



UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT D'ARCHITECTURE



## THÈSE

Présentée pour obtenir

**LE DIPLÔME DE DOCTORAT LMD**

Spécialité : Architecture

Option : Patrimoine et projet urbain

Par

**MEBARKI Imane**

### **Analyse de l'impact de la morphologie urbaine sur l'intensité des îlots de chaleur. Cas de la ville de Mostaganem**

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

<b>Mr. MEBROUKI Abdelkader</b>	Professeur	Président	Université de Mostaganem
<b>Mr. AICHE Messaoud</b>	Professeur	Examineur	Université de Constantine 3
<b>Mr. ZEROUALA Mohamed Salah</b>	Professeur	Examineur	EPAU - Alger
<b>Mr. CHACHOUR Madjid</b>	MCA	Examineur	Université de Mostaganem
<b>Mr. MALIKI Mustapha</b>	MCA	Rapporteur	Université de Mostaganem
<b>Mr. KADI Sid El Mahi Lamine</b>	Professeur	Co-rapporteur	Université de Mostaganem
<b>Mme. ELIAS-OZKAN Soofia Tahira</b>	Professeur	Invité	Université Technique du Moyen Orient - Ankara - Turquie

**Année Universitaire : 2023-2024**

## ***REMERCIEMENTS***

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu tout-puissant pour m'avoir accordé la santé et la force nécessaire pour mener à bien ce travail.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Pr MALIKI Moustapha, ainsi qu'à mon co-directeur de thèse, Pr Kadi Sid El Mahi Lamine, pour leurs conseils, leur expertise et leur soutien inestimable tout au long de ce parcours de recherche. Leurs connaissances, leurs conseils éclairés et leur engagement ont été essentiels pour la réalisation de ce travail. Je suis reconnaissante de l'opportunité qui m'a été donnée de travailler sous votre supervision.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir consacré leur temps et leur expertise à l'évaluation de ce travail et pour leurs précieux commentaires. Leurs suggestions constructives ont contribué à améliorer la qualité de cette thèse.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à Pr. Soofia Tahira Elias-Ozkan de m'avoir accueillie au sein du laboratoire BUILDING SIMULATION LAB en Turquie.

Je suis également reconnaissante envers les institutions et organismes qui ont rendu possible la réalisation de cette recherche, notamment le cadastre, les archives de l'APC et la DEP, pour la fourniture des ressources nécessaires.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers ma famille pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur compréhension pendant les moments de pression et de stress. Leur amour et leur soutien ont été une source d'inspiration et de force tout au long de ce parcours.

En conclusion, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont joué un rôle dans cette recherche. Votre soutien et vos encouragements ont été déterminants pour la réalisation de cette thèse de doctorat. Merci du fond du cœur pour votre contribution à cette étape importante de ma carrière académique.

## **RÉSUMÉ**

L'îlot de chaleur urbain fait référence à l'écart de température entre la ville et la périphérie. Ce phénomène a été largement étudié dans les régions de climat méditerranéen. Cependant, en Algérie, les problématiques liées à la crise du logement et aux autres problèmes urbanistiques font que les questions environnementales sont quelque peu négligées. Mostaganem, une petite ville côtière située au nord de l'Algérie, bénéficie d'un climat méditerranéen semi-aride. L'urbanisation de la ville suit la même logique que dans les autres villes algériennes, avec un centre historique caractérisé par un tissu compact et une extension diffuse représentée par un tissu éclaté. L'objectif de cette étude est de contribuer à l'étude de l'îlot de chaleur urbain dans le contexte nord-africain et d'analyser son lien avec la morphologie urbaine.

La thèse est structurée en deux parties principales complémentaires. La première partie consiste à élaborer une étude à l'échelle mésoclimatique en utilisant la télédétection et les systèmes d'information géographique. La température de surface (LST) et l'îlot de chaleur urbain de surface sont détectés et cartographiés. Cette première partie nous a permis de localiser les zones de stress thermique et d'examiner à grande échelle les paramètres morphologiques pouvant contribuer au développement de l'îlot de chaleur urbain.

Dans la deuxième partie, une campagne de mesures a été menée dans un quartier choisi en fonction des résultats de la première partie. Ensuite, une simulation numérique a été réalisée sur une partie du quartier étudié afin d'analyser l'impact de différentes techniques de réduction de la température dans le cas de la ville de Mostaganem. Ces techniques ont été proposées en intervenant sur la forme, l'orientation et la hauteur des immeubles d'habitats collectifs, en mettant l'accent sur le facteur de vue du ciel.

Les résultats de l'étude à l'échelle mésoclimatique révèlent que l'îlot de chaleur urbain de surface est significatif dans la ville de Mostaganem. De plus, les anciens quartiers de la ville présentent de bonnes caractéristiques thermiques par rapport aux nouvelles extensions. Cependant, il a été plus difficile à cette échelle de détecter avec précision les paramètres morphologiques pouvant influencer l'augmentation de la température.

Enfin, les résultats à une échelle micro confirment l'impact du facteur de vue du ciel sur la modification de la température de l'air et de la surface, en particulier pendant la journée lorsque le rayonnement solaire est important. Cette étude met également en évidence l'importance de la ventilation urbaine dans la régulation du microclimat.

**Mots clés :** Ilot de chaleur urbain, télédétection, campagne de mesure, simulation numérique, régression linéaire.

## ***ABSTRACT***

The urban heat island refers to the temperature difference between the city and the periphery. This phenomenon has been extensively studied in Mediterranean climates. However, in Algeria, problems related to the housing crisis and other urban issues have led to the neglect of environmental concerns. Mostaganem, a small coastal town in northern Algeria with a Mediterranean climate, follows a similar urbanization pattern as other Algerian cities, with a historic center characterized by a compact fabric and a fragmented extension.

The present research is structured around two major complementary parts. The first part aims to develop a meso-scale study. Using remote sensing and geographic information systems (GIS), surface temperature (LST) and the urban surface heat island are detected and mapped. This initial part allows us to identify areas of thermal stress and examine morphological parameters on a broad scale.

The second part consists of conducting measurements in a selected neighborhood based on the results of the first part. A numerical simulation is then performed on a portion of the studied district to analyze the effectiveness of different techniques for reducing temperatures in the case of Mostaganem.

The results of the mesoclimatic scale study reveal that the urban surface heat island effect is significant in the city of Mostaganem. Additionally, the older neighborhoods of the city exhibit favorable thermal characteristics compared to the newer extensions. However, at this scale, it was more challenging to precisely identify the morphological parameters that could influence the temperature rise.

Furthermore, the findings at the micro scale confirm the impact of the sky view factor on the modification of air and surface temperatures, particularly during the day when solar radiation is substantial. This study also highlights the significance of urban ventilation in regulating the microclimate.

**Keywords :** Urban heat island, remote sensing, measurement campaign, numerical simulation, linear regression.

## ملخص

تعرف الجزر الحرارية الحضرية على أنها اختلاف في درجات الحرارة بين المدينة والمناطق الريفية. وقد تمت دراسة هذه الظاهرة على نطاق واسع في مناخ البحر الأبيض المتوسط. أما في الجزائر، فإن المشاكل المتعلقة بأزمة السكن وغيرها من المشاكل الحضرية تجعل المسائل البيئية مهملة إلى حد ما. مستغانم هي مدينة ساحلية صغيرة في الشمال الجزائري، وتتميز بمناخ البحر الأبيض المتوسط. تتبع تحضر مستغانم نفس المنطق المتبع في المدن الجزائرية الأخرى، حيث يتميز المركز التاريخي بتواجد نسيج مدمج، في حين تكون المناطق الجديدة عبارة عن نسيج مجزأ

تتمحور الدراسة الحالية حول جزأين رئيسيين ومتكاملين. يهدف الجزء الأول إلى إجراء دراسة على مستوى المدينة للكشف عن الجزر الحرارية الحضرية السطحية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية. وقد ساعدنا هذا الجزء الأول على تحديد مناطق التوتر الحراري وفحص الخصائص المورفولوجية التي تؤثر على درجات الحرارة على نطاق واسع. أما الجزء الثاني، فقد تم إجراء حملة قياسات في حي محدد استنادًا إلى نتائج الجزء الأول. وتم تطوير نموذج محاكاة رقمية لجزء من المنطقة المدروسة لتحليل مساهمة تقنيات مختلفة في تخفيض درجات الحرارة في مدينة مستغانم

تكشف نتائج الدراسة أن ظاهرة جزيرة الحرارة السطحية الحضرية تعد ظاهرة ملحوظة في مدينة مستغانم. بالإضافة إلى ذلك، تظهر الأحياء القديمة في المدينة خصائص حرارية مواتية بالمقارنة مع التوسعات الجديدة. ومع ذلك، على هذا المستوى، كان من الأصعب تحديد المعالم المورفولوجية التي يمكن أن تؤثر بدقة على ارتفاع درجات الحرارة

علاوة على ذلك، تؤكد نتائج الدراسة على مستوى أصغر تأثير عامل زاوية الرؤية على تعديل درجات الحرارة خصوصًا خلال النهار عندما تكون الإشعاع الشمسي قوي. تسلط هذه الدراسة أيضًا الضوء على أهمية التهوية الحضرية في تنظيم المناخ الحضري

**الكلمات المفتاحية:** جزيرة الحرارة الحضرية، الاستشعار عن بعد، حملة القياس، المحاكاة الرقمية، الانحدار الخطي

*Table des matières*

**REMERCIEMENTS..... I**

**RÉSUMÉ..... II**

**ABSTRACT..... III**

**ملخص.....IV**

**Table des matières ..... V**

**Liste des figures ..... V**

**Liste des tableaux ..... V**

**Liste des Symboles..... V**

**Liste des Abréviations ..... V**

**Introduction générale..... 1**

**Partie 01 : Cadre théorique et état de l’art..... 9**

**CHAPITRE I : Climatologie urbaine et Ilot de chaleur urbain ..... 11**

**I. Introduction ..... 11**

**II. Climat et climatologie urbaine ..... 11**

II.1 Climat ..... 11

II.2 Climat urbain et Climatologie urbaine ..... 12

II.3 Échelles climatiques ..... 12

II.3.1 L'échelle horizontale..... 12

II.3.2 L'échelle verticale ..... 14

II.4 Le bilan énergétique urbain ..... 16

II.4.1 Le bilan radiatif (appelé aussi le rayonnement net) ..... 17

II.4.2 La chaleur anthropique  $Q_F$ ..... 20

II.4.3 La chaleur sensible  $Q_H$  ..... 21

II.4.4 La chaleur latente  $Q_E$ ..... 22

II.4.5 La chaleur de stockage  $\Delta Q_S$ ..... 22

II.4.6 Le flux advectif  $\Delta Q_A$ ..... 22

**III. L’ilot de chaleur urbain ..... 23**

III.1	Processus dynamique de formation du phénomène.....	24
III.2	Cause de l'îlot de chaleur urbain .....	25
III.3	Types d'îlot de chaleur urbain .....	26
III.3.1	<i>L'îlot de chaleur urbain de surface ICUS.....</i>	<i>26</i>
III.3.2	<i>L'îlot de chaleur urbain atmosphérique.....</i>	<i>26</i>
III.4	Méthodes d'observation .....	26
III.4.1	<i>Mesure d'îlot de chaleur urbain de surface .....</i>	<i>26</i>
III.4.2	<i>Mesure d'îlot de chaleur urbain atmosphérique .....</i>	<i>26</i>
III.4.3	<i>Modélisation statistique .....</i>	<i>31</i>
III.4.4	<i>Modélisation et simulation des microclimats.....</i>	<i>34</i>
<b>IV.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>38</b>
<b>CHAPITRE II : Utilisation de la télédétection pour la détection et la cartographie des îlots de chaleur urbains de surface .....</b>		
<b>40</b>		
<b>I.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>40</b>
<b>II.</b>	<b>La télédétection .....</b>	<b>40</b>
II.1	Définition.....	40
II.2	Principe de télédétection.....	41
II.3	Type de télédétection.....	42
II.4	Base physique de télédétection.....	42
II.4.1	<i>Spectre magnétique .....</i>	<i>42</i>
II.4.2	<i>La théorie du corps noir.....</i>	<i>44</i>
<b>III.</b>	<b>Les satellites.....</b>	<b>45</b>
<b>IV.</b>	<b>La télédétection thermique urbaine.....</b>	<b>48</b>
IV.1	La température de surface terrestre LST .....	49
IV.1.1	<i>Algorithmes de la détection de la température de surface.....</i>	<i>49</i>
IV.2	Le prétraitement des images satellitaires de Landsat 8 .....	52
IV.2.1	<i>Correction géométrique .....</i>	<i>53</i>
IV.2.2	<i>Correction radiométrique absolue .....</i>	<i>54</i>

IV.3	Le calcul de l'émissivité .....	57
IV.4	Validation de la LST.....	58
IV.5	La relation entre la température de surface LST et la température de l'air $T_a$ .....	59
<b>V.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>59</b>
<b>CHAPITRE III : Interaction entre morphologie urbaine et climat .....</b>		<b>61</b>
<b>I.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>61</b>
<b>II.</b>	<b>Définition de la morphologie urbaine .....</b>	<b>61</b>
<b>III.</b>	<b>Phénomènes climatiques en milieu urbain liés à la morphologie urbaine.....</b>	<b>63</b>
III.1	Piégeage radiatif en milieu urbain .....	64
III.2	Effets aérauliques en milieu urbain .....	64
III.3	Classification des paramètres morphologiques .....	67
III.3.1	À l'échelle micro .....	67
<b>IV.</b>	<b>À l'échelle méso.....</b>	<b>71</b>
IV.1	La densité du bâti.....	71
IV.2	La rugosité .....	72
IV.3	La porosité .....	73
IV.4	Orientation des tissus urbains .....	73
IV.5	Comportement thermique des matériaux.....	74
IV.5.1	L'albédo .....	74
<b>1.</b>	<b>Approches d'étude .....</b>	<b>76</b>
IV.6	Approche historique .....	76
IV.6.1	Étude de Benzerzour (Benzerzour et al., 2011).....	77
IV.7	Approche de l'étude des morphologies existantes .....	80
IV.7.1	Étude de Johansson (Johansson, 2006) .....	80
IV.8	Approche des archétypes .....	82
IV.8.1	Étude de Taleghani (Taleghani et al., 2015).....	83
IV.9	Approche de la définition de catégories de configurations urbaines typiques en fonction de leurs effets microclimatiques.....	86

IV.9.1	<i>L'étude de Yurong Shi (Shi et al., 2019)</i> .....	87
<b>V.</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>90</b>
	<b>Partie 02 : Présentation de la méthodologie adoptée et des résultats obtenus</b> .....	<b>92</b>
	<b>Chapitre IV : Analyse de l'ICU à l'échelle mésoclimatique : Détection et cartographie de la température de surface LST et de l'îlot de chaleur urbain de surface sur la ville de Mostaganem</b> .....	<b>93</b>
<b>I.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>93</b>
<b>II.</b>	<b>Présentation de la ville de Mostaganem</b> .....	<b>93</b>
II.1	Etymologie du mot Mostaganem.....	93
II.2	Situation géographique.....	94
II.3	Climat de la wilaya de Mostaganem.....	94
II.3.1	<i>Température</i> .....	95
II.3.2	<i>Précipitations</i> .....	95
II.3.3	<i>Vent</i> .....	96
II.4	Aperçu historique de la ville de Mostaganem.....	97
II.5	Logique d'urbanisation et forme urbaine.....	98
II.5.1	<i>La ville précoloniale</i> .....	98
II.5.2	<i>La ville coloniale</i> .....	101
II.5.3	<i>La ville postcoloniale</i> .....	103
<b>III.</b>	<b>Méthodologie</b> .....	<b>106</b>
III.1	Donnée.....	106
III.2	Étapes de l'extraction de la température de surface LST.....	107
III.2.1	<i>Le prétraitement / correction atmosphérique et radiométrique</i> .....	108
III.2.2	<i>Calcul de la température de surface LST</i> .....	110
III.2.3	<i>Calcul de l'émissivité</i> .....	110
III.3	Identification des îlots de chaleur urbains.....	111
III.4	Le calcul des indices biophysiques.....	112
III.4.1	<i>L'indice de végétation NDVI</i> .....	112

III.4.2	<i>L'indice de bâtiment NDBI</i> .....	113
III.5	Calcul des paramètres morphologies à l'échelle de la ville.....	113
<b>IV.</b>	<b>Résultats</b> .....	<b>115</b>
IV.1	Distribution spatiale de la température de surface (LST).....	115
IV.2	Variation de la température de surface (LST) et de l'îlot de chaleur urbain de surface entre la ville et sa périphérie.....	117
IV.3	Interprétation des résultats des indices biophysiques NDVI et NDBI .....	121
IV.3.1	<i>L'indice de végétation NDVI</i> .....	121
IV.3.2	<i>L'indice de bâtiments NDBI</i> .....	121
IV.4	L'impact des paramètres morphologiques sur la LST.....	126
<b>V.</b>	<b>Synthèse</b> .....	<b>128</b>
<b>VI.</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>130</b>
<b>Chapitre V : Analyse de l'ICU à l'échelle microclimatique : Evaluation du comportement climatique du cas d'étude et présentation de la simulation paramétrique.....</b>		<b>132</b>
<b>I.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>132</b>
<b>II.</b>	<b>Cas d'étude</b> .....	<b>134</b>
II.1	Le choix du cas d'étude .....	134
II.2	Présentation du cas d'étude .....	134
II.3	Campagne de mesure, protocole, procédure et instruments .....	137
II.3.1	<i>Méthodes adoptées</i> .....	137
II.3.2	<i>Choix des stations de mesure</i> .....	138
II.3.3	<i>Déroulement de la campagne de mesure</i> .....	140
II.3.4	<i>Les instruments employés</i> .....	141
II.3.5	<i>Résultats de la campagne de mesure</i> .....	145
II.4	Simulation du microclimat du quartier 348 avec ENVI met 4.4.6 .....	148
II.4.1	<i>Présentation du logiciel ENVI met</i> .....	148
II.4.2	<i>Protocole de simulation</i> .....	149
II.4.3	<i>Construction du modèle géométrique</i> .....	150

- II.5 Validation de la simulation..... 152
- II.6 Diminution de la température par simulation paramétrique ..... 153
  - II.6.1 *Présentation de la simulation paramétrique pour l'optimisation..... 156*
- III. Conclusion ..... 161**
- Chapitre VI : Analyse de l'ICU à l'échelle microclimatique : Quantification de l'impact de la morphologie urbaine sur la température de l'air et de surface. .... 158**
- I. Introduction ..... 162**
- II. Méthode de présentation des résultats..... 162**
- III. Variation journalière des paramètres climatiques ..... 163**
  - III.1 Variation de la vitesse du vent ..... 163
    - III.1.1 *Impact de la modification de la forme..... 164*
    - III.1.2 *Impact de l'augmentation de la hauteur..... 168*
  - III.2 Variation journalière de la vitesse du vent au point A et comparaison entre les deux modes de réduction de la température étudiés ..... 171
  - III.3 Variation de la température de surface  $T_s$  ..... 173
    - III.3.1 *Impact de la modification de la forme..... 173*
    - III.3.2 *Impact de l'augmentation de la hauteur..... 176*
  - III.4 Variation journalière de la température de surface  $T_s$  au point A et comparaison entre les deux modes de réduction de la température étudiés..... 179
  - III.5 Variation de la température de l'air  $T_a$ ..... 181
    - III.5.1 *Impact de la modification de la forme des blocs ..... 181*
    - III.5.2 *Impact de l'augmentation de la hauteur..... 184*
  - III.6 Variation journalière de la température de l'air  $T_a$  au point A et comparaison entre les deux modes de réduction de la température étudiés..... 187
- IV. Analyse statistique ..... 190**
  - IV.1 Régression linéaire..... 190
    - IV.1.1 *Codification des données sur SPSS ..... 191*
    - IV.1.2 *Démarche à suivre pour effectuer une régression linéaire multiple ..... 191*
  - IV.2 Résultats de la régression..... 192

# Table des matières

- V. Discussion ..... 195
- VI. Conclusion ..... 196
- Conclusion générale ..... 198
- Bibliographie..... 205
- Annexes ..... 226

Liste des figures

Chapitre I

**Figure I. 1:** Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU). **Source :** (Bouyer, 2009), adapté de (Oke, 2006)..... 14

