., Hu, B., Fernandes, R., References 135 Cihlar, J., 2004. Remote sensing in BOREAS: Lessons learned. *Remote Sensing of Environment* 89, 139-162.
- García, M., Chuvieco, E., Nieto, H., Aguado, I., 2008. Combining AVHRR and meteorological data for estimating live fuel moisture content. *Remote Sensing of Environment* 112, 3618-3627.
- Gaston, Kevin J, dir., 2010. *Urban Ecology*. Ecological Reviews.s.l.: Cambridge University Press.
- Gaudillière J-P., 2005. Pour une ville durable : entretien avec Cyria Emelianoff. *Mouvements*, 4(41), 57-63.
- Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., & Ghaffarianhoseini, A., 2015. Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates. *Building and Environment*, 87, 154–168.
- Ghezloun, A., 2021. Les engagements de l'Algérie dans sa lutte contre les changements climatiques. *Bulletin des Energies Renouvelables* N° 51.
- Givoni, B., 1978. *L'Homme, l'Architecture et le Climat*, Paris, Éditions du Moniteur, p.460.
- Greuillet, C. et Galsomies, L., 2013. L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air. *Pollution atmosphérique*, Numéro spécial, 163-172.

- Guillaume G., Aumond P., Gauvreau B., Dutil-leux G., 2014. Application of the transmission line matrix method for outdoor sound propagation modelling – Part 1: Model presentation and evaluation. *Applied Acoustics*, 76, 113-118.
- Guillot, G., 2008. Du paradis à Dream Park, les jardins dans le monde arabe : Damas, Le Caire, Rabat. *Annales de géographie*, Armand Colin, 2006, pp.409-433.
- Haack, B., S. Guptill, R. Holz, S. Jampoler, J. Jensen, and R. Welch., 1997. Chapter 15: Urban Analysis and Planning, *Manual of Photographic interpretation*, American Society for photogrammetry & Remote Sensing, Bethesda, Maryland, pp. 517-553.
- Hamada, S., & Ohta, T., 2010. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on the surrounding urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, 9, 15-24.
- Hami, A., Abdi, B., Zarehaghi, D., & Maulan, S. B., 2019. Assessing the thermal comfort effects of green spaces: A systematic review of methods, parameters, and plants' attributes. *Sustainable Cities and Society*, 101634.
- Hedquist B.C., Brazel A.J., Di Sabatino S., Carter W., Fernando H.J.S., 2009. Phoenix urban heat island experiment: micrometeorological aspects. *Proceedings of the Eighth Symposium on the Urban Environment*, Phoenix, Arizona.
- Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., Jamet, O., 1997. Evaluation of automatic road extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32 (Part 3-2W3), 47–56.
- Herold M., Liu X., Clare K.C., 2003. Spatial metrics and imagine texture for mapping urban land use. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(9), 991-1001.
- Herold M., Schiefer S., Hostert P., Roberts, D.A., 2006. Applying imaging spectrometry in urban areas. In: *Remote Sensing of impervious surfaces* (Q. Weng, ed.), CRC Press, Boca Raton, USA, 137-161.
- Houborg, R., Anderson, M.C., Daughtry, C.S.T., Kustas, W.P., Rodell, M., 2011. Using leaf chlorophyll to parameterize light-use-efficiency within a thermal-based carbon, water and energy exchange model. *Remote Sensing of Environment* 115, 1694-1705.
- Hsieh, C.-M., Aramaki, T., & Hanaki, K., 2007. Estimation of heat rejection based on the air conditioner use time and its mitigation from buildings in Taipei City. *Building and Environment*, 42(9), 3125–3137.
- Hubert Mazurek., 2015. L'exposition sur les villes méditerranéennes et le changement climatique.
- Huttner, S., 2012. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met. Mainz (dissertation).
- Huttner, S., Bruse, M., 2009. Numerical modeling of the urban climate – a preview on ENVI-MET 4.0. In: *ICUC 7. The 7th International Conference on Urban Climate*, IAUC, 29 June – 3 July 2009, Yokohama, Japan. Tokyo Institute of Technology.
- Ibka, M., 2013. Etude du concept des îlots de chaleur urbains ; Le cas de la ville d'Oran. Thèse de Magister. USTOMB, Oran.
- Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., Bounoua, L., 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sens. Environ.* 114 (3), 504–513.
- IPCC, 2014. *Climate change 2014*, < <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> > (Consulté le 10 janvier 2020).
- Jansson, C., 2006. Urban microclimate and surface hydrometeorological processes. Thèse de doctorat.

Jauregui, E., 1991. Effects of revegetation and new artificial water bodies on the climate of Northeast Mexico City. *Energy and Buildings* 15-16, 447-455.

Jean-Baptiste Marie, 2015. Les paradoxes climatiques des villes européennes. In *Villes et changement climatique, ilots de chaleur urbains*. Edition Parentheses Eds.

Jean-paul, H., Charles, L., 1989. Les Espaces Boisées Méditerranéens et Leurs Ressources. FORET\_MED\_1989\_3\_226. PDF.

Jeevalakshmi, D., Narayana Reddy, S., Manikiam, B., 2017. Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT data using Emissivity Estimation. *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 20 (2017) pp. 9679-9687.

Jendritzky, G. and Nubler, W., 1981. A Model Analyzing the Urban Thermal Environment in Physiologically Significant Terms. *Archives of Meteorology and Geophysical Bioclimatology*, 29, 313-326.

Jensen H., Reimann C., Finne T.E., Ottesen R.T., Arnoldussen A., 2007. PAH- concentrations and compositions in the top 2 cm of forest soils along a 120 Km long transect through agricultural areas, forests and the city of Oslo. Norway. *Environmental Pollution*. 145 (3), 829-838.

Jensen, R. R., Hardin, P. J., & Hardin, A. J., 2012. Estimating Urban Leaf Area Index (LAI) of Individual Trees with Hyperspectral Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(5), 495–504.

Jensen, R. R., Hardin, P. J., Bekker, M., Farnes, D. S., Lulla, V., & Hardin, A., 2009. Modeling urban leaf area index with AISA+ hyperspectral data. *Applied Geography*, 29(3), 320–332.

Jenson, J.R., Cowen, D. C., 1999. "Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 65, No. 5, pp. 611-622.

Jia, L., Menenti, M., Su, Z.B., Li, Z.-L., Djepa, V., Wang, J.M., 2001. Modeling sensible heat flux using estimates of soil and vegetation temperatures: the HEIFE and IMGRASS experiments, in: Beniston, M., Verstraete, M. (Eds.), *Remote sensing and climate modeling: Synergies and limitations*. Kluwer academic publishers, pp. 23-49.

Jin, H., Liu, Z., Jin, Y., Kang, J., & Liu, J. J. S., 2017. The effects of residential area building layout on outdoor wind environment at the pedestrian level in severe cold regions of China. *Sustainability*, 9(12), 2310.

Jojo, M., Nassopoulos, H., Colombert, M., 2015. *Projet ADAPTATIO : Simulations effectuées avec le logiciel ENVI-met sur le secteur de Tolbiac Chevaleret*.

Journal officiel N° 10 de la république Algérienne.

Jung O., 2009. Approche multicritère numérique et expérimentale de la ventilation et du rafraîchissement passif d'un bâtiment multizone par contrôle de composants de façade, INSA de Lyon, p. 34-35.

Jung, A., Kardeván, P., & Tókei, L., 2005. Detection of urban effect on vegetation in a less built-up Hungarian city by hyperspectral remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(1-3), 255–259.

Kaïré, M., Sarr, B., Yaro Botoni, E., 2015. *Semaine du sahel et de l’afrique de l’ouest*.

Kalma, J., McVicar, T., McCabe, M., 2008. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data. *Surveys in Geophysics* 29, 421-469.