**Figure I. 2:** Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain. **Source :** (Oke, 1987)..... 17

**Figure I. 3:** Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain. **Source :** (Oke, 1987)..... 18

**Figure I. 4:** Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain. **Source :** (Bouyer, 2009). ..... 24

**Figure I. 5:** illustration du concept de zones sources en milieu urbain. **Source :** (Stewart & Oke, 2012). ..... 31

**Figure I. 6:** la régression entre l'intensité des îlots de chaleur urbains et la population des villes européennes et nord-américaines. **Source :** (Oke, 1973). ..... 33

**Figure I. 7:** Cercles sur lesquels sont agrégés les paramètres de la zone tampon autour d'un capteur à Florence. Le rayon des cercles varie de 10 à 500 mètres. **Source :** (Petralli et al., 2014). ..... 34

**Figure I. 8:** Application du modèle DAO sur TOKYO. **Source :** (He et al., 2009)..... 36

**Figure I. 9:** Application du modèle TEB sur Paris. **Source :** (TEB - Centre National de Recherches météorologiques, 2014)..... 38

Chapitre II

**Figure II. 1:** Principe de la télédétection. **Source :** (Canada, 2008). ..... 41

**Figure II. 2:** À droite capteur actif, à gauche capteur passif. **Source :** (Ornelas, 2016). ..... 42

**Figure II. 3:** Le Spectrum magnétique. **Source :** (Bargain, 2012)..... 44

**Figure II. 4:** À gauche satellite à orbite géostationnaire, à droite, les satellites à orbite héliosynchrone. **Source :** (Canada, 2008a). ..... 46

**Figure II. 5:** les couloirs couverts ou fauchés. **Source :** (Canada, 2008a)..... 47

**Figure II. 6:** Étapes de prétraitement des images satellitaires. **Source :** (Young et al., 2017)..... 53

**Figure II. 7:** Organigramme montrant les détails de chaque étape de prétraitement. **Source :** (Young et al., 2017)..... 55

Chapitre III

**Figure III. 1:** le phénomène du piégeage radiatif. **Source :** (Greuillet, 2013). ..... 64

**Figure III. 2:** Profils verticaux de vitesses de vent au-dessus de 3 terrains de rugosités différentes. ZG est la hauteur de rugosité et  $\alpha$  est un paramètre de terrain issu de mesures en vraie grandeur. **Source :** (Gandemer et al., 1976). ..... 65

**Figure III. 3:** Quelques effets aérodynamiques types. **Source :** (Gandemer et al. 1976) ..... 66

**Figure III. 4:** Vue sur le ciel visible d'une rue à Boston aux États-Unis. **Source :** (Ratti et al., 2003). ..... 68

**Figure III. 5:** Procédé de photographie fish-eye, à droite) appareil photo numérique fish-eye. **Source :** (Ghaffour, 2020)..... 69

**Figure III. 6:** Distribution schématique du rayonnement solaire incident dans différents canyons avec différents rapports H/L. **Source :** (Ghaffour, 2020)..... 70

**Figure III. 7:** Exemple de ratio du centre urbain historique de Camagüey-Cuba. **Source :** (Rodríguez Algeciras et al., 2016)..... 71

**Figure III. 8:** La quantité d'énergie solaire absorbée en fonction de la température de surface pour plusieurs matériaux. **Source :** (Taha & Bornstein, 1999). ..... 75

**Figure III. 9:** Les phases de changement de couleur des revêtements thermo-chromiques. (a) L'état coloré au-dessous de 30°C. (b) le début de l'éclaircissement des couleurs au-dessus de 30°C. **Source :** (Karlessi et al., 2009). ..... 76

**Figure III. 10:** les états représentatifs la modification du centre ancien de la ville de Nantes. **Source :** (Benzerzour et al., 2011) ..... 77

**Figure III. 11:** la température moyenne annuelle de la ville de Nantes. **Source :** (Benzerzour et al., 2011)..... 78

**Figure III. 12:** la moyenne annuelle de l'humidité relative dans la ville de Nantes. **Source :** (Benzerzour et al., 2011)..... 79

**Figure III. 13:** la moyenne annuelle de la vitesse du vent dans la ville de Nantes. **Source :** (Benzerzour et al., 2011)..... 79

**Figure III. 14:** les deux cas d'étude, à droite la nouvelle ville, à gauche le centre ancien. **Source :** (Johansson, 2006)..... 81

**Figure III. 15:** à gauche la variation annuelle de la température dans les deux canyons urbains et la station rurale ; à droite la moyenne de température en été pour les deux canyons et la station rurale. **Source :** (Johansson, 2006)..... 81

**Figure III. 16:** la température de surface pour le canyon profond (juin) et peu profond (juillet). **Source :** (Johansson, 2006)..... 82

**Figure III. 17 :** Formes urbaines singulières (gauche) linéaires (milieu) et de cour (droite) aux Pays-Bas. **Source :** (Taleghani et al., 2015).....83

**Figure III. 18:** à droite les scénarios choisis, à gauche les résultats de température de l'air et de vitesse du vent pour les scénarios simulés. **Source :** (Taleghani et al., 2015)..... 85

**Figure III. 19 :** classification de zones climatiques locales ZCL. **Source :** (Stewart & Oke, 2012). .. 87

**Figure III. 20:** Carte de classification LCZ avec grilles de 400 m 400 m pour la zone urbaine centrale de Guangzhou. **Source :** (Shi et al., 2019). ..... 88

**Figure III. 21:** Température de surface du sol (LST), (b) facteur de vue du ciel, (c) albédo de surface, et (d) images de récupération de l'émissivité du sol pour la zone urbanisée centrale de Guangzhou. **Source :** (Shi et al., 2019). ..... 89

**Figure III. 22:** La corrélation entre l'ICU et les facteurs morphologiques pour la zone LCZ mixte dans la zone urbaine centrale de Guangzhou. **Source :** (Shi et al., 2019). ..... 89

**Figure III. 23:** La corrélation entre l'ICUS et les facteurs morphologiques pour les LCZ de 1 à 5. **Source :** (Shi et al., 2019)..... 90

**Chapitre IV**

**Figure IV. 1:** Situation géographique de la ville de Mostaganem. **Source :** (Caïd et al., 2019) ..... 94

**Figure IV. 2:** variation annuelle de températures maximales et minimales à Mostaganem. .... 95

**Figure IV. 3:** variation des précipitations entre 1977 et 2011 pour les quatre saisons..... 96

**Figure IV. 4:** le régime annuel des vents de la ville de Mostaganem ..... 97

**Figure IV. 5:** Le noyau historique de la ville de Mostaganem et les grandes divisions ethniques, sociales et fonctionnelles de l'espace. **Source :** (Yamani, 2014) ..... 99

**Figure IV. 6:** vue sur le quartier Derb Tobbana. **Source :** (Yamani, 2014)..... 100

**Figure IV. 7:** vue sur le quartier Tijdit. **Source :** (Yamani, 2014)..... 100

**Figure IV. 8:** évolution de la ville coloniale. **Source :** (Yamani, 2014). ..... 101

**Figure IV. 9:** A gauche la grande poste de Mostaganem, à droite l'hôtel de ville. **Source :** (Delcampe - la marketplace des collectionneurs, 2005)..... 102

**Figure IV. 10:** les ZHUNs de Mostaganem (cité 5 juillet). **Source :** (Mouaz, 2019)..... 104

**Figure IV. 11:** programme AADL de 1000 logements à Sayyada. **Source :** (BETS - Bureau d'Études techniques SALHI, 2016)..... 104

**Figure IV. 12:** représentation schématique de la méthodologie adoptée pour analyser l'ICU à l'échelle méso. **Source :** Auteur. .... 106

**Figure IV. 13:** la commande CLIP pour couper les rasters selon un shapefile donné. **Source :** Auteur. .... 108

**Figure IV. 14:** l'outil calculateur des rasters pour éditer les équations sur Arcgis. **Source :** Auteur. 108

**Figure IV. 15:** distribution spatiale de la température de surface pour janvier, mars, juillet et octobre. **Source :** Auteur..... 115

**Figure IV. 16:** pourcentage de chaque classe de température de surface. **Source :** Auteur..... 117

**Figure IV. 17:** profil en long des températures de surface. **Source :** Auteur..... 118

**Figure IV. 18:** Température de surface LST minimale entre ville et périphérie pour les quatre saisons de l'année 2019. **Source :** Auteur. .... 119

**Figure IV. 19:** Température de surface LST maximale entre ville et périphérie pour les quatre saisons de l'année 2019. **Source :** Auteur. .... 120

**Figure IV. 20:** Température de surface LST moyenne entre ville et périphérie pour les quatre saisons de l'année 2019. **Source :** Auteur. .... 120

**Figure IV. 21:** Variation spatiale du NDVI et NDBI sur la commune de Mostaganem pour les quatre dates choisies de l'année 2019. **Source :** Auteur. .... 123

**Figure IV. 22:** variation de la moyenne des LST, NDVI et NBI entre les trois classes pour les quatre saisons de l'année 2019. **Source :** Auteur. .... 125

*Chapitre V*

**Figure V. 1:** Schéma expliquant la structure du 5e chapitre. **Source :** Auteur. .... 133

**Figure V. 2:** Localisation du cas d'étude par rapport à la ville. **Source :** Google earth, traité par l'auteur. .... 134

**Figure V. 3:** 3D du quartier 348. **Source :** élaboré par l'auteur sur la base des plans cadastraux et des investigations in situ..... 136

**Figure V. 4:** Prise de vue du cas d'étude (coté ZHUN). **Source :** Auteur, 2019. .... 136

**Figure V. 5:** Prise de vue du cas d'étude (coté habitat social). **Source :** Auteur, 2019. .... 137

**Figure V. 6:** le parcours traversé pour la prise des mesures. **Source :** Traité par l'auteur..... 138

**Figure V. 7:** répartition des stations de mesure de S1 à S7 sur le quartier 348. **Source :** Traité par l'auteur ..... 139

**Figure V. 8:** Prise de vue des stations mesurées. **Source :** Auteur, 2019. .... 141

**Figure V. 9:** les instruments de mesure employés dans la campagne de mesure. À droite la station météorologique FRROGIT modèle WH4000SE WI-FI, à gauche le thermomètre infrarouge modèle UNI-T UT301A. **Source :** Auteur..... 142

**Figure V. 10:** description du thermomètre infrarouge UT301A. **Source :** UNI-Trend. (2022)..... 143

**Figure V. 11:** l'écran LCD fourni avec la station météorologique utilisée. **Source :** Froggit.de. (2019). .... 144

**Figure V. 12:** description de la station météorologique Froggit WH4000SE. **Source :** Froggit.de. (2019). .... 144

**Figure V. 13:** Paramètres climatiques à savoir : la température de l'air Ta, l'humidité relative RH, la vitesse du vent V et la température du sol Ts mesurés dans les sept stations choisies. **Source :** Auteur. .... 146

**Figure V. 14:** interface du logiciel ENVI-met 4..... 149

**Figure V. 15:** Emplacement de la station météorologique par rapport au cas d'étude. **Source :** Google Earth. Traité par l'auteur. .... 150

**Figure V. 16:** construction du modèle géométrique sur le sous-logiciel SPACE. **Source :** Traité par l’auteur. .... 151

**Figure V. 17:** la partie simulée du quartier en 2D et 3D avec l’emplacement du récepteur (point bleu S1). **Source :** Auteur ..... 152

**Figure V. 18:** variation journalière de la température de l'air mesurée et simulée. **Source :** Auteur. 152

**Figure V. 19:** Nuage de points représentant la relation entre la température mesurée et simulée. **Source :** Auteur. .... 153

**Figure V. 20:** identification des paramètres stables et constants pendant la simulation. **Source :** Auteur. .... 156

**Figure V. 21:** préparation des scénarios pour la simulation selon les objectifs de la recherche. **Source :** Auteur..... 157

**Figure V. 22:** scénarios proposés en modifiant la forme des blocs. **Source :** Auteur..... 159

**Figure V. 23:** scénarios proposés en modifiant la forme et en augmentant la hauteur des blocs. **Source :** Auteur. .... 160

*Chapitre VI*

**Figure VI. 1:** Repérage du point A au milieu de la placette. **Source :** Auteur..... 163

**Figure VI. 2:** Variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et d’orientation des blocs urbains) à 14:00h. **Source :** Auteur.....166

**Figure VI. 3:** variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et d’orientation des blocs urbains) à 22:00h. **Source :** Auteur.....167

**Figure VI. 4:** Profil vertical du vent dans des rugosités différentes. **Source :** (Nelen & Schuurmans., 2023).....168

**Figure VI. 5:** Variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 14:00h. **Source :** Auteur.....169

**Figure VI. 6:** Variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 22:00h. **Source :** Auteur.....170

**Figure VI. 7:** Courbe de variation de vitesse du vent captée au point A pour les deux séries de simulation. **Source :** Auteur.....171

**Figure VI. 8:** Comportement du vent en fonction de l’espace entre les constructions. **Source :** (Gouizi, 2003).....172

**Figure VI. 9:** Variation de la température de surface du sol Ts pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l’orientation des blocs urbains) à 14:00h. **Source :** Auteur.....174

**Figure VI. 10:** Variation de la température de surface du sol Ts pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l’orientation des blocs urbains) à 22:00h. **Source :** Auteur..... 175

**Figure VI. 11:** Variation de la température de surface du sol Ts pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 14:00h. **Source :** Auteur..... 177

**Figure VI. 12:** Variation de la température de surface du sol Ts pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 22:00h. **Source :** Auteur..... 178

**Figure VI. 13:** Variation journalière de la température de surface et du rayonnement solaire mesurés à 1.25m au point A pour les Blocs : Cas réel, fermé, linéaire, en L, en U et isolé pour des hauteurs de 17m

et 30m, S : rayonnement solaire pour une hauteur de 17m, SH : rayonnement solaire pour une hauteur de 30m, Ts : température de surface pour une hauteur de 17m, TsH : température de surface pour une hauteur de 30m. **Source** : Auteur..... 180

**Figure VI. 14:** Variation de la température de l'air Ta pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 14:00h. **Source** : Auteur.....182

**Figure VI. 15:** Variation de la température de l'air Ta pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 22:00h. **Source** : Auteur.....183

**Figure VI. 16:** Variation de la température de l'air Ta pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 14:00h. **Source** : Auteur.....185

**Figure VI. 17:** Variation de la température de l'air Ta pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 22:00h. **Source** : Auteur.....186

**Figure VI. 18 :** Variation journalière de la température de l'air et du rayonnement solaire mesurés à 1.25m au point A pour les Blocs : Cas réel, fermé, linéaire, en L, en U et isolé pour des hauteurs de 17m et 30m. S : rayonnement solaire pour une hauteur de 17m, S H : rayonnement solaire pour une hauteur de 30m, Ta : température de l'air pour une hauteur de 17m, Ta H : température de l'air pour une hauteur de 30m. **Source** : Auteur.....187

Liste des tableaux

Chapitre I

**Tableau I. 1:** les échelles climatiques et leurs extensions spatiales. **Source :** (Kitous, 2013)..... 13

**Tableau I. 2:** la moyenne des chaleurs anthropiques dégagées des zones urbaines sélectionnées. **Source :** (Mouffok, 2018)..... 20

**Tableau I. 3:** propriétés thermiques de quelques matériaux de construction. **Source :** (Mouffok, 2018).  
..... 21

**Tableau I. 4:** Etudes utilisant des mesures mobiles. **Source :** (Leconte, 2014).....28

**Tableau I. 5:** Etudes utilisant des mesures fixes. **Source :** (Leconte, 2014).....29

**Tableau I. 6:** ensembles de données recommandées pour un site de mesure. **Source :** (Leconte, 2014).....30

**Tableau I. 7:** études utilisant la régression linéaire pour l'étude des ilots de chaleur urbains. **Source :** Adapté de Leconte (2014).....32

Chapitre II

**Tableau II. 1:** Capteurs thermiques pour détecter l'énergie émise par la terre. **Source :** adapté de (Rasul, 2016)..... 478

**Tableau II. 2:** détermination des coefficients a10 et b10 pour la bande 10 du Landsat 8. **Source :** (L. Wang et al. 2019). ..... 50

**Tableau II. 3:** les valeurs de : a10, b10, a11 et b11. **Source :**(L. Wang et al., 2019)..... 51

Chapitre IV

**Tableau IV. 1 :** caractéristiques des images satellitaires de Landsat 8. **Source :** Auteur .....107

**Tableau IV. 2 :** les classes de température de surface. **Source :** Auteur.....111

**Tableau IV. 3:** la densité surfacique et la hauteur moyenne de quatorze quartiers sélectionnées dans les trois classes de température pour le mois de juillet. **Source :** Auteur..... 126

Chapitre V

**Tableau V. 1:** Caractéristiques morphologiques du quartier 348 à kharrouba (cas d'étude). **Source :** élaboré par l'auteur sur la base des plans cadastraux et des enquêtes sur terrain. .... 135

**Tableau V. 2:** caractéristiques techniques des deux appareils de mesure employés. **Source :** Adapté des manuelles d'utilisation des deux dispositifs. .... 142

**Tableau V. 3:** les caractéristiques du modèle géométrique et les paramètres d'entrée de la simulation numérique. **Source :** Auteur..... 151

**Tableau V. 4:** Différentes formes d'habitats collectifs issus des programmes projetés dans la ville de Mostaganem et des études consultées (Ratti et al., 2003; Taleghani et al., 2015; Yola, 2020). **Source :** Auteur..... 155

Chapitre VI

**Tableau VI. 1:** les résultats de la régression linéaire pour Ta et Ts à 10:00, 14:00 et 22:00. .... 192

*Liste des Symboles***Caractères Grecs**

$\alpha$ : albédo moyen des surfaces urbaines

$\varepsilon$  : émissivité

$\tau$  : transmission atmosphérique

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann

$M_{n,\lambda}$  : la sortie spectrale radiance en  $W/m^2/sr/\mu m$

$h$  : la constante de Plank ( $6.626 \times 10^{-34} Ws^2$ )

$k$  : la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} Ws^2K^{-1}$ )

$c$  : la vitesse de la lumière

$\lambda$  : la longueur d'onde en mètre

$\Delta_{QA}$ : chaleur de stockage.

$\Delta_{QA}$  : flux advectif.

**Caractères Latins**

$K_S$ : flux solaire global incident( $W/m^2$ )

$L \downarrow$ : flux infrarouge atmosphérique( $W/m^2$ )

$L \uparrow$ : flux infrarouge émis par la surface( $W/m^2$ )

$L_\lambda$  : Rayonnement spectral au capteur (Watts/( $m^2 \times srad \times \mu m$ ))

$Q^*$  : rayonnement net.

**QE** : chaleur latente

$Q_F$  : flux de chaleur anthropique.

$Q_H$  : chaleur sensible

RH : Humidité Relative

$T_a$  : Température de l'air

$T_s$  : Température de surface

TB: Température de luminosité (K)

V : Vitesse du vent

### *Liste des Abréviations*

ASTER : Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVHRR :Advanced Very High Resolution Radiometer

CERMA :Centre de recherche méthodologique d'architecture

CFD : Computational Fluid Dynamics

CLA : Couche Limite Atmosphérique

CLS : Couche Limite de Surface

CLU : Couche Limite Urbaine

CU : Canopée Urbaine

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

ICU : Ilot de Chaleur Urbain.

ICUS : Ilot de Chaleur Urbain de Surface

LES : Land Surface Emissivity

LST : la température de surface terrestre (Land Surface Température) C°

MIR : La région du moyen infrarouge du spectre magnétique

MODIS : Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MWA : Mono-window algorithm

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NDBI : Normalized Difference Built-up Index

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NIR : La région du proche infrarouge du spectre magnétique

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

## Liste des symboles

SC : single chanel

SIG : Système d'Information Géographique

SWA : split window algorithm

TEB : Town Energy Balance

TIR : La région infrarouge thermique du spectre magnétique

USGS : United States Geological Survey

VIS : la région visible du spectre magnétique

ZHUN : Zone d'Habitat Urbain Nouvelle

# ***Introduction générale***

### *Introduction générale*

Au cours du dernier siècle, les zones urbaines ont connu une expansion rapide et sans précédent, devenant des centres majeurs de développement économique, social et culturel. Aujourd'hui, 56 % de la population mondiale, soit 4,4 milliards d'habitants, vivent en ville. Cette tendance va se poursuivre : d'ici 2050, avec le doublement du nombre actuel de citadins, pratiquement sept personnes sur dix dans le monde vivront en milieu urbain (la Banque Mondiale, 2023).