- Kawabata, A., Ichii, K., & Yamaguchi, Y., 2001. Global Monitoring of Interannual Changes in Vegetation Activities Using NDVI and Its Relationships to Temperature and Precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 1377-1382.
- Kettaf, F., 2013. La fabrique des espaces publics : conceptions, formes et usages des places d'Oran (Algérie). Thèse de Doctorat. L'université Paul-Valéry – Montpellier III Arts et Lettres, Langues et Sciences Humaines et sociales.
- KIM, H.H., 1992. Urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 13, pp. 2319–2336.
- Landsat project science office, 2002, Landsat 7 science data user's handbook (Goddard Space Flight Center). Available online at: [http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html) (accessed 20 December 2004).
- King, J. I. F., 1956. "The Radiative Heat Transfer of Planet Earth," in: "Scientific Uses of Earth Satellites," (J. A. Van Allen, ed.): 133-136, Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Kjelgren, R., & Montague, T., 1998. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, 32(1), 35–41.
- Klemm, W., Heusinkveld, B. G., Lenzholzer, S., & van Hove, B., 2015. Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort. *Landscape and Urban Planning*, 138, 87–98.
- Kraus, K., 2002. Principles of Airborne Laser Scanning. In *Photogrammetry Meets Geoinformatics. Bildtechnik/Image Science*, Journal of the Swedish Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Pp. 53–56.
- Kuhn, F., 2020. L'environnement du projet de tramway de Mostaganem. Environnement d'un projet de transport dans l'agglomération de Mostaganem.
- Kum, D.M., Bretz, S.E., Huang, b ., Akbari, H., 1994. The Potential for Reducing Urban Air Temperatures and Energy Consumption Through Vegetative Cooling. Heat Island Project Energy and Environment Division Lawrence Berkeley Laboratory Berkeley, CA 94720.
- Kustas, W., Anderson, M., 2009. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 2071-2081.
- Lachance, G., Baudouin, Y., Guay, F., 2006. Etude des îlots de chaleur montréalais dans une perspective de santé environnementale (BISE), Vol.17, No.3, pp. 1-5.
- Lachir, A., Bounoua, L., Zhang, P., Thome, K., Messouli, M., 2016. Modeling the urban impact on semiarid surface climate: a case study in Marrakech, Morocco. *Can. J. Remote. Sens.* 42 (4), 379–395.
- Lagouarde, J. P., Kerr, Y. H., & Brunet, Y., 1995. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 167–190.
- Lamachère, J-M, Puech, C., 1996. Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahélienne et tropicale sèche. In : CHEVALLIER PIERRE (ED.), POUYAUD BERNARD (ED.). *L'hydrologie tropicale : géosciences et outil pour le développement : mélanges à la mémoire de Jean Rodier*. Wallingford : AISH, p. 235-248. (Publication - AISH ; 238). Journées Hydrologiques de l'ORSTOM : Conférence de Paris, 11., Paris (FRA).
- Landsberg, HE., 1981. The urban climate. *International Geophysics Series*, Vol.28, Academic Press, New York, 275 p.
- Larue, D., 1996. L'arbre dans la ville. *Sang de la terre. Ecologie urbaine*, 166p.

- 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. *Geophysical Research Letters*, 42(22), pp.9980-9989.
- Le Gourrierc, S., 2012. L'arbre en ville : le paysagiste concepteur face aux contraintes du projet urbain. *Sciences agricoles*.
- Li, G., & Weng, Q., 2010. Fine-scale population estimation: how Landsat ETM+ imagery can improve population distribution mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(3), 155–165.
- Li, X., Zhou, W., Ouyang, Z., Xu, W., Zheng, H., 2012. Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China. *Landscape Ecol.* 27 (6), 887–898.
- Li, X., Zhou, Y., Asrar, G.R., Imhoff, M., Li, X., 2017. The surface urban heat island response to urban expansion: a panel analysis for the conterminous United States. *Sci. Total Environ.* 605–606, 426–435.
- Liang, S., 2004. Quantitative remote sensing of land surfaces. In J. A. Kong (Ed.), *Wiley series in remote sensing*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Menzel, W. P., Seemann, S. W., Li, J., & Gumley, L. E. (2002). MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document. University of Wisconsin–Madison.
- Liu, K., Bass, B., 2005. Performance of green roof systems. National Research Council Canada, Ottawa, 18 p.
- LO, C.P., Quattrochi, D.A., Luvall, J.C., 1997. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 18, pp. 287–303.
- Lu, D., & Weng, Q., 2006. Use of impervious surface in urban land-use classification. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 146–160.
- Magnaghi, A., 2004. *La biorégion urbaine, petit traité sur le territoire bien commun*, Paris, Eterotopia. France, p.31.
- Maleki, A. & Mahdavi, A., 2016. Evaluation of Urban Heat Islands Mitigation Strategies Using 3-Dimensional urban Micro-Climature Model ENVI-met. *Asian Journals of civil Engineering (BHRC)* , Volume 17, pp. 357-371.
- Maleki, A., Kiesel, K., Vuckovic, M. & Mahdavi, A., 2014. Empirical and Computational Issues of Microclimate Simulation, ICT-EurAsia 2014, ICT-EurAsia 2014: Information and Communication Technology pp 78-85.
- Mas, J. F., 2000. Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(4), 349–362.
- Masson, V., 2000. A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), pp. 357-397.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2006). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 51(4).
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H., 2010. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131–139.

- Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R. M., & Bastianoni, S., 2013. Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment*, 64, 57–66.
- McKeown, Jr., 1988. Building knowledge-based systems for detecting man-made structures from remotely sensed imagery. Volume 324. Issue 1579.
- McPherson, E.G., 1994. Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. In: *Urbanization and terrestrial Ecosystems* (R.H.Platt, R.A.Rowntree, P.C. Muick, eds.), University of Massachusetts Press, Amherst, USA, 151-171.
- Megherbi, W., 2015. L'ensablement, un risque négligé en zone tellienne littorale. Cas de la région Mostaganem. Mémoire de Magister, Université d'Oran 2 (Algérie), 154 p.
- Mellor, G.L., Yamada, T., 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851-875.
- Merrouche, M., 2010. Microclimat, végétation urbaine, dans les espaces publics cas : Jardin Benaceur (Constantine). *Sciences & Technologie D – N°33*, pp. 37-45.
- Mestayer P.G., Anquetin S., 1995. Climatology of cities. In *Diffusion and Transport of pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*. A Gyr & FS Rys Editors, ERCOFTAC Series, Kluwer Academic Press p. 165–189.
- Mexia, T., Vieira, J., Príncipe, A., Anjos, A., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Santos Reis, M., Correia, O., Branquinho, C., Pinho, P., 2018. Ecosystem services: urban parks under a magnifying glass. *Environ. Res.* 160 (August 2017), 469–478.
- Middel, A., Hab, K., Brazel, A.J., Martin, C.A., & Guhathakurta, S., 2014. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Journal of Landscape & Urban Planning*, 122, 16-28.
- Mills, E., Wilson, D., & Johansson, T. B., 1991. Getting started: no-regrets strategies for reducing greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, 19(6), 526–542.
- Mirzaei, M., Verrelst, J., Arbabi, M., Shaklabadi, Z., & 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 Sensing*, 12(8), 1350.
- Monam A., Ruckert K., 2013. The Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Urban Layouts, German-Iranian Research Project. *Young Cities. Developing Energy-Efficient Urban Fabric in the Tehran-Karaji Region*. 10623 Berlin-Germany.
- Monteiro., Madalena Vaz., Kieron J Doick., Phillip Handley et Andrew Peace., 2016. « The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London ». In : *Urban Forestry & Urban Greening* 16, p. 160–169.
- Morakinyo, T.E., Kong, L., Lau, K.K.L., Yuan, C., Ng, E., 2017. A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Build. Environ.* 115, 1–17.
- Moran, M.S., 2004. Thermal infrared measurement as an indicator of plant ecosystem health. In: Quattrochi, D.A., Luvall, J.C. (Eds.), *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 257–282.
- Morille, B., 2018. Volet bioclimatique – Phase 3 : simulation du microclimat sur le projet retenu par la maîtrise d'œuvre.