Cette tendance mondiale d'urbanisation est étroitement liée au développement économique, social et culturel des pays, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de vie des habitants. Cependant, cette croissance rapide de la population urbaine engendre des défis majeurs. La demande énergétique des zones urbaines augmente considérablement, tout comme la consommation de ressources naturelles. De plus, cela entraîne une augmentation des émissions de chaleur, de déchets et de gaz à effet de serre (GES).

Selon les conclusions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 2013, il a été constaté que la température moyenne de surface de la Terre a augmenté d'environ 0,75 °C entre 1950 et 2005. Les projections basées sur des modèles climatiques indiquent une augmentation supplémentaire de 0,5 à 3,7 °C de la température de surface de la Terre entre 2005 et 2100. Cependant, il convient de noter que la région du bassin méditerranéen connaît des changements climatiques plus rapides que les tendances mondiales en raison des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine<sup>1</sup>.

Actuellement, les températures moyennes annuelles dans le bassin méditerranéen sont déjà 1,5 °C plus élevées par rapport à l'époque préindustrielle. Selon les scénarios de concentration élevée de gaz à effet de serre (RCP8.5), on prévoit une augmentation de la température de 3,8 à 6,5 °C d'ici 2100 dans la région méditerranéenne. En revanche, pour un scénario plus conforme à l'objectif à long terme de l'Accord de Paris visant à maintenir l'augmentation de la température mondiale bien en dessous de +2 °C par rapport aux niveaux

---

<sup>1</sup> Selon le premier rapport d'évaluation sur la Méditerranée (MAR1) Résumé à l'intention des décideurs par MedECC (Mediterranean Experts on Climate and environmental Change). Consulter à propos de cela le site de l'UNEP. URL : <https://www.unep.org/unepmap/fr/resources/medecc-mar1-climate-and-environmental-change-mediterranean>.

préindustriels (RCP2.6), on prévoit une augmentation de 0,5 à 2,0 °C dans la région méditerranéenne d'ici 2100<sup>2</sup>.

Ces projections soulignent l'ampleur des changements climatiques anticipés dans le bassin méditerranéen et l'impact potentiel sur la région. Les émissions continues de gaz à effet de serre exercent une influence significative sur l'évolution du climat méditerranéen, ce qui entraîne des températures plus élevées et des conditions climatiques plus extrêmes.

Il est crucial de prendre des mesures pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre et s'adapter aux changements climatiques afin de limiter les conséquences potentiellement dévastatrices pour la région méditerranéenne. Cela nécessite des politiques et des actions concertées, promouvoir les énergies renouvelables, mettre en œuvre des mesures d'efficacité énergétique et développer des stratégies d'adaptation appropriées.

### *Problématique*

À l'échelle urbaine, la croissance démographique et l'expansion des zones urbaines ont un impact significatif sur l'environnement, en particulier sur le climat. L'urbanisation entraîne la transformation de l'espace naturel en environnement artificiel, ce qui modifie les échanges thermodynamiques entre la surface terrestre et l'atmosphère. Ces modifications affectent les processus radiatifs, thermiques, dynamiques et hydriques (Seto et al., 2011).

La taille et la densité d'une ville jouent un rôle déterminant dans la formation d'un microclimat spécifique aux zones urbaines, connu sous le nom de climat urbain. Ce climat urbain est caractérisé par une couche limite atmosphérique appelée couche limite urbaine, qui correspond aux couches inférieures de l'atmosphère directement influencées par la surface urbaine.

L'élément clé du climat urbain réside dans les températures de l'air et de la surface, et est couramment identifié par le phénomène des îlots de chaleur urbains (ICU). Ce phénomène, initialement décrit par le météorologue Luke Howard en 1820, se manifeste par des températures de l'air ou de la surface plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes (Bounoua et al., 2015; Dupont et al., 1999; Gardes et al., 2020; Masson et al., 2020). Les îlots de chaleur urbains ont un impact significatif sur la qualité de vie en milieu

---

<sup>2</sup> Idem

urbain, entraînant un inconfort thermique pour les habitants et des risques sanitaires accrus pour les populations les plus vulnérables.

En plus des îlots de chaleur urbains, le climat urbain se caractérise par un flux d'air spécifique modulé par les caractéristiques naturelles, la forme, la hauteur et la disposition des bâtiments. Cela a des effets directs sur la vitesse et la direction du vent au niveau du sol (Sacré, 1983). Par ailleurs, la présence limitée de végétation dans les environnements urbains, combinée à l'imperméabilisation des sols, entraîne une réduction de l'évapotranspiration, ce qui explique une humidité relative plus basse en zone urbaine par rapport aux zones rurales avoisinantes.

L'étude du climat urbain est complexe et nécessite des recherches interdisciplinaires impliquant des météorologues, des climatologues, des aménageurs, des urbanistes, des architectes, des hydrologues, etc. Ces professionnels sont de plus en plus appelés à travailler ensemble pour concevoir et développer les villes de demain. Dans les pays développés, les recherches dans ce domaine sont relativement avancées, visant à réorienter les politiques urbaines en tenant compte de la complexité des interactions entre urbanisation et climat. En revanche, la situation est différente dans les pays en développement, où la majorité de la population n'est pas encore urbaine. Cependant, plutôt que de considérer ce retard comme un obstacle, il peut être perçu comme une opportunité. Étant donné les projections d'augmentation des températures et d'accélération de l'urbanisation à l'échelle mondiale, y compris dans les pays en développement, il est essentiel pour ces pays d'anticiper ces changements en adoptant de nouveaux paradigmes de développement intégrant ces projections.

Au cours des deux derniers siècles, les climatologues ont accumulé une quantité considérable de données sur le climat urbain, ce qui a permis d'acquérir une compréhension relativement solide de cet aspect (Eliasson, 2000; Grimmond, 2006; Oke, 2004). Des recommandations et des outils, tels que les cartes climatiques, ont été développés pour la conception urbaine (Bitan, 1988; Givoni, 1991; Golany, 1996; Mattsson & Lindqvist, 1989; Oke, 1984), et la littérature présente plusieurs exemples de projets spécifiques où les aspects climatiques sont intégrés dans les processus de conception (Evans & Schiller, 1996; Mills, 2006; Yannas, 2001). Cependant, malgré les connaissances disponibles sur le climat urbain et quelques exemples de conception prenant en compte ces aspects, l'impact du climat reste généralement limité dans la pratique.

L'objectif des architectes et urbanistes est de créer un cadre de vie "confortable", et la recherche dans ce domaine est souvent axée sur des considérations bioclimatiques. Cette approche est empirique et déductive, et les résultats sont présentés sous forme d'orientations et de recommandations pour la conception urbaine (Eliasson et al., 2007). En revanche, les climatologues se concentrent sur la mesure et la modélisation des processus afin d'interpréter les changements dans les propriétés atmosphériques qui donnent lieu aux "effets urbains". Jusqu'à récemment, à quelques exceptions près, la recherche en climatologie urbaine n'était pas menée dans un but de conception urbaine. Les résultats obtenus étaient souvent théoriques et difficiles à interpréter pour les architectes et urbanistes (Eliasson, 2000; Mills, 2006, 1999).

De plus, les connaissances sur les microclimats urbains reposent principalement sur des études menées dans des pays d'Europe, d'Amérique du Nord, et l'est de l'Asie généralement dans des environnements froids ou tempérés (Corbella & Magalhães, 2008; Mills, 2006). Les stratégies utilisées dans de telles zones climatiques ne peuvent pas être directement appliquées dans les climats chauds d'Afrique ou d'Asie du sud, où la protection contre le rayonnement solaire incident est la principale préoccupation. De plus, il existe peu de recherches sur les climats arides et semi-arides (avec des exemples de recherche en Asie et en Afrique). Pourtant, ces régions pourraient fournir des éléments de réponse aux stress environnementaux.

La forme des bâtiments, leur orientation, les matériaux utilisés, la couleur, etc. ont une influence sur le rayonnement, la température, le vent et d'autres paramètres, ce qui permet de créer un microclimat spécifique à un site. Par conséquent, les concepteurs urbains et urbanistes sont en mesure de créer des environnements urbains qui exploitent les effets positifs du climat existant et du temps (Eliasson et al., 2007).

La ville de Mostaganem, située dans le nord de l'Algérie, se distingue par son climat méditerranéen semi-aride. Son urbanisation suit une logique linéaire le long de la côte autour du centre ancien. Les nouvelles extensions urbaines semblent présenter une vulnérabilité accrue au stress thermique. Cette vulnérabilité découle en partie de leur tissu urbain éclaté, marquée par une intensification de la minéralisation et une diminution notable de la végétation urbaine. Un exemple frappant est le quartier des 348 logements, représentatif de cette tendance. Ce quartier, qui abrite des programmes d'habitat collectif issus de deux programmes distincts, les ZHUNs et l'habitat collectif social, met en lumière les défis auxquels sont confrontées les zones urbaines en expansion à Mostaganem en termes de gestion du stress thermique et de confort thermique pour les résidents.

Dans le cadre de cette étude, notre objectif est de contribuer à une meilleure compréhension du climat urbain et plus spécifiquement du phénomène d'îlot de chaleur urbain dans la ville de Mostaganem. Notre étude se concentre sur la caractérisation de ce phénomène en relation avec la morphologie urbaine, dans le but d'apporter des connaissances essentielles pour orienter la conception urbaine et faciliter l'adaptation aux changements climatiques dans la région sud de la Méditerranée. Pour atteindre ces objectifs, nous nous posons les questions suivantes :

- Existe-il une inégalité microclimatique qui se traduit par l'existence du phénomène d'îlot de chaleur urbain sur la ville de Mostaganem? Et quelle est l'origine de cette inégalité ?
- Quel impact la morphologie urbaine exerce-t-elle sur l'intensité de la température de l'air et de la surface dans cette région ? Et comment pouvons-nous atténuer cet effet par le biais de stratégies urbaines adaptées ?

### ***Hypothèses***

Pour répondre à ces questions on propose ces hypothèses :

- il existe une inégalité microclimatique et thermique qui se traduit par l'existence du phénomène d'îlot de chaleur urbain sur la ville de Mostaganem.
- le phénomène d'îlot de chaleur urbain est fortement lié au tissu urbain, et à la morphologie urbaine.
- l'intensité des îlots de chaleur urbains est susceptible être diminuée en intervenant sur la morphologie urbaine.

### **Objectifs**

- L'étude du comportement thermique de la ville de Mostaganem et détection des îlots de chaleur urbains
- La vérification de la relation entre la morphologie urbaine et la présence du phénomène de l'îlot de chaleur urbain sur deux échelles climatiques
- L'atténuation de l'intensité des îlots de chaleur urbains en intervenant sur la morphologie urbaine.

### *Methodologie*

Dans le but d'atteindre ces objectifs, cette recherche adopte une méthode qui consiste à analyser le climat urbain à deux échelles climatiques distinctes, à savoir l'échelle microclimatique et l'échelle mésoclimatique. Cette approche vise à comprendre les mécanismes d'interaction entre les caractéristiques morphologiques de la ville et le climat. L'échelle méso implique l'analyse des conditions climatiques dans les différents quartiers ou régions d'une ville, tandis que l'échelle micro se concentre sur une analyse très détaillée des conditions climatiques, par exemple à l'échelle d'une rue ou d'un fragment urbain. Les données collectées à ces deux échelles sont utilisées pour appréhender les variations du climat urbain à l'intérieur de la ville, et elles fournissent des informations précieuses pour prendre des décisions en matière d'urbanisme et d'aménagement du territoire.

En utilisant la télédétection thermique, l'analyse à l'échelle mesoclimatique permet d'identifier les zones de stress thermique à grande échelle, c'est-à-dire les zones où les conditions climatiques peuvent être extrêmement chaudes et inconfortables pour les habitants. Cela aide à localiser les zones nécessitant des interventions spécifiques.

Enfin, l'utilisation de simulations numériques à l'aide du logiciel ENVI met à l'échelle microclimatique permet de tester et d'évaluer le comportement thermique de différents scénarios d'aménagement urbain en termes de forme urbaine. Cela permet d'anticiper les impacts potentiels de nouvelles constructions.

Cette recherche utilise également la modélisation statistique pour évaluer l'impact du paramètre morphologique sélectionné (Facteur de vu du Ciel FVC) sur les variations de température de l'air et de la surface urbaine. Pour ce faire, un test de régression linéaire est élaboré afin de quantifier cet effet. Cette approche permet d'analyser de manière objective et rigoureuse la relation entre les caractéristiques urbaines et les changements observés dans les températures dans un cycle journalier.

En résumé, cette recherche adopte une approche méthodologique qui combine l'analyse à deux échelles climatiques différentes (micro et méso), en mobilisant ainsi un ensemble d'outils méthodologiques variés pour répondre à la problématique de l'îlot de chaleur urbain dans la ville de Mostaganem. L'utilisation de la télédétection thermique pour identifier les zones de stress thermique à grande échelle, et la simulation numérique pour évaluer le comportement thermique de différents scénarios d'aménagement urbain et la modélisation statistique pour

quantifier l'impact de la morphologie urbaine en mettant en évidence les relations de cause à effet entre ces variables.

La thèse se structure autour de deux grandes parties :

La première partie présente le cadre théorique de la thèse et l'état de l'art, divisée en trois chapitres :

### **Chapitre 01 : Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain**

Ce chapitre présente une revue de littérature sur la climatologie urbaine, les interactions entre l'atmosphère et les villes, ainsi que les principales sources énergétiques. La deuxième partie de ce chapitre traite spécifiquement du phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

### **Chapitre 02 : Utilisation de la télédétection pour la détection et la cartographie des îlots de chaleur urbains de surface**

Ce chapitre examine l'utilisation de la télédétection en tant qu'outil efficace pour détecter et cartographier les îlots de chaleur urbains de surface. Il met en évidence les avantages et les limitations de cette approche dans l'étude des îlots de chaleur urbains.

### **Chapitre 03 : Interaction entre morphologie urbaine et climat**

Ce chapitre présente une synthèse des connaissances actuelles sur les interactions entre les paramètres morphologiques urbains et les paramètres climatiques tels que la température, l'humidité et le vent. Il examine comment la morphologie urbaine influence la formation du climat urbain.

La deuxième partie est dédiée à la présentation de la méthodologie adoptée et les résultats obtenus. Elle est structurée en trois chapitres :

### **Chapitre 04 : Analyse à l'échelle mésoclimatique : détection, cartographie et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain de surface sur la ville de Mostaganem.**

Ce chapitre commence par une présentation de la ville de Mostaganem, en exposant sa situation géographique, son climat, son histoire et sa croissance urbaine. Ensuite, il présente la méthodologie utilisée pour détecter la température en surface. La troisième partie expose les résultats de l'étude de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville (échelle mésoclimatique).

### **Chapitre 05 : Analyse à l'échelle microclimatique : évaluation du comportement microclimatique du cas d'étude et présentation de la simulation paramétrique.**

Ce chapitre débute en identifiant le cas d'étude choisi sur la base des résultats du chapitre précédent, suivi de la description de la campagne de mesures menée pour étudier le comportement microclimatique de ce quartier. L'objectif principal de ces mesures est de valider la modélisation numérique réalisée à l'aide du logiciel spécialisé ENVI met.

Par la suite, ce chapitre présente les scénarios proposés à l'aide du modèle calibré. En se référant à la littérature scientifique et en prenant en compte les formes urbaines existantes dans le contexte algérien, dix-huit scénarios différents ont été choisis. Ces scénarios ont été conçus pour évaluer l'impact de la modification des paramètres morphologiques sur les variations de température de l'air et de la surface dans le quartier étudié.

### ***Chapitre 06 : Analyse à l'échelle microclimatique : Quantification de l'impact de la morphologie urbaine sur la température de l'air et de surface.***

Ce chapitre évalue les scénarios proposés précédemment en termes de qualité bioclimatique. La première partie examine la distribution spatiale de la température de l'air et de la vitesse du vent pour chaque série de scénarios.

La thèse se conclut par une conclusion générale qui présente de manière synthétique les principaux résultats et contributions de cette étude. Elle met également en évidence les limites de la recherche, tout en ouvrant des perspectives pour de futures pistes de recherche.

En consolidant les résultats obtenus à partir de ces différentes méthodes, cette recherche vise à fournir des informations précises et fondées sur des données scientifiques solides pour soutenir la prise de décisions en matière d'aménagement urbain à Mostaganem. Ces informations peuvent ensuite être utilisées par les décideurs, les urbanistes et les architectes pour concevoir des solutions adaptées visant à atténuer les effets de l'îlot de chaleur urbain et à créer des environnements urbains plus agréables et durables sur le plan climatique dans la ville de Mostaganem.

# ***Partie 01 :***

*Cadre théorique et état de l'art*

L'analyse de l'impact de la morphologie urbaine sur l'intensité des îlots de chaleur revêt une importance cruciale dans un contexte où les villes connaissent une croissance rapide et où les changements climatiques se font de plus en plus ressentir. La configuration physique des zones urbaines peut modifier de manière significative le microclimat local, ce qui peut avoir des conséquences sur le confort thermique des habitants et sur la qualité de l'environnement urbain. Cette thèse de doctorat se propose d'étudier en profondeur cette interaction complexe entre la morphologie urbaine et le climat, en se concentrant sur le cas de la ville de Mostaganem.

Cette première partie présente le cadre théorique de la recherche et se structure autour de trois chapitres :

Le premier chapitre aborde les fondements théoriques de cette interaction. Il présente une analyse bibliographique des interactions entre la ville en tant qu'objet d'urbanisation, l'atmosphère et les différents flux qui s'y déroulent. Une attention particulière est accordée à la climatologie urbaine et aux échelles climatiques, mettant en évidence l'importance de prendre en compte les différentes échelles dans l'étude des phénomènes urbains. De plus, ce chapitre explore en détail le phénomène de l'îlot de chaleur urbain, en définissant ses caractéristiques, en examinant les différents modes de détection et de modélisation, ainsi qu'en identifiant les causes de sa formation.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'utilisation de la télédétection comme outil efficace pour étudier l'îlot de chaleur urbain. La télédétection permet de collecter des données à distance sur des paramètres tels que la température, la couverture végétale et la réflectivité, qui sont essentiels pour évaluer les effets de l'urbanisation sur le climat local. Ce chapitre présente les principes de la télédétection et met l'accent sur la télédétection thermique, en décrivant les différents capteurs thermiques utilisés et en expliquant les algorithmes de détection et de correction nécessaires. De plus, il explore les applications de la télédétection thermique dans des domaines tels que la cartographie des îlots de chaleur urbains et la surveillance des changements environnementaux.

Le troisième chapitre examine en détail l'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat local. Il met en évidence l'impact des paramètres morphologiques tels que la densité, la compacité, le facteur de vu du ciel SVF ...etc. sur des variables climatiques telles que la température, l'humidité et la circulation de l'air. De plus, ce chapitre explore également différentes approches et méthodologies pour analyser la morphologie urbaine dans sa dimension bioclimatique, en fournissant des études de cas illustratives.

En combinant une analyse théorique approfondie de la formation des îlots de chaleur urbains, des méthodes de télédétection et une étude de la morphologie urbaine, cette partie vise à contribuer à la compréhension des interactions complexes entre la morphologie urbaine et l'intensité des îlots de chaleur.

# **CHAPITRE I :**

## ***Climatologie urbaine et Ilot de chaleur urbain***

*« La présence d'un ensemble urbain modifie profondément la structure des basses couches de l'atmosphère tant du point de vue dynamique que du point de vue thermique. En effet, l'écoulement de l'air est très perturbé par les obstacles nombreux, rapprochés et de hauteurs inégales qui caractérisent les zones urbaines ; de plus, le remplacement du sol naturel par de grandes étendues de béton, de bitume, de pierres, etc., ainsi que la concentration sur un espace réduit de processus de combustion (chauffage, industrie, transports) provoquent une modification importante du bilan énergétique entre le sol et l'atmosphère. La pollution de l'air qui change la composition de l'atmosphère des villes entraîne également une modification des échanges radiatifs et des précipitations. Enfin, l'imperméabilité du sol et la diminution des surfaces évapotranspirantes perturbent le bilan hydrique. » .*

***Sacré (1983)***

## I. Introduction

La transformation urbaine engendre un déséquilibre dans les échanges d'air et de masse entre l'atmosphère et la terre, ce qui crée une interaction complexe entre la ville et le climat. D'un côté, le climat peut avoir un impact sur la ville en influençant la qualité de l'air, la température, l'accès à l'eau potable et les risques d'inondation. D'un autre côté, la ville peut influencer le climat en modifiant son environnement et en créant des conditions météorologiques locales différentes de celles de son milieu rural environnant. L'îlot de chaleur urbain, qui est un phénomène représentatif de cette interaction, se définit comme la différence de température entre la ville et sa périphérie.