- Morille, B., 2021. La simulation numérique du climat urbain, outil d'aide à la conception de quartiers résilients face aux vagues de chaleur. In : <https://www.construction21.org/france/articles/h/9-la-simulation-numerique-du-climat-urbain-outil-d-aide-a-la-conception-de-quartiers-resilients-face-aux-vagues-de-chaleur.html>.
- Moumene, A., 2011. Le trottoir, espace durable à usages multiples : Cas de ville de Mostaganem. Thèse de Magister. Université Abd El Hamid Ibn Badis Mostaganem.
- Musy, M., 2014. Une ville verte, les rôles du végétal en ville. Editions Quæ.
- Nichol J.E., 1996. High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology* 1988, 35(1), 135-146.
- Nicol, F., 2004. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy Build.* 36 (7), 628–637.
- Office National des Statistiques (ONS)., 2008. L'armature urbaine RGPH 2008/Les principaux résultats de l'exploitation exhaustive. Vème Recensement général de la population et de l'Habitat (RGPH) 2008.
- Oke, T. R., 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphère*, 14(4), 268–277.
- Oke, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- Oke, T. R., 1988. The Urban Energy Balance. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 12, 471-508.
- Oke, T. R., 2006: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOMRep. 81, WMO/TD-1250, 51 pp.
- Oke, T.R., 1978. *Boundary Layer Climates*, Londres, Methuen, 372 p.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary Layer Climates*. 2nd Edition, Methuen Co., London, New York, 435p.
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T., 2011. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: a case study in Lisbon. *Build. Environ.* 46 (11), 2186–2194.
- Ossola, A., Hahs, A.K., Nash, M.A., Livesley, S.J., 2016. Habitat complexity enhances comminution and decomposition processes in urban ecosystems. *Ecosystems* 19 (5), 927–941.
- Oujour, S., 2020. L'évolution de la place de l'arbre dans le projet urbain : cas de la ville d'Angers, de 1950 à aujourd'hui. *Sciences du Vivant*.
- Ozkeresteci I., Crewe K. and Bruse M., 2003. Use and Evaluation of the ENVI-met Model for Environmental Design and Planning: an Experiment on Linear Parks. The 21st International Conference (ICC). Durban, South Africa 10-16.
- Park, Minsun, Aya Hagishima, Jun Tanimoto et Ken Ichi Narita., 2012. « Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site ». In : *Building and Environment* 56, p. 38–46.
- Parlow, E., 2011. "Urban Climate", in *Urban ecology: patterns, processes, and applications*. Oxford: Oxford University Press, pp. 31–44.
- Patton, D.R., 1975. A diversity index for quantifying habitat "edge". *Wildl. Soc. Bull.* 3, 171–173.
- Pérez G., Rincon, L., Vila, A., Gonzalez J.M., Cabeza, L.F., 2011. Behaviour of green façades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1861-1867.

- Perini, K., & Magliocco, A., 2012. The Integration of Vegetation in Architecture, Vertical and Horizontal Greened Surfaces. *International Journal of Biology*, 4(2).
- Pigeon Grégoire., Aude Lemonsu., Valéry Masson et Julia Hidalgo., 2008. « De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville ». In : *La Météorologie* 62, p. 39–47.
- Potere, D., and A. Schneider, A., 2009 “Comparison of global urban maps,” Chapter 13 in *Global Mapping of Human Settlement: Experiences, Data Sets, and Prospects*, Taylor and Francis, Londres-New York, 269-308.
- Price, J.C., 1984. Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA 7 Advanced Very High-Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 89, 7231-7237.
- Pu, R., & Landry, S., 2012. A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species. *Remote Sensing of Environment*, 124, 516–533.
- Qin, Z., & Karnieli, A., 1999. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(12), 2367–2393.
- Rafik, A., Oughri, M., 2017. Suivi de la couverture terrestre par télédétection, exemple de la ville de Marrakech entre 1995 et 2016, Maroc. Mémoire de Master. Faculté des Sciences et Techniques-Marrakech.
- Rahman, A., Smith J.G., Stringer P., Ennos A.R., 2011. Effect of rooting conditions on the growth and cooling ability of *Pyrus calleryana*. *Urban Forestry and Urban Greening*, 10(3), 185-192.
- 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.
- Rao, P.K., 1972. Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 647-648.
- Razagui., Bachari, N., 2014. “Analyse spatio-temporelle de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des images satellites NOAA et MSG”, *J. Ren. Energies*, vol. 17, no. 3, pp. 497.
- Redon, E., 2017. Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique. Thèse de doctorat. L'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier).
- Rens, L., 2012. Regard sur le béton. Le saviez-vous ? le béton est cool. [www.febelcem.be](http://www.febelcem.be).
- Reuter, U., 2015. Stuttgart's strategy on urban heat islands. In *Villes et changement climatique, ilots de chaleur urbains*. Edition Parentheses Eds.
- Richards, D.R., Fung, T.K., Belcher, R.N., Edwards, P.J., 2020. Differential air temperature cooling performance of urban vegetation types in the tropics. *Urban For. Urban Green*. 50 (June 2019).
- Ridha, S., 2017. Urban Heat Island mitigation strategies in an arid climate. Is outdoor thermal comfort reachable ? Thèse de doctorat de l'université de Toulouse.
- Ristorcelli, T., 2013. Evaluation de l'apport des visées multi-angulaires en imagerie laser pour la reconstruction 3D des couverts végétaux. Thèse de doctorat. Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE). Université de Toulouse.
- Rizwan, A.M., Dennis, L.Y. and Chunho, L., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island', *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), pp. 120-128.