Ce chapitre propose une revue bibliographique des interactions entre la ville en tant qu'objet d'urbanisation, l'atmosphère et les différents flux qui s'y déroulent. Il débute par une présentation du climat, de la climatologie urbaine et des échelles climatiques (horizontales et verticales). Il est important de souligner l'importance de ces échelles, car les phénomènes qui s'y produisent et les paramètres à considérer peuvent différer. Cette première partie se conclut par une présentation du bilan énergétique d'une couche urbaine et des flux énergétiques échangés entre l'atmosphère et la ville.

La deuxième partie de ce chapitre se concentre sur le phénomène de l'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène est examiné en détail, en mettant l'accent sur sa définition, ses causes, les différentes méthodes de détection et de modélisation.

## II. Climat et climatologie urbaine

### II.1 Climat

C'est la description statistique en termes de moyenne et de variabilité des paramètres physiques sur une période de temps allant de quelques mois à plusieurs milliers ou millions d'années. La période classique est de 30 ans, telle que définie par l'Organisation météorologique mondiale (OMM)(Altena et al., 2010).

En d'autres termes précis, le climat d'une région donnée est déterminé par les régimes de variations et de combinaisons des principaux éléments climatiques à considérer, lors de la conception des bâtiments. Ces paramètres sont le rayonnement solaire, le rayonnement de grande longueur d'onde du ciel, la température d'air, l'humidité, le vent et les précipitations (Givoni, 1978).

À l'échelle mondiale, le climat est influencé par de nombreux facteurs : latitude, inclinaison axiale de la Terre, mouvements des ceintures éoliennes de la terre, différence de température entre la terre et la mer, et la topographie.

## II.2 Climat urbain et Climatologie urbaine

L'urbanisation a un impact significatif sur la structure du paysage, entraînant des modifications dans les caractéristiques atmosphériques d'une zone (Altena et al., 2010). Le climat urbain fait référence aux conditions climatiques spécifiques d'une zone urbaine qui diffèrent de celles d'une zone rurale voisine.

Lorsqu'une région est urbanisée, des changements majeurs se produisent au niveau de l'occupation du sol, de l'aménagement des infrastructures, de la densité de la population et des activités humaines. Ces transformations altèrent les échanges d'énergie, d'humidité et de matière entre l'atmosphère et la surface terrestre, créant ainsi des variations climatiques locales.

**La météorologie urbaine** est l'étude des processus physiques, chimiques et biologiques qui opèrent pour produire ou changer l'état de l'atmosphère urbaine, tandis que **la climatologie urbaine** est l'étude des états statistiquement préférés de la météo urbaine. La climatologie englobe la description quantitative des climats (climatographie), l'application des connaissances météorologiques pour expliquer les différences et les phénomènes climatiques (climatologie physique) et l'application des données climatiques pour résoudre les problèmes pratiques (climatométrie) (climatologie appliquée) (Oke et al., 2017).

## II.3 Échelles climatiques

La **Figure I. 1** montre les échelles de plusieurs phénomènes climatiques urbains liés aux mouvements atmosphériques, selon leurs dimensions spatiales et temporelles. La taille du bâtiment ou la taille de la fumée sortant de la cheminée fixe la limite inférieure horizontale de l'espace, et la limite de temps est fixée par la durée de vie du vortex derrière le bâtiment ou la circulation d'air dans un canyon<sup>1</sup>.

### II.3.1 L'échelle horizontale

L'échelle horizontale est un facteur critique pour l'étude des phénomènes météorologiques et climatiques. (Oke, 2004) a classé l'échelle horizontale en plusieurs types, à savoir le macroclimat, le mésoclimat, le localclimat et le microclimat. Ces termes diffèrent en

---

<sup>1</sup> Cf. Chapitre III.

fonction de l'échelle spatiale. La **Figure I. 2** montre la distance spatiale approximative de chacun, ou il y a un certain chevauchement entre eux.

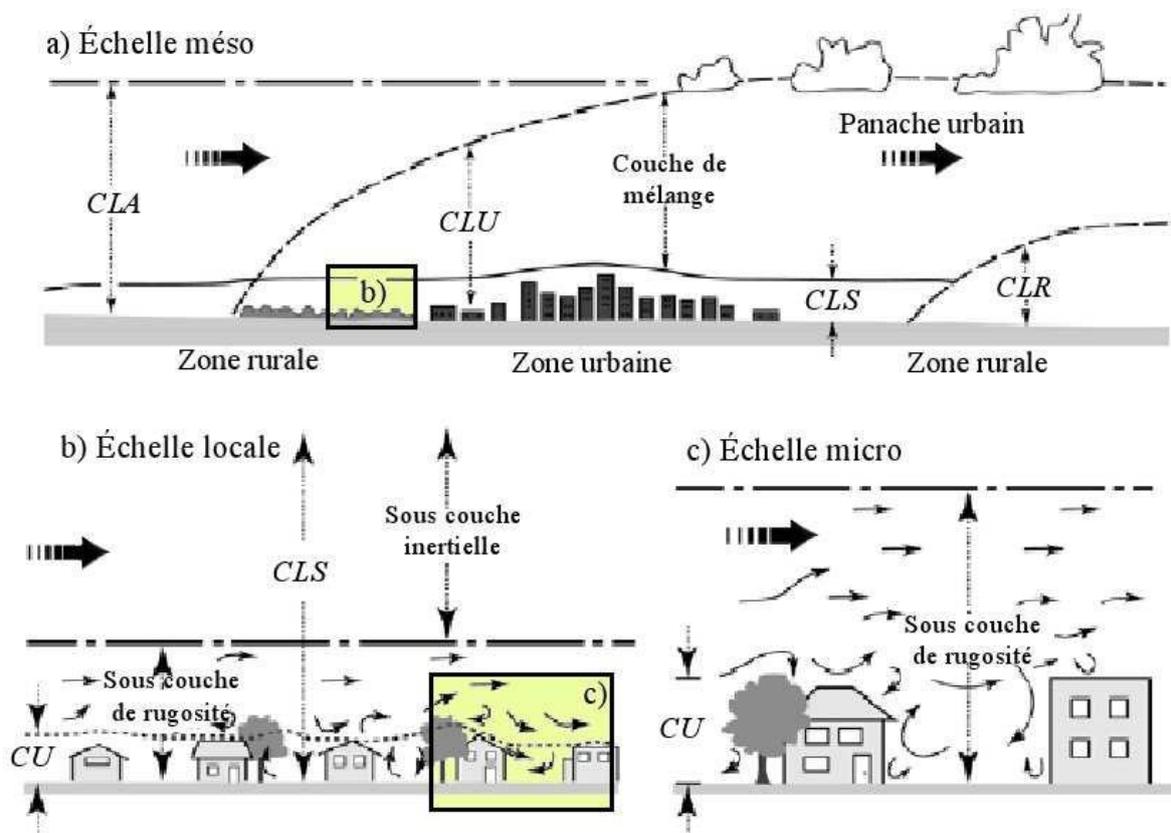
**Tableau I. 1:** les échelles climatiques et leurs extensions spatiales. *Source :* (Kitous, 2013).

Système	Caractères dimensionnels		
	Horizontal (m)	Vertical (km)	Temporel
Méso	$10^4$ à $2 \times 10^5$	1 à 10	1 à 6 mois
Local	$10^2$ à $5 \times 10^4$	0.01 à 0.1	1 à 24 h
Micro	$10^{-2}$ à $10^3$	0.01	1 s à 24 h

Le climat d'une région peut être appréhendé à différentes échelles, allant du microclimat au macroclimat. L'échelle microclimatique se réfère aux conditions climatiques locales spécifiques d'un site particulier, tandis que l'échelle macro concerne les caractéristiques climatiques à grande échelle, telles que les conditions climatiques régionales ou globales. Le **Tableau I. 3** récapitule les différentes catégories de climats en fonction de leur étendue et de leur ampleur.

- Le macroclimat : se réfère aux principales caractéristiques d'une région de grande envergure telle qu'un pays ou un continent. La ville, quant à elle, exerce une influence significative sur les conditions météorologiques et climatiques à l'échelle de son territoire étendu. Cette influence s'étend sur une période allant d'un à six mois à l'échelle temporelle.
- Le mésoclimat : se réfère à des phénomènes météorologiques spécifiques qui s'appliquent à des régions géographiques étendues couvrant plusieurs milliers de kilomètres carrés. Il prend en compte les caractéristiques du paysage, telles que la topographie, la présence de masses d'eau importantes comme les mers ou les grands lacs, les zones de végétation comme les forêts, et les zones urbaines avec des bâtiments. Le méso climat évolue sur une période de temps relativement court, de l'ordre d'une journée (24 heures) (Oke & Cleugh, 1987).
- Le microclimat : permet de décrire les conditions climatiques locales d'un site spécifique, tel qu'un terrain, une rue ou une place. Il est caractérisé par des dimensions spatiales réduites, allant de moins d'un à plusieurs centaines de mètres, et est influencé par divers facteurs, tels que le volume des constructions environnantes, la nature et l'orientation des surfaces, la présence d'arbres, entre autres. Chaque surface possède son propre microclimat, ce qui implique une

grande variabilité en termes de température, d'humidité et de vent. Cette variabilité peut survenir sur une période de temps très court.



**Figure I. 1:** Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU). *Source :* (Bouyer, 2009), adapté de (Oke, 2006).

### II.3.2 L'échelle verticale

Le terme échelle verticale désigne les couches formées au-dessus d'une zone urbaine qui sont la couche de canopée urbaine et la couche limite urbaine. La **Figure I. 4** montre l'atmosphère urbaine et sa division dans l'axe vertical. Dans une zone rurale et urbaine avec une faible urbanisation, les échanges d'énergie et d'humidité ont lieu sur des surfaces presque planes. Dans une grande zone urbaine, ces changements se produisent dans une couche épaisse qui est la couche de canopée urbaine (CU) (Oke, 2004). L'atmosphère aussi au-dessus d'une ville est instable, elle se compose de deux parties générées par la couche limite de la ville.

#### II.3.2.1 La couche limite urbaine CLU

La hauteur de la CLU n'est pas fixe, elle dépend de la variation des environnements urbains. Selon (Altena et al., 2010), les mesures enregistrées pour toute zone urbaine varient en fonction de son emplacement par rapport à la CLU, où les mesures qui prennent en dessous de

la hauteur de la CLU sont explicatives du microclimat alors qu'au-dessus de ce niveau elles ne peuvent pas être indicatives.

Selon (Ringebach, 2004), cette couche fait partie de l'atmosphère dont la partie inférieure est affectée par la présence des villes. En général, pour les îlots de chaleur urbains, cette couche peut contenir plus d'air chaud (de la ville) que d'air froid (de la campagne). Son épaisseur peut atteindre des centaines de mètres et cela dépend essentiellement des paramètres de surface, de la taille de la ville et des conditions atmosphériques.

### II.3.2.2 Propriétés de la couche limite atmosphérique

Du fait que les basses couches de l'atmosphère sont en permanence interaction avec la surface terrestre, les caractéristiques physiques et morphologiques de cette dernière ont une influence sur le climat observé. Dans un environnement donné, les propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques de celui-ci régissent la façon dont l'énergie reçue est répartie (Oke, 2009). Cette répartition particulière de l'énergie affecte notamment la température d'air, l'humidité absolue ou encore le profil du vent observé.

À petite échelle, ces disparités énergétiques peuvent être à l'origine du développement d'un climat différent du climat général environnant (Shashua-Bar et al., 2011), ce qui correspond à la définition d'un climat urbain. En effet, l'environnement urbain, qui modifie fortement le paysage et l'occupation des sols, impacte significativement le climat dans la ville et à la périphérie des villes. À l'échelle de la journée, la surface terrestre influe la partie inférieure de la troposphère<sup>2</sup> appelée couche limite atmosphérique (CLA) (*Figure I. 5*). La structure de cette couche connaît des variations journalières, son épaisseur variant de quelques centaines de mètres en période nocturne à quelques kilomètres en période diurne (Dupont, 2001).

La climatologie urbaine s'intéresse essentiellement à la partie inférieure de la CLA, à savoir la couche limite de surface (CLS) (*Figure I. 6*), qui ne représente approximativement

---

<sup>2</sup> L'atmosphère terrestre est structurée en plusieurs strates distinctes, qui se distinguent principalement par leur variation de température en fonction de l'altitude. La troposphère correspond à la couche inférieure de l'atmosphère et se caractérise par une abondance de vapeur d'eau et de nuages. À mesure que l'on s'élève dans cette troposphère, la température diminue de manière relativement régulière. L'épaisseur de cette couche troposphérique diminue avec l'augmentation de la latitude, atteignant environ une dizaine de kilomètres dans les régions tempérées. Aux pôles, cette épaisseur se réduit à sept kilomètres, tandis qu'elle approche les vingt kilomètres dans la région équatoriale (MeteoFrance, 2008).

que 10% de la hauteur totale de la CLA (Robitu & Nantes, 2005). La CLS se structure selon trois sous-couches différentes :

- Au-dessus de CLS se trouve une sous-couche inertielle (ou sous-couche d'équilibre). Au sein de cette sous-couche, l'échange d'énergie verticale entre la surface de la Terre et les couches supérieures de l'atmosphère est spatialement uniforme. De plus, les propriétés de cette couche ne sont pas influencées par un facteur de rugosité spécifique, mais par les propriétés globales de la zone sous-jacente, notamment le mélange turbulent de l'air. (Shashua-Bar et al., 2011).
- La sous-couche de rugosité, d'une épaisseur de 1,5 à 4 fois les éléments de rugosité<sup>3</sup>, se situe entre la sous-couche inertielle et la partie supérieure des éléments de rugosité (Robitu & Nantes, 2005). Les effets de sillage provoqués par la présence des éléments de rugosité entraînent une turbulence importante au sein de cette couche.
- La couche limite de canopée urbaine ou canopée urbaine correspond à l'air présent entre les éléments de rugosité.

### II.3.2.3 La canopée urbaine CU

De nombreux processus physiques se produisent dans cette couche, tels que le flux de chaleur sensible ou latente (**Figure I. 7**). Cette couche s'étend du sol jusqu'à la hauteur du toit du bâtiment qu'elle contient les activités humaines, le volume des bâtiments et l'air qui circule à une certaine profondeur entre une structure et le sol. Le climat urbain à cette échelle est essentiellement déterminé par l'interaction entre les éléments de rugosité et les flux d'air.

## II.4 Le bilan énergétique urbain

À l'échelle urbaine, la diversité des formes urbaines et celle des propriétés physiques des revêtements de surface rendent difficile le calcul du bilan d'énergie. Le bilan énergétique d'une surface urbaine est égal à la somme algébrique des flux énergétiques qu'elle échange avec son environnement. L'équation du bilan énergétique d'une surface urbaine (**Figure I. 8**) peut s'écrire en termes de flux (W/m<sup>2</sup>), selon l'équation (**I. 1**) (Arnfield, 1998).

$$Q_* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta_{Q_S} + \Delta_{Q_A} \quad (\text{I. 1})$$

Où :

-  $Q_*$  : bilan radiatif appelé aussi le rayonnement net.

<sup>3</sup> Cf. Chapitre III.

- $Q_F$  : flux de chaleur anthropique.
- $Q_H$  et  $Q_E$  : correspond respectivement au flux turbulent de chaleur sensible et latente.
- $\Delta Q_S$  : chaleur de stockage.
- $\Delta Q_A$  : flux advectif, il est souvent négligé à cause de sa valeur relativement faible à l'échelle urbaine et la difficulté liée à sa mesure (Eliasson et al, 1999).

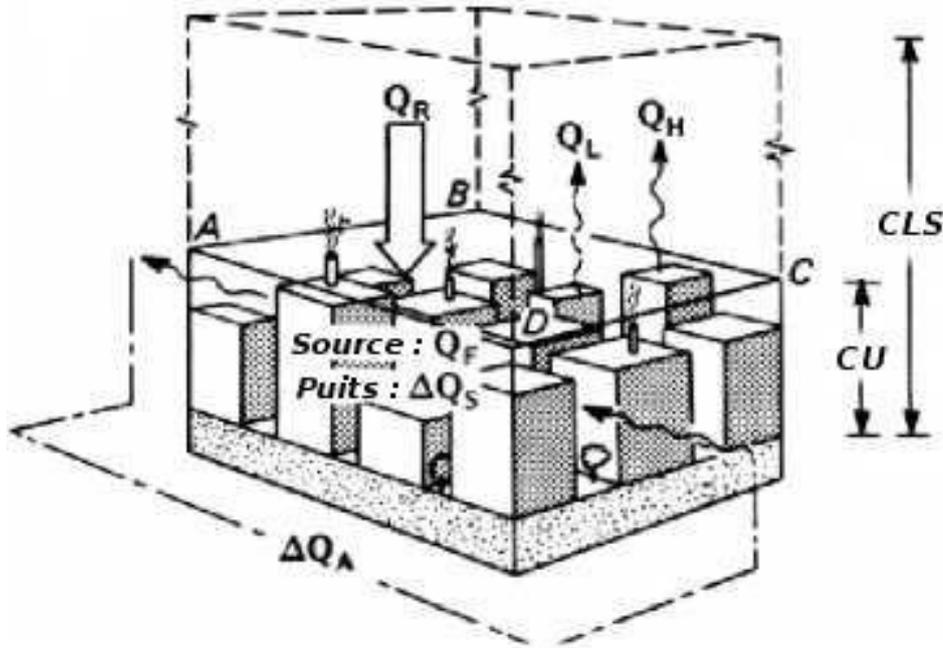


Figure I. 2: Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain. Source : (Oke, 1987).

II.4.1 Le bilan radiatif (appelé aussi le rayonnement net)

Dans le bilan énergétique, les flux radiatifs représentent la composante la plus importante en valeurs absolues (Figure I.3) (Grimmond et al., 1991). Il est couramment appelé rayonnement net, la somme des flux solaires (direct, diffus et réfléchis) et infrarouges provenant du ciel et absorbés par la surface. C'est la principale source d'énergie de l'environnement extérieur, que ce soit dans la formulation théorique ou dans les modèles numériques (Bouyer, 2009).

Le rayonnement net  $Q_*$  est décomposé généralement en deux types : le rayonnement solaire et le rayonnement thermique et donné par l'équation I.2 :

$$Q_* = K_S(1 - \alpha) + L \downarrow - L \uparrow \tag{I.2}$$

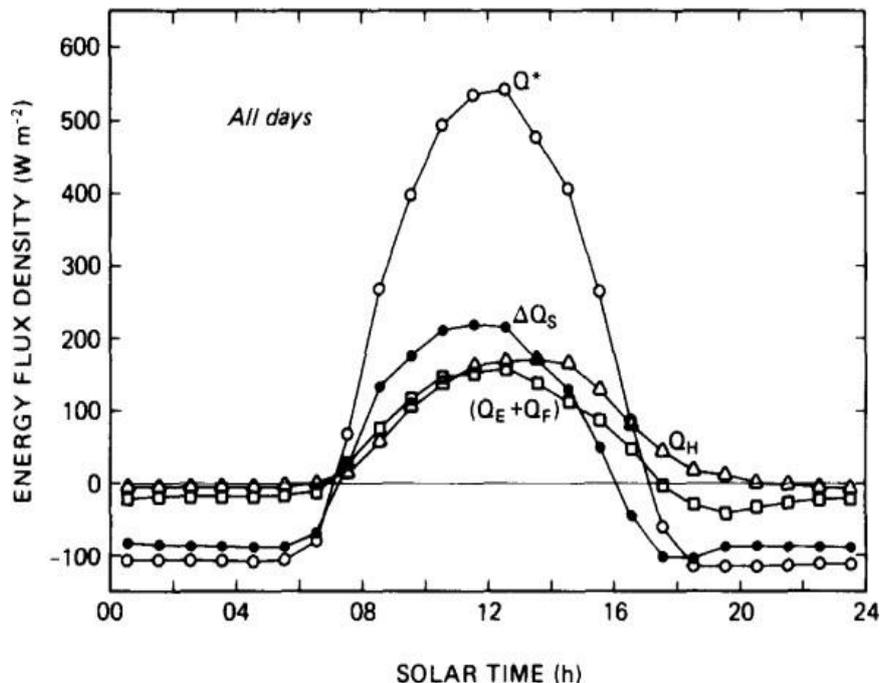
Où :

$K_S$ : flux solaire global incident ( $W/m^2$ )

$\alpha$ : albédo moyen des surfaces urbaines

$L \downarrow$ : flux infrarouge atmosphérique ( $W/m^2$ )

$L \uparrow$ : flux infrarouge émis par la surface ( $W/m^2$ )



**Figure I. 3:** Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain. *Source :* (Oke, 1987).

#### II.4.1.1 Le flux incident solaire $K_s$

C'est la somme de trois flux, le flux provenant directement du soleil, le flux diffus par les particules atmosphériques et le flux solaire réfléchi provenant des multi réflexions sur les autres surfaces urbaines et restant piégé dans la canopée urbaine.