- Robinette, G., 1972. *Plants / people / and environmental quality*. Washington, DC., Department of the Interior, 140 p.
- Robitu M., Musy M., Inard C., & D Groleau., 2006. « Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate » *Solar Energy*, Volume 80, Issue 4, April 2006, pp 435-447.
- Roessner, S., Segl, K., Heiden, U., & Kaufmann, H., 2001. Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7), 1525–1532.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. and Kubik, K., 2005. Using the dempstershafer method for the fusion of lidar data and multi-spectral images for building detection. *Information Fusion* 6(4), pp. 283–300.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell A., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retro gradation (green wave effect) of natural vegetation, Nasa/Gsfct Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, 371 p.
- Salat, S., 2015. De la ville blanche, verte et bleue à la forme urbaine bioclimatique. In *Villes et changement climatique, îlots de chaleur urbains*. Edition Parentheses Eds.
- Santé Canada., 2020. Réduire les îlots de chaleur urbains pour protéger la santé du Canada : introduction pour les professionnels de la santé publique.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J., 2017. Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, 157, 502–511.
- Schär C and Jendritzky, G., 2004. Hot news from summer 2003. *Nature* 432, 559-560
- Schenk, T., Csathó, B., 2002. Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (Part 3A), 310–317.
- Schmugge, T., French, A., Ritchie, J., Rango, A., Pelgrum, H., 2002. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations. *Remote Sensing of Environment* 79, 189–198.
- Sellers, P.J., Tucker, C.J., Collatz, G.J., Los, S.O., Justice, C.O., Dazlich, D.A., Randall, D.A., 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: II. The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Clim.* 9 (4), 706–737.
- Senouci, M., Trache, A., 2014. Étude de vulnérabilité aux changements climatiques de la wilaya de Mostaganem. Édité. Direction de l'Environnement de Mostaganem (Algérie), 124 p.
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K., 2011. A meta-analysis of global urban land expansion. *PLOS ONE*, 6(8), e23777.
- 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., Hoffman, M.E., 2002. The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites. *Build. Environ.* 37 (12), 1279–1288.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E., 2011. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *Int. J. Climatol.* 31 (10), 1498–1506.

- Shashua-Bar, L., Tsiros, I.X., Hoffman, M.E., 2010. A modeling study for evaluating passive cooling scenarios in urban streets with trees. Case study: Athens, Greece. *Build. Environ.* 45 (12), 2798–2807.
- Shinzato, P., Simon, H., Bruse, M., Duarte, D.H.S., 2017. Simulation of microclimatic effects for green infrastructure in the city of Sao ~ Paulo, Brazil. Plea Edinburgh, Design to Thrive.
- Simon, H., 2016. Modeling Urban Microclimate. Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. Dissertation, Johannes Gutenberg University Mainz.
- Smargiassi, A., Goldberg, M. S., Plante, C., Fournier, M., Baudouin, Y., & Kosatsky, T., 2009. Variation of daily warm season mortality as a function of micro-urban heat islands. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 63(8), 659–664.
- Smith, P. M., Kalluri, S. N. V., Prince, S. D., and Defries, R. S., 1997, The NOAA/ NASA pathfinder AVHRR 8-km land data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 12–31.
- Sodoudi, S., Zhang, H., Chi, X., Müller, F., & Li, H., 2018. The influence of spatial configuration of green areas on microclimate and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 85–96.
- Souch, C. A., & Souch, C., 1993. The effect of trees on summertime below canopy urban climates. *Journal of Arboriculture*, 19, 303–303.
- Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E., Duarte, D., 2008. Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of SAO ~ PAULO. *Revista Da Socieda de Brasileira de Arborizaç~ ao Urbana*. 3 (2), 1.
- Spronken-Smith, R. A., & Oke, T. R., 1999. Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks. *Boundary-Layer Meteorology*, 93(2), 287–312.
- 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, 2085-2104.
- Stefulesco, C., 1993. L'urbanisme végétal. Paris: édition Institut pour le Développement Forestier.
- Streutker, D., 2003. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), 282–289.
- Sugawara H., Narita, K., Honjo, T., Ishii, K., 2006. Cool island intensity in a large urban green: seasonal variation and relationship to atmospheric conditions. *Tenki*, 53(5), 4-14.
- Suzuki, R., Tanaka, S., & Yasunari, T., 2000. Relationships between meridional profiles of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate over Siberia. *International Journal of Climatology*, 20(9), 955–967.
- Tabet-Aoul, M., 2010. Développement et environnement au Maghreb : contraintes et enjeux, pp. 66-70.
- Taha, H., 1997. Urban Climates and Heat Islands: Albedo, Evapotranspiration, and Anthropogenic Heat, *Energy and Buildings* 25, 99-103.
- Takebayashi H., Moriyama M., 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and environment*, 42(8), 2971-2979.
- Takebayashi H., Moriyama M., 2009. Study on the urban heat island mitigation effect achieved by converting to grass-covered parking. *Solar Energy*, 83(8), 1211-1223.

- Taleghani, M., Marshall, A., Fitton, R., & Swan, W., 2019. Renaturing a microclimate: The impact of greening a neighbourhood on indoor thermal comfort during a heatwave in Manchester, UK. *Solar Energy*, 182, 245–255.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., van den Dobbelen, A., 2013. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 201–215.
- Tan, C.L., Wong, N.H., Jusuf, S.K., 2014. Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment. *Landsc. Urban Plan.* 127, 52–64.
- Taubenbock, H., Esch, T., Felbier, A., Wiesner, M., Roth, A., Dech, S., 2012. Monitoring urbanization in mega cities from space. *Remote Sens Environ* 117:162-176.
- Taubenböck, H., Post, J., Roth, A., Zosseder, K., Strunz, G., & Dech, S., 2008. A conceptual vulnerability and risk framework as outline to identify capabilities of remote sensing. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(3), 409–420.
- Terjung, W and O'Rourke, P., 1980. Simulating the casual elements of urban heat islands. *Boundary-Layer Meteorology*, 19(1):93–118.
- Terrin, Jean-Jacques., 2015. Villes et changement climatique, îlots de chaleur urbains. Edition Parentheses Eds.
- Torres, L., 2014. Etude de l'intégration du microclimat urbain dans les études de simulation énergétique des bâtiments. *Ingénierie de l'environnement*. L'université de Nantes.
- U.S. Environmental Protection Agency., 2008. "Urban Heat Island Basics." In: *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. Draft. <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
- Valette, E et Cordeau, E., 2010. Les îlots de chaleur urbains. Répertoire de fiches connaissance. Répertoire de fiches connaissance. Ile-de-France : Institut d'aménagement et d'urbanisme.
- Van den Hurk, B.J.J.M., Li, J., Menenti, M., 2002. Assimilation of land surface temperature data from ATSR in an NWP environment-case studies with ATSR data in Spain and The Netherlands, *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, pp. 36-38 vol.31.
- Vinet, J., 2010. Contribution à la modélisation thermo-aérolaïque 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.
- Vlassova, L., 2016. Land Surface Temperature (LST) estimated from Landsat images: applications in burnt areas and tree-grass woodlands (dehesas). These de doctorat. Universidad de Zaragoza Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 2003. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384.
- Walker, J.S., Briggs, J.M., 2007. An object-oriented approach to urban forest mapping in phoenix. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73 (5), 577–583.
- Wang, C., Wang, Z.-H., & Yang, J., 2018. Cooling effect of urban trees on the built environment of contiguous United States. *Earth's Future*, 6, 1066–1081.
- Wang, J., Price, K.P. and Rich, P.M., 2001. Spatial Patterns of NDVI Response to Precipitation and Temperature in the Central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3827-3844.