Il est à noter que les rayonnements directs et diffus peuvent être mesurés sur site par des capteurs spécialisés ou estimés à l'aide des modèles théoriques ou des relations empiriques basant sur les propriétés optiques de l'air et la composition de l'atmosphère et les aérosols<sup>4</sup> (Aida, 1977). Des chercheurs ont montré que le flux solaire incident mesuré au niveau de la limite supérieure de la canopée urbaine était atténué de 2% à 20% par les particules de pollution (Arnfield, 2003). Les petites particules d'aérosols, la vapeur d'eau, l'oxygène et l'ozone

<sup>4</sup> « Un système dans lequel des particules solides ou liquides sont dispersées dans l'air. Également appelé matière particulaire ». (Oke et al., 2017)

absorbent les radiations de courte longueur d'ondes<sup>5</sup>. Des noyaux de condensation peut être produits par l'émission des aérosols ce qui augmente la fréquence de couverture nuageuse absorbante les courtes et grandes longueurs d'onde<sup>6</sup> (Bouyer, 2009). Tandis que le rayonnement solaire réfléchi dépend des propriétés réfléchives des surfaces urbaines (albédo<sup>7</sup>, émissivité<sup>8</sup>, ..., etc.) et de la morphologie urbaine (Fahed et al., 2020).

#### II.4.1.2 Le flux infrarouge atmosphérique $L \downarrow$

C'est le rayonnement infrarouge émis par les particules de vapeur d'eau, de gaz carbonique, des aérosols et d'autres particules polluantes dans la couche limite atmosphérique (Athamena, 2012). Son intensité dépend de la température et de la composition chimique de la couche limite urbaine CLU. Il peut être mesuré sur site par des capteurs appropriés (Pyrgéomètre)<sup>9</sup> ou calculé par des formules empiriques (Robitu & Nantes, 2005). Selon (Arnfield, 2003) le flux infrarouge en ville est approximativement 5% plus élevé par rapport à la campagne.

#### II.4.1.3 Le flux infrarouge émis par les surfaces urbaines $L \uparrow$

Chaque surface urbaine ayant une température  $T$  se comporte comme un corps gris, elle reçoit l'énergie solaire et infrarouge atmosphérique, elle en absorbe une partie et en réfléchit une autre, donc elle est à la fois source et récepteur de rayonnement. Le flux émis par chaque surface obéit à la loi de Stephan Boltzmann (*équation I.3*) :

$$R = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (I.3)$$

Où :

$R$  : l'intensité du rayonnement infrarouge émis

$T_s$  : température des surfaces (K)

<sup>5</sup> « Le rayonnement émis par le Soleil dans la plage approximative de longueurs d'onde de 0,15 à 3 ou 4  $\mu\text{m}$ . On l'appelle également rayonnement solaire. Il comprend le rayonnement ultraviolet (UV, 0,14 - 0,4  $\mu\text{m}$ ), le rayonnement visible et photosynthétiquement actif (VIS et PAR, 0,4 - 0,7  $\mu\text{m}$ ) et le rayonnement infrarouge proche (NIR, 0,7 - 3  $\mu\text{m}$ ) » (Oke et al., 2017)

<sup>6</sup> « Le rayonnement émis par les objets à des températures présentes dans le système Terre-Atmosphère. Les longueurs d'onde se situent généralement dans la plage de 3 à 100  $\mu\text{m}$ . On parle également d'infrarouge (IR) » (Oke et al., 2017)

<sup>7</sup> Cf. Chapitre III

<sup>8</sup> Cf. Chapitre II

<sup>9</sup> « Radiomètre de mesure d'un flux infrarouge »

$\varepsilon$  : émissivité

$\sigma$ : constante de Stefan Boltzmann

Il est en fonction de la température des surfaces urbaines et de leurs émissivités ainsi que de l'angle solide sous lequel se voit entre elles (Bouyer, 2009). Selon delannay (1995), les mesures réalisées aux États-Unis ont montré que le flux infrarouge émis par les surfaces urbaines est de 20% plus grand que celui mesuré à la campagne. Par ailleurs, une partie de ce flux est absorbé par les polluants existants dans l'atmosphère urbaine, il en résulte une élévation de la température de l'air et donc une augmentation du flux infrarouge atmosphérique  $L \downarrow$

#### II.4.2 La chaleur anthropique $QF$

Ce flux correspond à la somme de chaleur produite par les véhicules, l'industrie, les bâtiments et les équipements urbains. Ce flux est variable et dépend de plusieurs facteurs, surtout du degré d'industrialisation de la ville et de la densité de celle-ci (Bozonnet, 2005). Il est à noter que la chaleur anthropique a pour effet de diminuer la consommation du chauffage en hiver, mais elle favorise d'autre part l'îlot de chaleur urbain (Escourrou, 1984).

Selon Oke (1990), le **Tableau I.2** ci-dessous permet de comprendre le phénomène de la chaleur anthropique ( $QF$ ), qui marque différents climats dans différentes positions géographiques. Les données présentées concernent les énergies dans les villes d'origine diverses (Électricités, Gaz, charbon, conversion solaire, essence, bois, etc.) pour les besoins essentiels de chauffage, d'industrie, de transport et d'éclairage.

**Tableau I. 2:** la moyenne des chaleurs anthropiques dégagées des zones urbaines sélectionnées.  
**Source :** (Mouffok, 2018).

Espace urbain	Année	période	Populatio n (x10 <sup>6</sup> )	Densité de la population personnes /km <sup>2</sup>	Per capita Consommation d'énergie (Mj x 10 <sup>3</sup> )	$Q_F$ W/m <sup>2</sup>	$Q^*$ W/m <sup>2</sup>
Manhattan (40°N)	1967	Annuelle	1.7	28 810	128	117	93
		Eté				40	
		Hiver				198	
Montréal (45°N)	1961	Annuel	1.1	14 102	221	99	52
		Eté				57	92
		Hiver				153	13
Budapest (47°N)	1970	Annuel	1.3	11 500	118	43	46
		Eté				32	100
		Hiver				51	-8
Sheffield (53°N)	1952	Annuel	0.5	10 420	58	19	56
West Belin (52°N)	1967	Annuel	2.3	9 830	67	21	57
Vancouver (49°N)	1970	Annuel	0.6	5 360	112	19	57
		Eté				15	107
		Hiver				23	6
Hong Kong (22°N)	1971	Annuel	3.9	3 730	34	4	~110
Singapore (1°N)	1972	Annuel	2.1	3 700	25	3	~110
Los Angeles (34°N)	1965- 70	Annuel	7.0	2 000	331	21	108
Fairbanks (64°N)	1965- 70	Annuel	0.0 3	810	740	19	18

La moyenne de la densité calorifique anthropique ( $Q_F$ ) dépend en principe de l'énergie utilisée par les individus et de la densité des populations dans les villes. Dans certaines villes, les sources anthropiques peuvent dépasser la valeur du rayonnement net ( $Q_F > Q^*$ ), notamment pendant l'hiver comme le cas de la ville de Manhattan et la ville de Fairbanks, ces villes ont cette particularité puisqu'elles se trouvent dans l'hémisphère nord (sont très froides en hiver). Toutefois, en été cette chaleur anthropique peut être négligeable par rapport aux sources d'ensoleillement, cela est démontré dans le **Tableau I.2** et confirmé aussi par (Offerle, 2003).

#### II.4.3 La chaleur sensible $Q_H$

Selon Ringenbach (2004), il s'agit de l'énergie stockée par les matériaux, soit des matériaux de revêtement des espaces urbains ou des matériaux de construction. Chaque matériau est différent de l'autre par sa performance thermique (**Tableau I.3**) et accumule l'énergie pendant la journée et la restitue durant la nuit.

Tableau I. 3: propriétés thermiques de quelques matériaux de construction. *Source* : (Mouffok, 2018).

Matériaux Etat sèche	Remarque	$\rho$ densité $\text{kg m}^{-3} \times 10^3$	$c$ Chaleur spécifique $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \times 10^3$	$C$ Capacité thermique $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1} \times 10^6$	$k$ Conductivité thermique $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	$K$ Diffusion thermique $\text{m}^2$ $\text{s}^{-1} \times 10^{-6}$	$\mu$ admittance thermique $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$
Asphalte		2.11	0.92	1.94	0.75	0.38	1205
Béton	Poreux	0.32	0.88	0.28	0.08	0.29	150
	Plein	2.40	0.88	2.11	1.51	0.72	1785
Pierre brique	Moyenne	2.68	0.84	2.25	2.19	4.93	2220
	Moyenne	1.83	0.75	1.37	0.83	0.61	1065
Tuile d'argile	Moyenne	1.92	0.92	1.77	0.84	0.47	1220
Bois	Leger	0.32	1.42	0.45	0.09	0.20	200
	Lourd	0.81	1.88	1.52	0.19	0.13	535
Métal		7.85	0.50	3.93	53.3	13.6	14475
verre		2.48	0.67	1.66	0.74	0.44	1110
Plâtre	Gypse	1.28	1.09	1.40	0.46	0.33	795
Plaque de plâtre	Moyenne	1.42	1.05	1.49	0.27	0.18	635
Isolation	Polystyrène	0.02	0.88	0.02	0.03	1.50	25
	Liège	0.16	1.80	0.29	0.05	0.17	120

Par son comportement énergétique, la ville se distingue de la campagne, par sa capacité d'augmenter d'une façon considérable la température d'air et de surface. Scientifiquement, la chaleur sensible  $Q_H$  crée un espace dynamique d'échange par convection thermique<sup>10</sup> entre les surfaces couvertes et l'air au-dessus, et cela dès le coucher de soleil (pendant la nuit) ou par un effet mécanique sous l'effet de la force de pression. En outre, cette chaleur sensible  $Q_H$  varie d'un quartier à un autre selon l'aménagement urbain et les matériaux utilisés, elle peut y aller jusqu'à une différence de 40% (Schmidt et al., 2006).

#### II.4.4 La chaleur latente $QE$

Selon Ringenbach (2004), cette énergie concerne plus exactement l'énergie de l'évapotranspiration du couvert végétal. Il s'agit de faire entrer l'eau dans son cycle naturel, d'évaporer l'eau infiltrée à travers le sol et de la rendre à l'atmosphère, ce cycle est applicable seulement dans la campagne.

En villes, les eaux pluviales ont un autre circuit, elles parcourent les égouts après avoir traversé des zones et des surfaces imperméables, la végétation est remplacée par des matériaux étanches et cette énergie de la chaleur latente est devenue presque nulle, donc cette énergie sera

<sup>10</sup> Cf. Annexe 01

renvoyée contribuant ainsi à accentuer la chaleur sensible  $QH$  et la chaleur de stockage  $\Delta QS$ . En revanche, en milieu naturel (à la campagne), la chaleur latente  $QE$  est supérieure, néanmoins cette source d'énergie permet de rendre l'environnement plus frais après le coucher de soleil assez rapidement par rapport à la ville (Ringenbach, 2004).

#### II.4.5 La chaleur de stockage $\Delta QS$

$\Delta QS$  est défini par la variation de la quantité de chaleur stockée par le cadre bâti urbain. Les phénomènes radiatifs et thermiques conduisent à l'accumulation de la chaleur à l'intérieur des matériaux et du sol, qui sera restitué à l'atmosphère durant la nuit. Selon Ringenbach (2004), ce flux est l'une des principales sources d'énergie durant la période nocturne. Il est très difficile de mesurer directement le flux  $\Delta QS$  absorbé par une surface urbaine.

Le Choix d'un matériau dépend de sa capacité à transmettre ou à stocker l'énergie. Le remplacement de la végétation par les matériaux en ville augmente considérablement cette énergie  $\Delta QS$ , en accentuant l'effet de piégeage de température entre les bâtiments, le plus souvent par l'usage de ces matériaux comme revêtement au niveau des élévations des parois pour les rues et les canyons urbains. En ville, ces énergies accumulées le jour seront restituées pendant la nuit, tandis que la campagne se refroidit plus rapidement (Ringenbach, 2004).

#### II.4.6 Le flux advectif $\Delta QA$

Le flux advectif est la quantité de chaleur fournie ou extraite de la masse d'air circulant dans le volume d'air entre les constructions et associée à l'élément de surface urbaine (Bouyer, 2009). Cela dépend de la différence de température de l'air dans et hors du volume considéré. Ce flux est dû au gradient spatial de température, d'humidité et du vent (Memon et al., 2009). Ce flux est souvent négligé dans les études en milieu urbain (Pigeon, 2007), comme sa valeur est relativement faible (Eliasson, 1996).

### III. L'îlot de chaleur urbain

Au début du XIXe siècle, Luke Howard a observé pour la première fois l'effet d'îlot de chaleur urbain, en prenant des mesures de température à différents endroits à Londres, il a constaté qu'il existait un écart de température entre les sites urbains et ruraux (Mills, 2008).

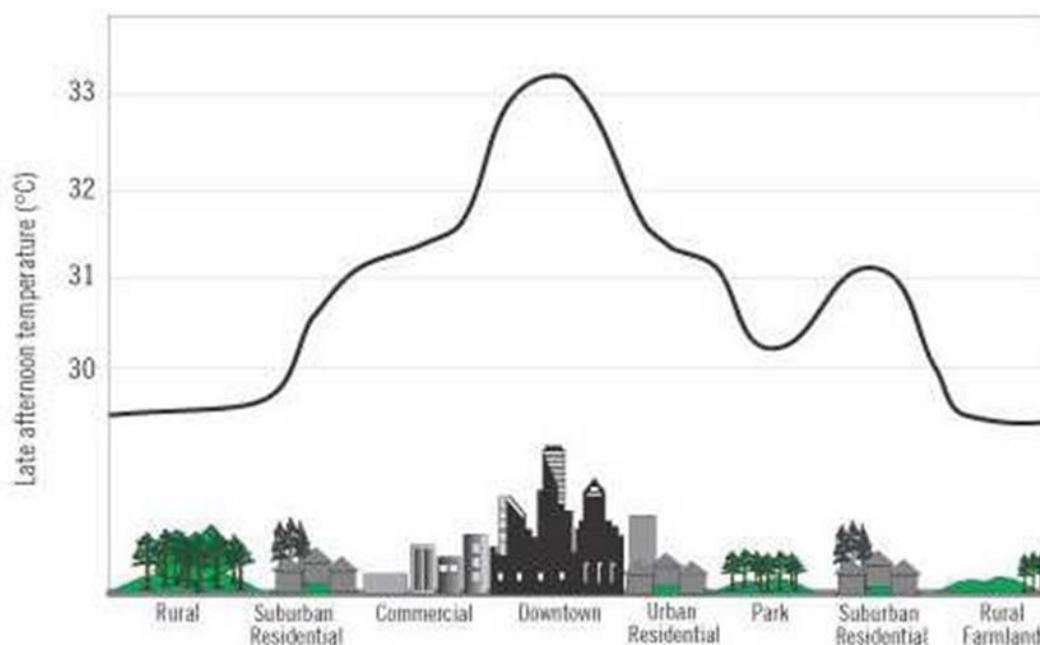
Selon OKE, l'îlot de chaleur urbain peut être défini comme étant la différence de température moyenne entre la ville et la campagne environnante  $\Delta Tu - r$  (moyenne) les indices  $u$  et  $r$  pour urbain et rural respectivement (Oke, 2009). Cette différence de température peut

aller de 2 C° dans une ville de 1000 habitants à 12 C° dans une métropole de millions d'habitants.

(Akbari, 2002) explique que les zones urbaines ont tendance à avoir des températures plus élevées par rapport aux zones rurales environnantes en raison des modifications de surfaces graduelles qui comprennent le remplacement de la végétation naturelle par des bâtiments et des routes.

La dénomination du phénomène vient du fait que la représentation spatiale de la température montre un pic semblable à un îlot au niveau des agglomérations et ce pic est observé pour les températures de surface que pour les températures de l'air.

Le volume de l'îlot de chaleur urbain (ICU) n'est pas stable en hauteur, la convection est élevée en journée et l'îlot de chaleur urbain peut s'étendre de 600 m à 1500 m de la ville. Par contre, la nuit cette couche se dépose sur l'îlot de chaleur urbain à moins de 300m (Ringebach, 2004).



**Figure I. 4:** Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain. *Source :* (Bouyer, 2009).

### III.1 Processus dynamique de formation du phénomène

L'îlot de chaleur urbain se développe selon deux phases, diurnes et nocturnes (Pigeon, 2007). En journée, de par sa complexité la ville capte le flux radiant descendant et ce dernier est accru à cause de la pollution atmosphérique. Le cadre bâti de la ville limite les flux d'air et par conséquent les flux convectifs, et vu la forte imperméabilité et le faible taux de végétation

le flux de chaleur latente est faible par rapport au milieu rural. L'inertie thermique des matériaux en ville est importante ce qui favorise la rétention de chaleur, donc l'énergie déjà captée est stockée en milieu urbain est dissipée par le flux de chaleur sensible. De plus, la chaleur anthropique importante dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales tend à augmenter la température (Pigeon, 2007).

La nuit, la géométrie urbaine limite le flux radiatif ascendant dans l'environnement. De même, la faible vitesse du flux d'air diminue le refroidissement convectif. La chaleur déjà captée par les bâtiments à forte inertie pendant la journée est dissipée progressivement dans l'air par convection. Contrairement au milieu rural qui se refroidit beaucoup plus vite dû à la faible rugosité. La montée du flux radiant est très perceptible grâce au facteur de vue du ciel  $FVC^{11}$  élevé. Les zones rurales favorisent des échanges convectifs importants à cause des vitesses du vent élevées. Les matériaux ruraux se refroidissent plus vite en raison de leurs propriétés physiques d'une part et leurs possibilités d'éliminer facilement les échanges thermiques (Arnfield, 2003).

### III.2 Cause de l'îlot de chaleur urbain

Étant donné que les paramètres de *l'équation I.1* sont en fonction de l'emplacement et des caractéristiques de la ville, on peut conclure que le bilan énergétique à l'intérieur d'une ville change lorsque ces paramètres varient. Cela signifie que l'intensité des ICU n'est pas spatialement et temporellement similaire dans différentes villes. Par exemple, l'absorption du rayonnement peut être un facteur dominant pour l'ICU diurne dans le climat équatorial, surtout lorsque le ciel est calme et sans nuages. Cependant la libération de chaleur anthropique peut être la principale cause de l'ICU nocturne dans les grandes tours et les régions métropolitaines denses lorsque le ciel est nuageux.

De plus, l'intensité de l'îlot de chaleur est contrôlée par la météorologie synoptique<sup>12</sup>, par exemple, l'amplitude de l'ICU diminue en condition nuageuse et est moins intense quand la vitesse du vent augmente, cela implique qu'une ville côtière, sous l'influence régulière d'une brise de mer, subit des îlots de chaleur plus faibles qu'une ville continentale.

---

<sup>11</sup> Cf. Chapitre III

<sup>12</sup> Fait référence à l'utilisation de données météorologiques obtenues simultanément sur une large zone pour présenter une image complète et quasiment instantanée de l'état atmosphérique. (Oke et al., 2017)

P. J. Robinson & Henderson-Sellers (2014) ont énuméré sept causes hypothétiques de l'effet des ICUs :

- L'absorption accrue du rayonnement de courte longueur d'onde due au piégeage des rayons solaires par multi réflexions au sein de la géométrie globale de surfaces urbaines très accidentées.
- L'effet de la géométrie urbaine sur la diminution du facteur de vu du ciel réduit la perte de rayonnement des ondes longues.
- L'effet de la géométrie du canyon sur l'albédo entraîne une forte absorption du rayonnement d'onde courte.
- Les faibles vitesses du vent ont une incidence négative sur la perte de chaleur sensible.
- Les caractéristiques thermiques des matériaux urbains causent une chaleur de stockage fréquente pendant la journée, qui est libérée la nuit.
- Les sources de chaleur anthropiques alimentent davantage l'atmosphère urbaine et la surface.
- La conversion des espaces verts en surfaces imperméables dans les villes entraîne une diminution de l'évaporation et de la transpiration et donc une augmentation de la température.

### III.3 Types d'îlot de chaleur urbain

#### III.3.1 L'îlot de chaleur urbain de surface ICUS

Concerne la différence de température entre les surfaces urbaines et les surfaces dans les zones rurales. Les surfaces sèches et imperméables à forte inertie thermique caractéristiques des zones urbaines tentent à être plus chaudes que les surfaces humides, perméables à faible inertie thermique caractéristiques des zones rurales.

Les surfaces exposées directement au soleil comme les trottoirs et les toits expérimentent des températures de 27 à 50C° supérieures à l'air ambiant (Berdahl & Bretz, 1997). L'écart de température peut être de 10 à 15 C° le jour et de 5 à 10 C° la nuit (Voogt & Oke, 2003). La taille et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de surface dépend fortement du rayonnement solaire donc elles varient selon les saisons et elles sont maximales en été.

#### III.3.2 L'îlot de chaleur urbain atmosphérique

La différence de température de l'air entre le centre-ville et les zones environnantes permet de définir l'îlot de chaleur atmosphérique. Selon Oke (1976), ce type d'îlot se divise en deux types :

- ICU atmosphérique dans la couche limite de canopée urbaine
- ICU dans la couche limite urbaine

### III.4 Méthodes d'observation

#### III.4.1 Mesure d'îlot de chaleur urbain de surface

La télédétection est la technique la plus utilisée pour détecter la température de surface du globe terrestre (Li et al., 2009), l'objet de la télédétection est des informations captées sous forme de cartes provenant de satellites et d'avion (Voogt & Oke, 2003), ces derniers sont équipés de capteurs pour détecter l'énergie réfléchie de la surface terrestre. Cette technique est généralement associée aux systèmes d'information géographiques SIG pour avoir une représentation spatiale complète de l'ICU.

#### III.4.2 Mesure d'îlot de chaleur urbain atmosphérique

L'installation des capteurs thermiques au sein de la zone étudiée, à savoir soit la couche limite urbaine, soit la canopée urbaine est la technique appropriée pour mesurer la température de l'air en milieu urbain (Lowry, 1977). Cette approche in situ présente de nombreux avantages : elle donne une mesure précise et instantanée des grandeurs physiques, ces grandeurs sont classiquement la température de l'air, l'hygrométrie<sup>13</sup>, la vitesse et la direction du vent ainsi que les flux de l'équation énergétique d'une surface urbaine (Grimond et al 2010) .

L'approche in situ peut répondre à un ensemble de problématiques comme la caractérisation de l'ICU, la validation des modèles climatiques urbains, elle peut fournir une information détaillée dans le temps et l'espace. Selon le but pour lequel elle est utilisée les compagnes peuvent être :

- Mobiles: consiste à élaborer un parcours urbain<sup>14</sup> à pied ou en utilisant un moyen de transport (Arnfield, 2003).
- Fixes : consistant à positionner les capteurs (station météorologique) dans l'agglomération étudiée puis à enregistrer les variables climatiques.

##### III.4.2.1 Mesures mobiles

La mesure mobile de variables climatiques est apparue et évoluée en parallèle avec la démarche des mesures fixes (Gartland, 2010), le principe est d'établir au préalable puis d'effectuer un itinéraire au milieu et aux abords de la zone étudiée. Ces mesures sont effectuées

<sup>13</sup> Mesure du degré d'humidité de l'atmosphère

<sup>14</sup> Cf. Chapitre V

à pied ou en utilisant un moyen de transport (Leconte, 2014) (**Tableau I. 4**). Elle fournit une forte couverture spatiale en termes de points de mesure et peut être élaborée à tout moment, la quasi-totalité des espaces du fragment étudié peuvent être théoriquement traversés.

**Tableau I. 4:** Etudes utilisant des mesures mobiles. *Source* : (Leconte, 2014).

Villes concernées	Publications	Méthode d'acquisition
Tokyo	(Saitoh <i>et al.</i> , 1996)	3 voitures
Göteborg	(Eliasson, 1996)	1 voiture
Singapour	(Goh et Chang, 1999)	1 voiture
Lodz	(Klysik et Fortuniak, 1999)	5 voitures
Szeged et Debrecen, Hongrie	(Unger <i>et al.</i> , 2001) (Unger <i>et al.</i> , 2010)	1 voiture
Aix-la-Chapelle	(Buttstädt <i>et al.</i> , 2010)	Réseau de bus
Leipzig	(Schwarz <i>et al.</i> , 2012)	1 piéton
Utrecht	(Brandsma et Wolters, 2012)	1 vélo
Rotterdam	(Heusinkveld <i>et al.</i> , 2014)	2 vélos

De plus elle présente un cout plus modeste que l'approche par mesures fixes. En utilisant un seul capteur, la mesure mobile ne donne pas la possibilité de mesurer les variables climatiques à différents points de l'agglomération de façon concordante. Ainsi, la température de l'air peut présenter quelque degrés de différence entre le début et la fin du trajet et à fin de pallier ce décalage, les données issues des mesures mobiles sont ajustées temporellement en se basant sur une température de référence (Leconte, 2014). Il est encore possible d'utiliser plusieurs véhicules, mais cela augmente le cout de la campagne de mesure et demande de mobiliser une plus grande équipe d'opérateurs.

Les capteurs de température doivent être placés loin des sources de chaleur dans le cas de l'utilisation d'un véhicule motorisé, les zones non accessibles par le moyen de transport ne sont pas automatiquement étudiées (comme les cœurs des îlots).

#### III.4.2.2 Mesures fixes

L'exploitation des données acquises à partir des stations fixes est largement utilisée dans les études des ICUs (Gartland, 2010). De nombreuses recherches se sont basées sur des campagnes de mesures fixes pour étudier les phénomènes physiques à l'échelle

microclimatique et méso climatique (**Tableau I.5**), elles ne focalisent pas toujours sur la caractérisation du phénomène d'ICU dans la canopée urbaine, mais elles peuvent intégrer d'autres problématiques comme la dispersion des polluants atmosphériques (Mouffok, 2018) ou l'analyse du profil vertical de température d'air au sein de la couche limite urbaine (Mestayer et al., 2005).

**Tableau I. 5:** Etudes utilisant des mesures fixes. *Source* : (Leconte, 2014).

Nom	Publications	Villes concernées
Multi-city Urban Hydrometeorological Database (MUHD)	(Piringer <i>et al.</i> , 2002) (Grimmond et Oke, 2002)	7 villes nord-américaines
Basle Urban Boundary Layer Experiment (BUBBLE)	(Fisher <i>et al.</i> , 2005) (Rotach <i>et al.</i> , 2005)	Bâle
Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions (ESCOMPTE)	(Mestayer <i>et al.</i> , 2005)	Marseille
Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer (CAPITOUL)	(Masson <i>et al.</i> , 2008)	Toulouse
Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX)	(Salamanca <i>et al.</i> , 2011)	Madrid

Cette approche utilise au moins deux stations fixes, une en zone urbaine et l'autre en zone rurale installée de façon permanente, les stations météorologiques fournissent une information sur le comportement journalier de l'ICU, mais encore sur son cycle hebdomadaire, saisonnier et pluriannuel. Il existe principalement trois approches différentes pour l'utilisation de données issues de stations météorologiques (Gartland, 2010).

- La première approche vise à prendre uniquement deux stations, une en milieu rural et l'autre en milieu urbain et comparer entre les grandeurs issues des deux stations. La station urbaine doit être placée dans une zone représentative du milieu urbain étudié en matière de morphologie urbaine, couverture végétale, occupation du sol, matériaux

utilisés et chaleur anthropique et la station périphérique doit être représentative du milieu rural de toute la ville.

- La seconde approche vise à analyser un réseau de capteurs repartis dans l'agglomération étudiée dans le but d'avoir une couverture spatiale de la température de l'air et par le biais de l'extrapolation spatiale<sup>15</sup> entre les stations, il est possible d'avoir une carte thermique de toute la zone. C'est l'approche la plus appropriée pour l'étude et la cartographie de l'ICU mais le coût élevé des capteurs lui rend difficile à appliquer.
- La troisième approche examine l'historique des données climatiques d'une ou plusieurs stations afin d'observer l'évolution temporelle de la température sur une période donnée, cette démarche peut intégrer un large choix de problématiques comme le rapport entre l'évolution de l'intensité de l'ICU et l'extension de l'urbanisation.

Dans la démarche des mesures fixes, l'information fournie concerne des points précis de la ville donc la fiabilité des données dépend du nombre de stations utilisées. Par ailleurs, il est nécessaire de positionner les stations d'une façon permanente selon le but de l'étude.

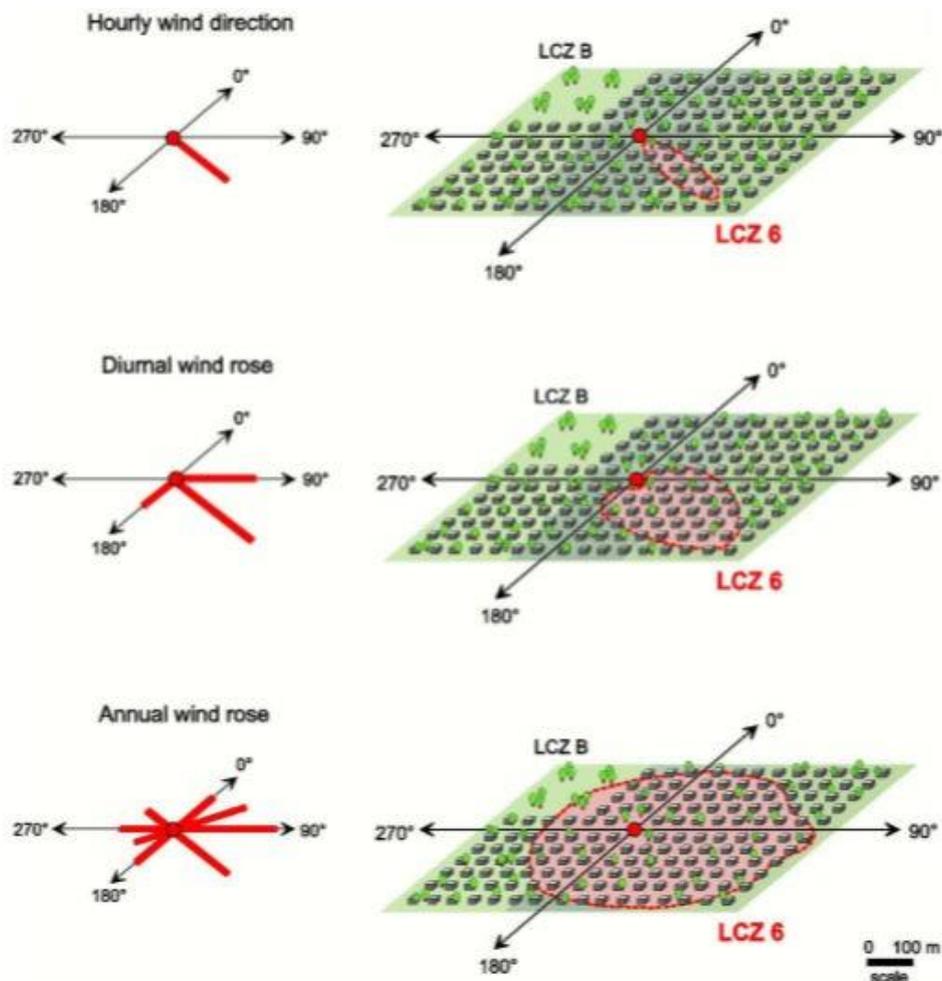
**Tableau I. 6:** ensembles de données recommandées pour un site de mesure. *Source* : (Leconte, 2014).

Échelles locale et microclimatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vue aérienne à l'échelle 1 :5000</li> <li>- Représentation de la ligne d'horizon</li> <li>- Photos prises dans les directions des points cardinaux</li> </ul>
Échelle mésoclimatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vue aérienne à l'échelle 1 :50000</li> <li>- Position relative du site de mesure par rapport à la zone urbaine (centre-ville ou périphérie.</li> <li>- Orographie de la ville en générale et du site de mesure en particulier.</li> </ul>
Échelle macroclimatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coordonnées de l'agglomération (latitude et longitude)</li> <li>- Position relative de l'agglomération par rapport aux éléments géographiques majeurs (littoral, chaîne de montagnes, plateau)</li> <li>- Type de climat de l'agglomération</li> </ul>

<sup>15</sup> « C'est une procédure consistant à estimer la valeur d'une grandeur en un site à partir de l'échantillon de cette grandeur récoltés dans d'autres sites. A partir d'observations géo référencées, pas nécessairement réparties régulièrement, on cherche à estimer les valeurs prises par le paramètre observé en d'autres points de l'espace. On parle alors d'estimation spatiale ».

### III.4.2.3 La zone d'influence des capteurs

Vu l'hétérogénéité de l'environnement bâti et la complexité des interactions en ville, les zones d'influence des capteurs autrement appelées les zones sources (**Figure I. 9**) sont un peu difficiles à déterminer dans la couche limite de canopée urbaine. Ces zones se définissent comme l'échantillon spatial visible par le capteur, autrement dit, c'est l'espace dont les propriétés thermiques sont portées aux capteurs via transfert turbulent. Elles varient au court du temps et liée entre autres à la hauteur de la mesure, la rugosité de surface, la stabilité atmosphérique, le flux et à la variable climatique mesurée. Différents modèles ont été développés dans le but d'estimer la surface de ces zones sources appelées **footprint models** ou via l'utilisation de lois empiriques. Selon la dernière approche, la taille de footprint ne dépasse généralement pas quelques mètres de rayon pour des mesures de 2 mètres de hauteur, elle couvre un rayon de 100 m en zone densément bâties et un rayon de 200 m en zones ouvertes.



**Figure I.5** : illustration du concept de zones sources en milieu urbain. *Source* : (Stewart & Oke, 2012).

## III.4.3 Modélisation statistique

La majorité des modèles statistiques se base sur la régression linéaire multiple. Le **Tableau I. 7** montre quelques-unes des études utilisant cette technique (Leconte, 2014). Les variables indépendantes modélisées diffèrent d'un modèle à un autre selon l'échelle de l'étude et la méthodologie adoptée.

**Tableau I. 7:** études utilisant la régression linéaire pour l'étude des îlots de chaleur urbains. *Source :* Adapté de Leconte (2014).

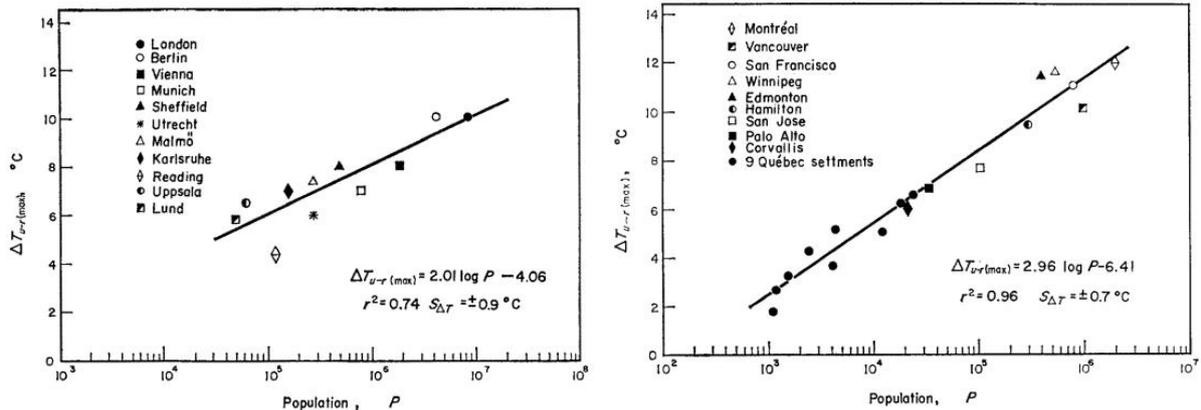
Publications	Indicateurs morphologiques	Indicateurs d'occupation du sol	Autres indicateurs
[Oke, 1987]			- Population Vitesse du vent
[Oke, 1987]	Rapport d'aspect		
[Bottyán et Unger, 2003]	FVC Hauteur moyenne des bâtiments	Fraction de surface bâtie Fraction de surface d'eau libre	
[Eliasson et Svensson, 2003]	FVC	Fraction de surface végétalisée Fraction de surface imperméable Fraction de surface bâtie Fraction de surface d'eau libre	Distance au centre-ville Altitude Distance à la mer
[Szymanowski et Netzel, 2004]	Classe de rugosité moyenne	Moyenne du NDVI	Moyenne des émissions de chaleur artificielles
[Alcoforado et Andrade, 2006]		Fraction de surface végétalisée Fraction de surface bâtie Fraction de surface d'eau libre	Altitude Altitude relative Rapport d'aspect × Fraction de surface bâtie Longitude Orientation des rues Distance à la rue principale

La première loi statistique, évalue l'intensité des îlots de chaleur urbains à l'échelle de la ville (Oke, 1973) a choisi de lier l'amplitude de l'ICU pour les villes nord-américaines à la population P.

$$\Delta T_{u-r} = 2.96 \log(P) - 6.14 \quad (\text{I. 4})$$

En prenant la population  $P$  comme indicateur de la morphologie et de la taille de la ville étudiée. Le chercheur a constaté que l'intensité maximale de l'ICU observée augmente approximativement linéairement avec le logarithme de la taille de la population des villes européennes et nord-américaines.

En coré du sud Park (1986) a conduit une étude similaire en faisant le lien entre l'ICU, la population et l'imperméabilité des surfaces



**Figure 1.6 :** la régression entre l'intensité des îlots de chaleur urbains et la population des villes européennes et nord-américaines. *Source :* (Oke, 1973).

Par la suite Oke a prouvé qu'il existe un lien entre l'ICU et le rapport d'aspect  $H/L$  du centre de la ville étudiée avec  $H$  la hauteur caractéristique des bâtiments et  $L$  la largeur moyenne des rues.

$$\Delta T_{u-r} = 7.54 + 3.97 \log \frac{H}{L} \quad (I. 5)$$

À Singapour la même étude a été menée par (Chang & Goh, 1999), donc pour le climat tropical les résultats montrent que la loi précédente n'est pas valide et qu'il fallait la redéfinir pour le cas de Singapour, ce qui met les lois empiriques des lois relatives au contexte (climatique, géographique et morphologique).

L'avènement des SIG et la disponibilité des données morphologiques à une fine échelle a permis de développer des modèles statistiques plus ou moins précis. Dans ce genre d'études, les paramètres retenus sont soit intégrés sur une grille régulière ou dans des zones tampons d'un rayon allant de centaines de mètres centrés autour des stations de mesure. (Petralli et al., 2014) a analysé l'impact du rayon de la zone tampon sur les résultats (**Figure 1.15**), en étudiant la végétation basse et la végétation haute.



**Figure I. 7:** Cercles sur lesquels sont agrégés les paramètres de la zone tampon autour d'un capteur à Florence. Le rayon des cercles varie de 10 à 500 mètres. **Source :** (Petralli et al., 2014).

#### III.4.4 Modélisation et simulation des microclimats

La littérature propose plusieurs outils de simulation numériques pour analyser les microclimats urbains tout en intégrant la forme géométrique des bâtiments, les surfaces, la végétation urbaine et les différents paramètres qui influent sur le climat.