- Wark, C. G. and Wark, W. W., 2003. Green roof specifications and standards. Establishing an emerging technology, *The Construction Specifier*, 56. N° 08.
- Welch, R., 1982. Spatial resolution requirements for urban studies. *International Journal of Remote Sensing*, 3(2), 139–146.
- Weng, Q., & Lu, D., 2009. Landscape as a continuum: an examination of the urban landscape structures and dynamics of Indianapolis City, 1991–2000, by using satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2547–2577.
- Weng, Q., 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483.
- Werquin Ann-Caroll et Demangeon Alain., 1997. L'entrelacs du végétal et de l'urbanisation. *Les Annales de la Recherche Urbaine* N° 74. pp. 40-47.
- Wild, M., 2005. Solar radiation budgets in atmospheric model intercomparisons from a surface perspective. *Geophysical Research Letters* 32.
- Willmott, C. J., 1981. “On the validation of models,” *Physical Geography*, pp. 184-194.
- Wilmers, F., 1990. Effects of vegetation on urban climate and buildings. *Energy and Buildings*, 15(3-4), 507-514.
- Xiao, Q., Ustin, S. L., & McPherson, E. G., 2004. Using AVIRIS data and multiple-masking techniques to map urban forest tree species. *International Journal of Remote Sensing*, 25(24), 5637–5654.
- Yamani, L., Trache, S.M., 2020. Contournement des instruments d'urbanisme dans l'urbanisation de l'agglomération mostaganemoise (Algerie). *Cybergeog*.
- Yang, W., Lin, Y., Li, C.-Q., 2018. Effects of landscape design on urban microclimate and thermal comfort in tropical climate. *Adv. Meteorol.* 2018, 1–13.
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M. & Meng, Q., 2012. An integrated Simulation Method for Building Energy Performance Assessment in Urban Environments. *Energy and Buildings*, Volume 54, p. 243–251.
- Yilmaz, S., Külekçi, E. A., Mutlu, B. E., & Sezen, I., 2021. Analysis of winter thermal comfort conditions: street scenarios using ENVI-met model. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Yu, C. & Hien, W., 2006. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, Volume 38, pp. 105-120.
- Yue, W., Liu, X., Zhou, Y., Liu, Y., 2019. Impacts of urban configuration on urban heat island: an empirical study in China mega-cities. *Sci. Total Environ.* 1–14.
- Zarco-Tajeda, P. J., Miller, J. R., Haboudane, D., Tremblay, N., & Apostol, S. (n.d.), 2003 Detection of chlorophyll fluorescence in vegetation from airborne hyperspectral CASI imagery in the red edge spectral region. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477).
- Zhang, X., Zhong, T., Feng, X., et al., 2009. Estimation of the relationship between vegetation patches and urban land surface temperature with remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8): 2105-2118. A

Zhou, J., Li, J., Zhang, L., Hu, D., & Zhan, W., 2012. Intercomparison of methods for estimating land surface temperature from a Landsat-5 TM image in an arid region with low water vapour in the atmosphere. *International Journal of Remote Sensing*, 33(8), 2582–2602.

Site web:

<https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>

<https://science.howstuffworks.com/nature/climate-weather/atmospheric/climate-change-four-seasons-redefine.htm>.

<https://www.ledevoir.com/societe/587684/le-stationnement-du-mont-royal-de-nouveau-ferme>.

[https://www.geneve.ch/sites/default/files/fileadmin/public/Departement\\_4/Communiques\\_de\\_presse/strategie-vegetalisation-geneve-communique.pdf](https://www.geneve.ch/sites/default/files/fileadmin/public/Departement_4/Communiques_de_presse/strategie-vegetalisation-geneve-communique.pdf).

<https://sedac.ciesin.columbia.edu>.

<http://www2.cnrs.fr/sites/communique/fichier/mediterranee.pdf>.

<https://fr-fr.facebook.com/379416508756013/photos/linondation-de-1927-%C3%A0-tigditil-y-a-de-cela-plus-de-86-ans-la-ville-de-mostagane>.

[http://alger-roi.fr/Alger/mostaganem/pages/0\\_petit\\_plan\\_mostaganem\\_texas.htm](http://alger-roi.fr/Alger/mostaganem/pages/0_petit_plan_mostaganem_texas.htm)

<https://fr.wikipedia.org/wiki>.

<https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>.

<http://e-cours.univ-paris1.fr>.

<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>.

<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>.