Due à la complexité des interactions et aux corrélations non linéaires entre les différents paramètres du microclimat, une modélisation précise est soumise à plusieurs contraintes. Sebastian Huttner dans sa thèse de doctorat (Huttner, 2012) présente les différentes exigences pour une modélisation précise de la couche limite d'une zone urbaine :

- La taille de la grille de discrétisation spatiale du modèle doit être relativement petite pour intégrer les bâtiments dans le calcul. Ainsi, la taille de la grille doit être inférieure ou égale à 10 m.
- L'équilibre énergétique de toutes les surfaces doit être pris en considération dans le modèle.
- La simulation des propriétés physiques et physiologiques de la végétation doit être incluse.
- Le calcul des processus atmosphériques doit être pronostique et transitoire.

Dans cette étude, nous allons poursuivre la même approche que précédemment et utiliser une méthode de classification pour trier les modèles en fonction de l'échelle d'étude. Plus précisément, nous allons organiser les modèles en fonction de la portée de leur application, allant des modèles appliqués à une échelle large (mésoclimatique) aux modèles utilisés à une échelle moins globale (microclimatique). Cette classification nous permettra de mieux

comprendre les différents types de modèles et leur pertinence pour résoudre différents types de problèmes.

#### III.4.4.1 Modèles à l'échelle micro

Cette échelle permet une étude détaillée du climat à l'échelle d'une rue ou d'un quartier. Ces modèles investiguent la relation entre un fragment bâti, une rue ou un bloc de bâtiment et son microclimat en reproduisant les interactions entre les surfaces bâties, la végétation et l'atmosphère.

Ces modèles décrivent la ville à l'échelle du mètre et à fine échelle temporelle (environ 1 seconde). Ces modèles ont un grand coût de calcul. Ils ne sont donc pas adaptés pour décrire une ville complète et sa périphérie et ne peuvent tourner que sur quelques jours de simulation. Parmi ces modèles on peut citer :

##### III.4.4.1.1 Le modèle Solène

Développé en 1990 par des chercheurs et des ingénieurs du laboratoire CERMA<sup>16</sup> de Nantes, il permet d'étudier l'impact des aménagements urbains à l'échelle micro sur le confort thermique extérieur, la température et la consommation énergétique. Solène-microclimat prend en considération dans la simulation le bilan radiatif, les échanges convectifs thermiques et aérauliques et l'inertie thermique<sup>17</sup> des bâtiments. L'outil Solène considère la scène urbaine comme un ensemble de facettes triangulaire plane et il calcule l'éclairement solaire reçu par chacune des facettes.

Le flux solaire capté par chaque facette du modèle urbain est déterminé par calcul de la somme du flux incident direct et du flux diffus qui est calculé à partir d'un facteur de vu du ciel FVC. Pour le bilan des inters réflexions, Solène utilise la méthode de radiosité restreinte aux réflexions diffuses et isotropes<sup>18</sup>. Pour les géométries complexes, il est généralement couplé avec un modèle CFD (Code Saturne par exemple).

---

<sup>16</sup> Le CERMA, Centre de recherche méthodologique d'architecture, laboratoire créé en 1971 spécialisé dans les approches méthodologiques et numériques de l'environnement construit.

<sup>17</sup> « *La propriété thermique de surface qui régit la facilité avec laquelle un corps absorbe ou libère de la chaleur. C'est la racine carrée du produit de la conductivité thermique et de la capacité thermique* » (Oke et al., 2017).

<sup>18</sup> « *Ayant les mêmes propriétés physiques dans toutes les directions. Les processus soumis à des propriétés isotropes peuvent inclure la turbulence atmosphérique et le rayonnement.* » (Oke et al., 2017)

### III.4.4.1.2 Le modèle DAO

(Asawa et al., 2008) ont utilisé un modèle tridimensionnel de DAO pour représenter avec précision la géométrie d'un bâtiment et de son environnement. Le modèle est discrétisé pour donner un bilan thermique à chaque élément en prenant en compte des échanges par conduction, convection et rayonnement de courte et grande longueur d'onde.

Sur la base de ces modèles 3D, (He et al., 2009) ont comparé la répartition du rayonnement de courte et grande longueur d'onde pour différentes configurations urbaines, pour le climat de Tokyo pour une journée d'été représentative. Ils ont analysé aussi l'impact de l'environnement urbain sur les besoins en climatisation pour les configurations évaluées.

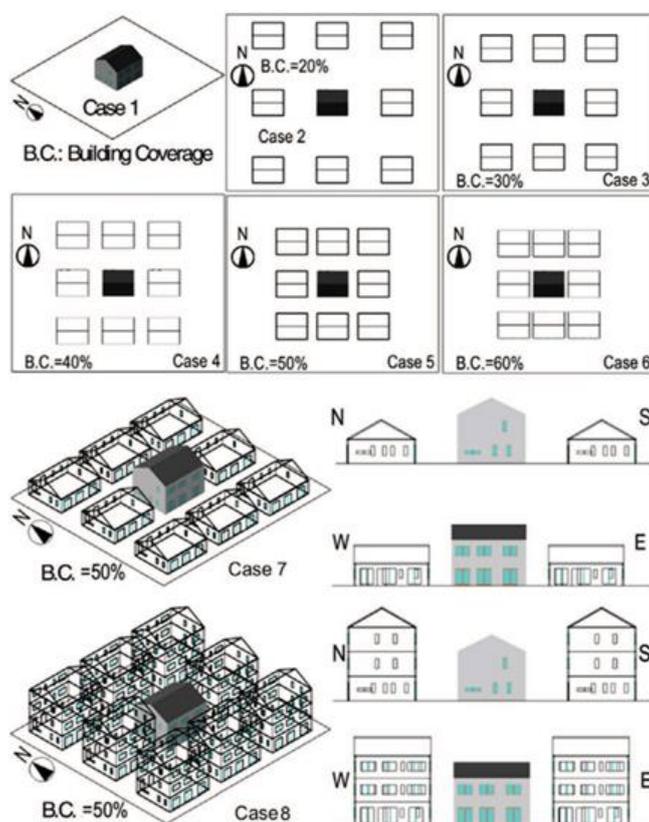


Figure I. 8 : Application du modèle DAO sur TOKYO. *Source* : (He et al., 2009).

### III.4.4.1.3 Le modèle City Sim

Ce modèle peut être utilisé pour un quartier comme il est fiable pour les études à l'échelle méso. En utilisant un modèle thermique dynamique de bâtiment basé sur l'analogie électrique<sup>19</sup> (D. Robinson et al., 2009) ont calculé les besoins énergétiques des bâtiments à

<sup>19</sup> Cf. Voir à ce propos le site :

[https://help.solidworks.com/2020/french/SolidWorks/cworks/c\\_Electrical\\_Analogy\\_of\\_Heat\\_Conduction.htm](https://help.solidworks.com/2020/french/SolidWorks/cworks/c_Electrical_Analogy_of_Heat_Conduction.htm).

l'échelle d'une ville ou d'un ensemble de bâtiments. Un calcul du rayonnement solaire est généralement associé à ce modèle simplifié pour comparer rapidement différentes formes urbaines dans le but d'optimiser l'impact de l'ensoleillement (Kämpf & Robinson, 2010).

Ce modèle présente une double capacité d'utilisation, puisqu'il est adapté pour les analyses au niveau du quartier et démontre également sa fiabilité pour les études à l'échelle méso. Les chercheurs ont mis en œuvre un modèle thermique dynamique de bâtiment, basé sur une analogie électrique (D. Robinson et al., 2009), pour évaluer les besoins énergétiques des bâtiments, qu'il s'agisse d'une ville entière ou d'un groupe de bâtiments. Dans le cadre de cette approche, une estimation du rayonnement solaire est généralement intégrée à ce modèle simplifié, permettant ainsi une comparaison rapide des différentes configurations urbaines dans le but d'optimiser l'impact de l'ensoleillement (Kämpf & Robinson, 2010).

#### *III.4.4.1.4 Rayman*

Rayman est un logiciel gratuit, facile à utiliser et il a été largement utilisé dans les études sur le climat urbain et le confort thermique extérieur. Développé dans le but d'évaluer le bioclimat humain et le confort thermique extérieur, les entrées pour ce logiciel sont des données météorologiques (la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et le rayonnement global de la couverture nuageuse), des données liées à la morphologie urbaine et d'autres entrées se réfèrent à des caractéristiques représentatives d'une personne (Djaghroui, 2021).

L'avantage principal du modèle est sa capacité à évaluer la situation biométéorologique humaine et d'approfondir l'évaluation de l'application de mesures d'adaptation et d'atténuation telle que la planification urbaine et la conception de la végétation urbaine en prenant en compte la morphologie et la végétation (Matzarakis et al., 2007).

#### *III.4.4.1.5 Le model ENVI-met*

Envi-met (Bruse, 2006) est un outil tridimensionnel qui a été spécialement conçu pour l'étude du microclimat urbain. Un système de modélisation microclimatique à haute résolution. Il s'agit d'un modèle microclimatique tridimensionnel conçu pour simuler les interactions surface-plante-air dans les environnements urbains avec une résolution typique jusqu'à 0,5m dans l'espace et 1 à 5 secs dans le temps.

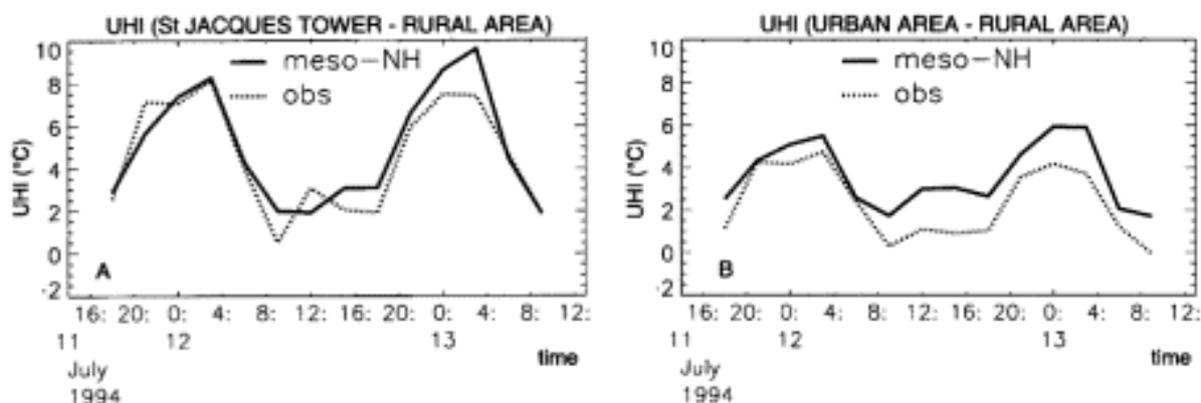
### III.4.4.2 Modèles à l'échelle méso

à l'échelle méso, le but est de modéliser les transferts de masse et d'énergie qui ont lieu dans l'atmosphère pour pouvoir définir des champs de vitesse et de température sur une région de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. À cette échelle, il n'est pas envisageable à partir d'un modèle atmosphérique de représenter explicitement l'ensemble des éléments de rugosité de la surface (bâtiment, arbre ...), et de considérer l'ensemble des échelles spatiales et temporelles des structures turbulentes (Dupont, 2009). Les modèles de canopée urbaine, fonctionnant à l'échelle d'une ville et de sa périphérie, reposent sur un bilan d'énergie effectué en surface. Ils peuvent être forcés par des données météorologiques issues de campagnes de mesures ou par un modèle météorologique méso échelle.

#### III.4.4.2.1 Le modèle TEB

Le modèle TEB ("Town Energy Balance" en anglais), (Masson, 2000) a développé TEB pour calculer les échanges d'énergie et d'eau entre les villes et l'atmosphère. Il a été inclus dans le module de modélisation surface-atmosphère SURFEX, lui-même couplé avec les modèles atmosphériques de prévision du temps (AROME, ARPEGE) et de recherche (MesoNH). TEB a aussi été couplé dans les modèles américains ARPS (pour étudier l'impact urbain sur les orages de Saint-Louis, USA, Rozoff et al 2003), RAMS et WRF. TEB, couplé au modèle atmosphérique MesoNH, reproduit fidèlement la météorologie locale induite par la ville.

La première étude d'îlot de chaleur avec TEB (Lemonsu et al 2002) a été faite sur l'agglomération parisienne, en été, l'îlot de chaleur urbain était environ 2°C le jour et pouvait atteindre plus de 8°C la nuit. Ceci a été très bien reproduit par le modèle.



**Figure I. 9** : Application du modèle TEB sur Paris. *Source* : (TEB - Centre National de Recherches météorologiques, 2014).

#### IV. Conclusion

Il est crucial de prendre en compte les effets des villes sur le climat et de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation, telles que la planification urbaine durable, l'utilisation de technologies propres et l'augmentation de la végétation, afin de contribuer à la lutte contre le changement climatique et de fournir un environnement plus sain et durable aux habitants urbains. Dans ce chapitre, les conclusions suivantes ont été tirées :

La complexité des interactions entre la ville et l'atmosphère nécessite une compréhension et une simplification des relations entre les différents paramètres. L'îlot de chaleur urbain résultant de ces interactions entraîne des effets négatifs, tels que l'augmentation de la consommation d'énergie, l'inconfort thermique extérieur et l'augmentation de la vulnérabilité des villes face au changement climatique.

Pour étudier les différents aspects de l'îlot de chaleur urbain, plusieurs méthodes de mesure sont disponibles, telles que les mesures in situ fixes et mobiles pour la température de l'air dans la canopée urbaine. Les mesures fixes sont plus adaptées à l'étude de la distribution temporelle de la température de l'air, tandis que les mesures mobiles sont plus appropriées pour l'analyse de la distribution spatiale de la température de l'air.

Les nombreux modèles utilisés pour simuler le climat urbain diffèrent par leur approche, leur formulation et leur échelle d'application. Certains de ces modèles ne sont pas adaptés aux problématiques de l'aménagement urbain. L'utilisation de modèles numériques complexes nécessite des compétences importantes en climatologie urbaine. En outre, les modèles simples, tels que les modèles empiriques, ne sont parfois pas applicables à toutes les villes.

# **CHAPITRE II :**

## ***Utilisation de la télédétection pour la détection et la cartographie des îlots de chaleur urbains de surface***

*« La télédétection est l'acquisition de données physiques sur un objet sans contact physique. Les satellites d'observation de la Terre sont utilisés depuis de nombreuses décennies dans de nombreux domaines d'application. Grâce aux avancées technologiques des capteurs, l'imagerie de la Terre est désormais possible à un niveau de détail sans précédent. Les spectromètres d'imagerie et les systèmes multispectraux thermiques acquièrent des informations spectroscopiques détaillées sur les propriétés physiques de la surface terrestre. Les processus dynamiques peuvent désormais être étudiés à l'aide de systèmes interférométriques. L'interférométrie SAR, l'altimétrie laser et l'imagerie haute résolution permettent une reconstruction tridimensionnelle très détaillée de la surface terrestre. Avec l'avènement des missions multi-capteurs, une nouvelle ère de l'imagerie s'ouvre, offrant la possibilité d'intégrer des données provenant de différents systèmes de capteurs. Les livres publiés dans cette série explorent ces sujets en télédétection et fournissent un cadre pour des approches avancées de traitement d'images numériques connexes. »*

*(Kuenzer & Dech, 2013)*

## I. Introduction

La télédétection est une méthode permettant de collecter des informations sur un objet ou une zone à distance. Les principes de la télédétection sont basés sur la mesure de l'interaction entre les rayonnements électromagnétiques et la surface terrestre. Elle permet de collecter des données à distance sur la température, la couverture végétale, la réflectivité de la surface terrestre,... etc. En utilisant des capteurs sur des satellites, des avions ou des drones, les images obtenues peuvent être analysées pour mesurer les effets de l'urbanisation sur le climat local et aider à développer des solutions pour les atténuer. Dans différents domaines d'études ou de recherches, les données de télédétection thermique sont largement utilisées pour divers domaines d'application tels que l'évaluation de la dynamique de la température de surface sur diverses utilisations/couverture terrestre. La détection et l'analyse de l'humidité du sol, la cartographie des îlots de chaleur urbains, pour cartographier et surveiller les éruptions volcaniques, les recherches sur les zones géothermiques, cartographie minérale, analyse des profils thermiques de surface pour détecter la pollution des forêts et des eaux thermales, identification de différentes surfaces géologiques (Czajkowski et al., 2000; Denniss, 1995; Goward et al., 2002).

Ce chapitre propose une exposition détaillée de la technique de télédétection thermique, en commençant par une présentation des principes généraux de la télédétection. L'objectif principal est de fournir une compréhension approfondie de la télédétection thermique, en mettant l'accent sur les capteurs thermiques disponibles et en examinant en détail la mesure de la température de surface terrestre. Il fournit une analyse détaillée de la télédétection thermique, en couvrant les aspects clés tels que les capteurs thermiques, les algorithmes de détection, les corrections nécessaires, les méthodes de validation et la relation entre la température de surface terrestre et la température de l'air. Cette exploration approfondie est essentielle pour une compréhension solide de la télédétection thermique et de son application dans le domaine de l'étude des températures terrestres.

## II. La télédétection

### II.1 Définition

Le terme télédétection « remote sensing » désigne, dans son acception générale, un ensemble de techniques permettant de mesurer à distance des grandeurs physiques caractéristiques des objets ou des phénomènes étudiés. Toutefois, en pratique, il est surtout

utilisé pour les applications spatiales et aéroportées, et concerne essentiellement les techniques mises en œuvre pour l'observation de la surface de la Terre et d'autres planètes. Ces systèmes nécessitent l'utilisation de capteurs qui sont embarqués sur des ballons, des avions, des navettes ou des satellites. Ils exploitent essentiellement la mesure du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les objets (DELCLAUX, 2023).

## II.2 Principe de télédétection

(A) La source de l'énergie, pour illuminer la cible

(B) Le rayonnement et l'atmosphère : l'espace entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère

(C) L'interaction avec la cible : l'interaction entre l'énergie et la surface de la cible dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés physiques de la surface

(D) Enregistrement de l'énergie par le capteur : le capteur reçoit et enregistre l'énergie émise par la cible.

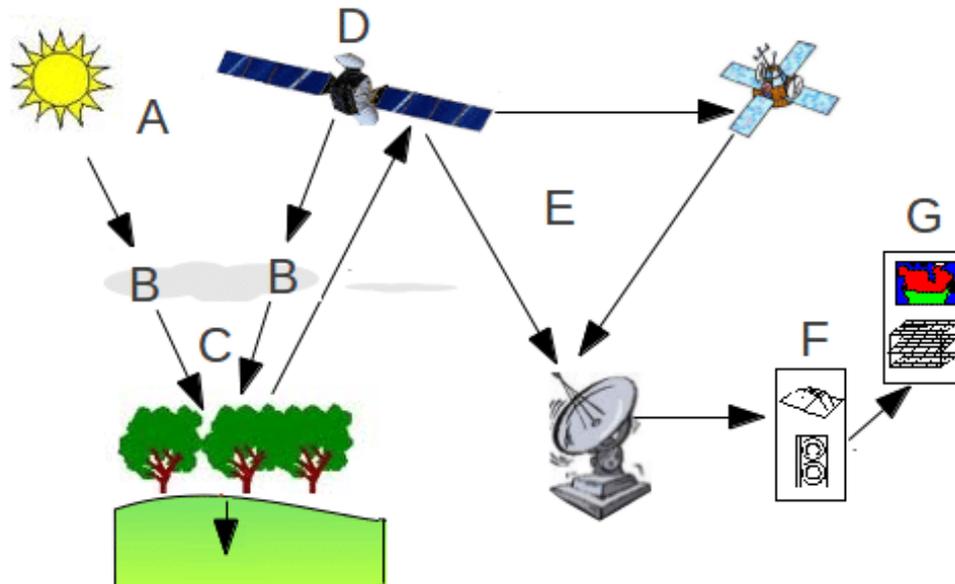


Figure II. 1: Principe de la télédétection. Source : (Canada, 2008).

(E) Transmission, réception et traitement : l'énergie stockée est transmise à une station de réception généralement par des moyens électroniques, ou l'information est convertie en image (numérique ou photographique)

(F) Interprétation et analyse : l'extraction de l'information souhaitée avoir sur la cible est faite par l'interprétation (visuelle ou numérique) de l'image traitée

(G) L'utilisation de l'information détectée est la dernière étape dans le processus de la télédétection

### II.3 Type de télédétection

La télédétection diffère selon le capteur utilisé en :

- Télédétection passive : le capteur passif consiste seulement à percevoir l'énergie réfléchi lorsque le soleil illumine la terre.
- Télédétection active : le capteur actif produit sa propre énergie pour éclairer la cible, il dégage un rayonnement électromagnétique vers la cible, le rayonnement réfléchi par la cible est alors reçu en retour et mesuré par le capteur.

Les capteurs passifs fournissent des images pour le jour seulement, tandis que les capteurs actifs ont l'avantage de pouvoir prendre des captures à n'importe quel moment.

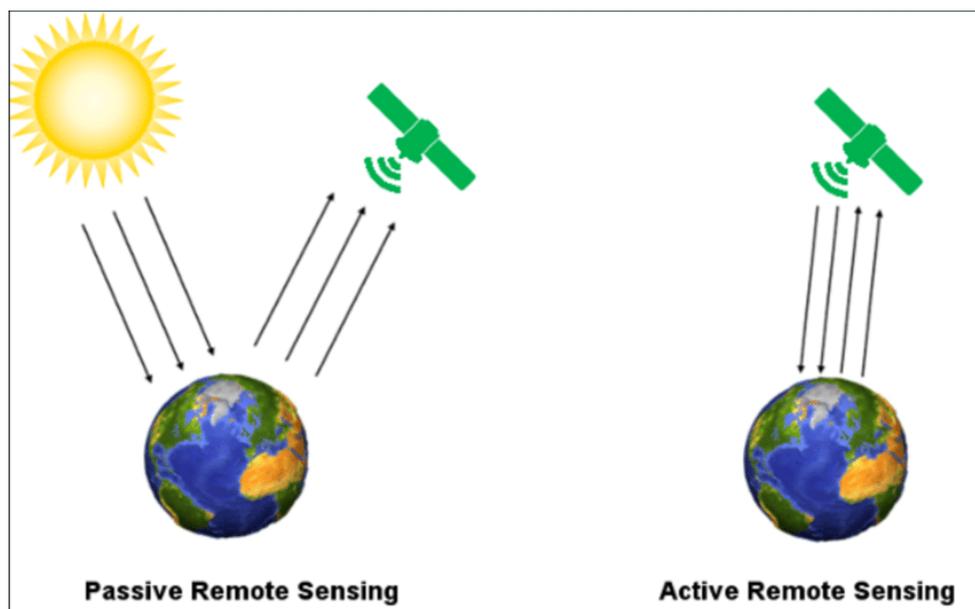


Figure II. 2: À droite capteur actif, à gauche capteur passif. Source : (Ornelas, 2016).

### II.4 Base physique de télédétection

#### II.4.1 Spectre magnétique

Le spectre électromagnétique est un concept fondamental qui englobe l'ensemble des longueurs d'onde associées à la lumière, se manifestant à travers une gamme allant des longueurs d'onde les plus courtes, telles que les rayons gamma et les rayons X, jusqu'aux longueurs d'onde les plus longues, incluant les micro-ondes. Dans le domaine de la

télédétection, il existe un ensemble de termes largement adoptés pour caractériser les différentes régions spectrales. D'une manière générale, ces régions spectrales se réfèrent à des plages spécifiques et sont désignées par des noms distincts, tels que :

- **La région visible (VIS):** une bande étroite formée par les longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique détectées par les yeux humains, elle s'étend entre 0,4 $\mu$ m et 0,7 $\mu$ m. elle comprend les trois couleurs principales le bleu de 0,4 à 0,5  $\mu$ m, le vert de 0,5 à 0,6  $\mu$ m et le rouge de 0,6 à 0,7  $\mu$ m (Chuvienco, 2009).
- **La région du proche infrarouge (NIR) :** s'étale entre 0,7 et 1,2  $\mu$ m. Cette plage du spectre est juste au-delà de l'œil humain. La capacité de distinguer la végétation verte lui donne un intérêt spatial. Dans cette région, la végétation saine a une forte réflectance et peut diminuer avec la croissance d'une maladie des plantes (Tempfli et al., 2009).
- **La région du moyen infrarouge (MIR) :** varie de 1,2 à 8  $\mu$ m. Située entre les régions NIR et infrarouge thermique. De 1,2 à 3  $\mu$ m est appelée zone infrarouge à ondes courtes (SWIR). La région de 1,3 à 2,5  $\mu$ m est principalement utilisée pour estimer la teneur en humidité du sol et de la végétation, tandis que la plage de 3 à 5  $\mu$ m est utile pour percevoir les sources de haute température (Rasul, 2016).
- **La région infrarouge thermique (TIR) :** commence généralement de 8 à 14  $\mu$ m. Cette région est l'énergie émise par la surface de la Terre, qui est utile pour cartographier les températures de surface. La longueur d'onde maximale de l'émission thermique de la surface terrestre à (300 K) est située à 10  $\mu$ m. De plus, un corps humain libère de l'énergie thermique, avec un maximum de 10  $\mu$ m (Rasul, 2016).
- **La région des micro-ondes (>1 mm) :** est une région de très longue longueur d'onde qui est transparente à la couverture nuageuse et à la canopée forestière. Elle est utile dans les analyses de l'humidité du sol et de la rugosité de surface (Chuvienco, 2009).

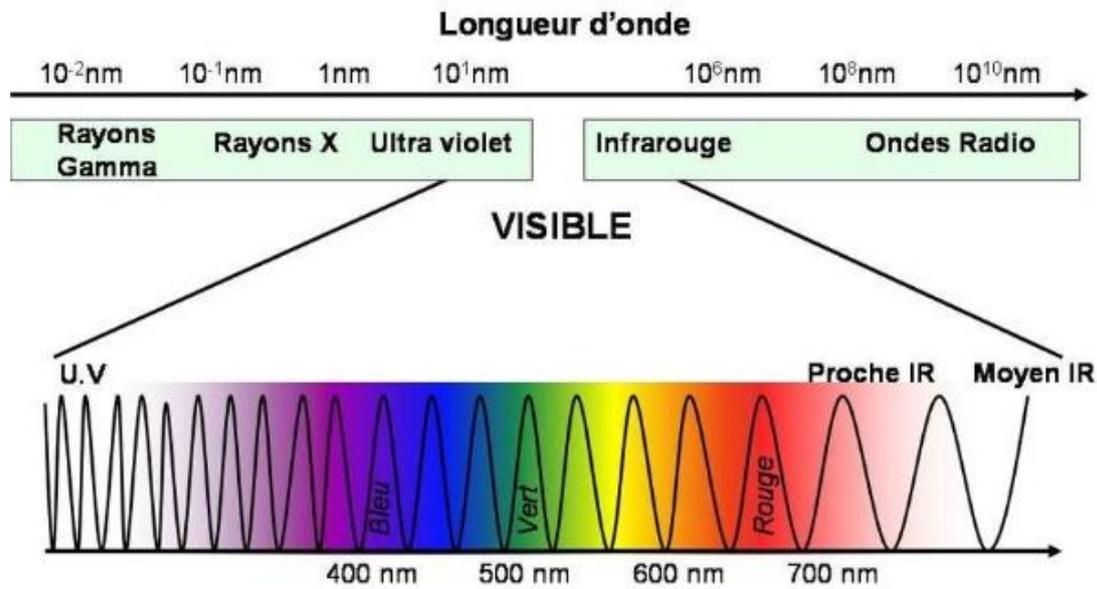


Figure II. 3: Le Spectrum magnétique. Source : (Bargain, 2012).

#### II.4.2 La théorie du corps noir

En physique, le concept du corps noir fait référence à une surface qui absorbe intégralement toute l'énergie rayonnante incidente. Lorsque de la lumière visible atteint cette surface, elle est absorbée plutôt que réfléchi, ce qui donne à la surface une apparence noire. La notion d'un tel absorbeur d'énergie parfait est d'une grande utilité dans l'étude des phénomènes de rayonnement, notamment dans la loi de rayonnement de Planck (équation 2.1), qui décrit la distribution spectrale de l'énergie du rayonnement réémis après son absorption.

Le corps noir le plus proche de la perfection pratique est représenté par un petit orifice situé dans une enceinte recouverte d'un matériau noir à l'intérieur. Dans ce cas, pratiquement aucun rayonnement pénétrant dans l'orifice ne peut s'échapper à nouveau, mais sera plutôt absorbé à l'intérieur. Une surface recouverte de noir de lampe absorbe environ 97 % de la lumière incidente et peut donc être considérée, dans la plupart des cas, comme un corps noir. En revanche, les surfaces métalliques polies n'absorbent qu'environ 6 % du rayonnement incident, réfléchissant le reste (Encyclopaedia Britannica, 2023).

La loi de Planck est l'une des lois fondamentales qui gouvernent le comportement des rayonnements électromagnétiques. Cette loi permet de caractériser la distribution spectrale du rayonnement électromagnétique émis par un corps noir (un émetteur parfait) de la manière suivante (Rasul, 2016) :

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right\}} \quad (II.1)$$

Où :

$M_{n,\lambda}$  : la sortie spectrale radiance en  $W/m^2/sr/\mu m$

$h$  : la constante de Plank ( $6.626 \times 10^{-34} Ws^2$ )

$k$  : la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} Ws^2K^{-1}$ )

$c$  : la vitesse de la lumière

$\lambda$  : la longueur d'onde en mètre

$T$  : la température du corps noir en Kelvin

Cette loi signifie l'émission maximale qu'un corps peut atteindre. En raison de l'agitation moléculaire<sup>1</sup>, tous les matériaux dont la température est supérieure à zéro absolu (0 K) émettent de l'énergie électromagnétique. Un matériau qui est capable d'absorber et de réémettre toute l'énergie électromagnétique qui est reçue est appelé un corps noir.

En réalité, les corps noirs n'existent pas et les matériaux émettent des niveaux inférieurs. On pourrait l'exprimer de la façon suivante :

$$M = \varepsilon(\lambda) M_{n,\lambda} \quad (II.2)$$

Où :

$M_{n,\lambda}$  : la sortie spectrale radiance en  $W/m^2/sr/\mu m$

$\varepsilon(\lambda)$  : l'émissivité spectrale, varie entre 0 et 1 (Tupin et al., 2014).

### III. Les satellites

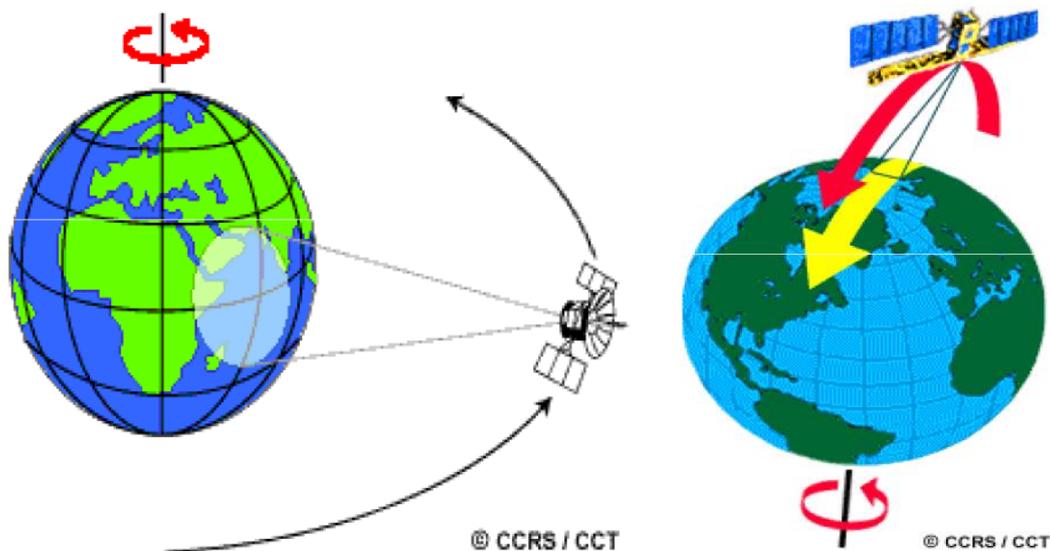
Des objets qui sont en orbite autour de la Terre (par exemple : la lune est un satellite naturel de la terre). Grâce à leur orbite, les plates-formes spatiales permettent une couverture répétitive et continue de la surface terrestre. On distingue deux types de satellites :

- Certains ont une altitude très élevée et couvrent toujours la même région de la surface terrestre, ils ont **une orbite géostationnaire**.

<sup>1</sup> Cf. consulter le site : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-tout-savoir-effet-serre-1954/page/8/>

Ces satellites géostationnaires (**Figure II. 4**) ont une altitude d'environ 36 000 kilomètres et se déplacent à une vitesse qui correspond à celle de la terre, donnant ainsi l'impression qu'ils sont stationnaires. Cette configuration orbitale permet au satellite d'observer et d'amasser continuellement de l'information sur une région spécifique. Les satellites de communication et d'observation des conditions météorologiques se situent sur de telles orbites.

- Les satellites à **orbite héliosynchrone** suivent une orbite allant pratiquement du nord au sud ou vice versa (**Figure II. 5**).



**Figure II. 4:** À gauche satellite à orbite géostationnaire, à droite, les satellites à orbite héliosynchrone. **Source :** (Canada, 2008a).

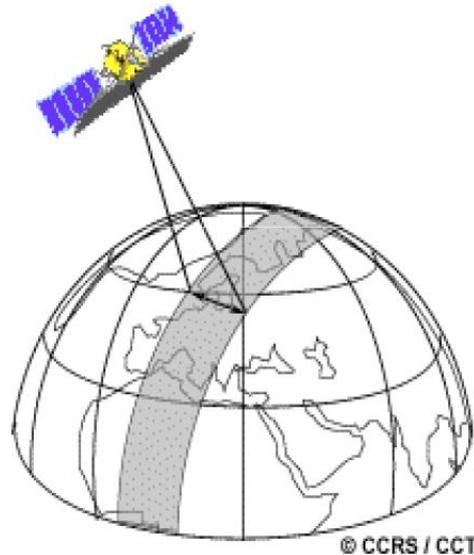
Cette configuration combinée à la rotation de la Terre (ouest-est) fait qu'au cours d'une certaine période, ces satellites peuvent observer presque la totalité de la surface de la Terre, autrement appelée orbite quasi polaire à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la terre, observe chaque région du globe à la même heure locale solaire. La plupart des satellites sont placés sur orbite quasi polaire. Ils se déplacent donc vers le nord d'un côté de la terre et vers le sud dans l'autre moitié de leur orbite.

Ces deux types de passage du satellite se nomment respectivement orbite ascendante et orbite descendante. Si l'orbite est aussi héliosynchrone, l'orbite ascendante du satellite se fait du côté ombragé de la terre tandis que l'orbite descendante se fait du côté éclairé par le soleil.

Lorsqu'un satellite est en état d'orbite autour de la Terre, son capteur réalise des observations sur une portion spécifique de la surface terrestre. Cette zone d'observation est désignée sous le terme de "couloir couvert" ou "fauchée" (**Figure II. 5**). La largeur de ce

couloir, ou fauchée, généralement située entre quelques dizaines et quelques centaines de kilomètres, peut varier.

Les points sur la surface terrestre directement situés sous la trajectoire du satellite sont appelés les "points nadir". Il convient de noter que les satellites en orbite quasi polaire ont une couverture plus fréquente des régions de hautes latitudes par rapport à leur couverture des zones équatoriales.



*Figure II. 5:* les couloirs couverts ou fauchés. *Source :* (Canada, 2008a).

Les satellites peuvent être classés aussi selon le nombre de capteurs thermiques, une bande thermique comme Landsat ETM+, deux bandes thermiques comme Landsat 8 OLI-TIR, NOAA, AVHRR, ASTR, et multiples bandes thermiques comme MODIS et ASTER (**Tableau II. 1**).

**Tableau II. 1** : Capteurs thermiques pour détecter l'énergie émise par la terre. *Source* : adapté de (Rasul, 2016).

Satellite	Bande	Résolution spatiale
Landsat 8	10 et 11	100
ETM land SAT 7	6	60
TM land SAT 5	6	120
AVHRR/NOAA	3, 4 et 5	1100
MODIS Aqua/Terra	20, 22, 23, 29, 31, 32 et 33	1000
ASTER/Aqua	10, 11, 12, 13 et 14	90
SLSTR/Sentinel-3	S7, S8, et S9	1000

#### **IV. La télédétection thermique urbaine**

La télédétection infrarouge thermique a connu une adoption croissante au cours des dernières années dans les recherches portant sur le climat urbain. Son utilisation principale consiste à analyser les modèles de température de surface (LST), évaluer l'îlot de chaleur urbain de surface (ICUS) et établir des liens entre le LST et les flux d'énergie de surface (Liu & Weng, 2008). L'application de la télédétection à l'ICUS a débuté en 1972, lorsque la NASA a lancé le Satellite de Technologie des Ressources Terrestres (ERTS, rebaptisé plus tard Landsat 1). À partir de ce moment, une phase avancée de télédétection a commencé, marquant un jalon dans l'histoire des observations de la Terre (Lauer et al., 1997).

Avant d'aborder la télédétection infrarouge thermique, il est préférable de clarifier le terme "thermique". Les données thermiques sont obtenues lorsque l'énergie radiante est détectée par des capteurs thermiques et qu'elle représente un composite de l'énergie émise par la surface terrestre qui est transmise à travers l'atmosphère sans être absorbée (Czajkowski et al., 2000). Ces données peuvent être obtenues à l'aide de différentes techniques :

- Mesures au sol réalisées directement à l'aide d'instruments sur le terrain, tels qu'un thermomètre infrarouge permettant de mesurer la température ou l'humidité de la surface.

- Données thermiques aéroportées provenant de sources telles que la technologie de drones équipés de caméras thermiques (Calastrenc et al., 2020).
- Données acquises à partir de satellites, utilisées dans cette étude pour récupérer la température de surface (LST) et étudier l'effet de l'îlot de chaleur urbain de surface (ICUS).

Les données thermiques TIRS fournissent une vision continue et simultanée de l'ensemble de la zone étudiée, en enregistrant l'énergie radiative émise par différentes surfaces telles que les toits des bâtiments, les surfaces pavées, la végétation, le sol nu et les plans d'eau (Srivanit et al., 2012).

La télédétection infrarouge thermique est une technique permettant d'acquérir des données thermiques en détectant l'énergie infrarouge thermique émise par tous les objets ayant une température supérieure à zéro absolu, dans une plage de longueurs d'onde de 3,0 à 14  $\mu\text{m}$ . Cependant, il convient de noter que différentes sources présentent légèrement différemment cette plage TIRS, avec environ 80 % des capteurs thermiques d'énergie recevant des longueurs d'onde de 10,5 à 12,5  $\mu\text{m}$  (Becker & Li, 1990). La télédétection thermique se concentre sur l'observation des variations de la température de la surface du sol dans les zones urbaines en raison du bilan énergétique de la surface. La température de surface LST combine les influences des effets radiatifs de surface, de l'humidité de surface, de l'advection thermique et de l'émissivité de surface.

#### IV.1 La température de surface terrestre LST

La température de surface terrestre (LST) est la température cutanée radiative de la surface terrestre et des processus de surface terrestre à l'échelle locale et mondiale ou elle peut être définie comme une température moyenne des caractéristiques de la surface exacte de la Terre calculée à partir de la radiance mesurée (Kayet et al., 2016). C'est une propriété fondamentale de la surface de la Terre qui peut être déterminée à distance.

##### IV.1.1 Algorithmes de la détection de la température de surface

En raison des avancées dans le développement de capteurs thermiques variés, la diversité des bandes thermiques et la sensibilité des données thermiques aux conditions atmosphériques, plusieurs méthodes ou algorithmes ont été développés pour traiter les données acquises par ces capteurs thermiques. Cette section présentera trois algorithmes de détection de

la température de surface terrestre à partir des données du satellite Landsat 8, basés sur le travail réalisé par L. Wang et al. en 2019.

#### IV.1.1.1 L'algorithme mono-fenêtre (Mono-window algorithm MWA)

L'algorithme mono-fenêtre de Qin est montré dans *l'équation II.3*. Cet algorithme nécessite trois paramètres : la température atmosphérique moyenne effective ( $T_a$ ), l'émissivité de la surface terrestre ( $\varepsilon$ ) et la transmission atmosphérique ( $\tau$ ). Toutefois, *l'équation II.3* est proposée pour les images TM (Landsat 5). Donc cet algorithme doit être amélioré pour le rendre adapté aux images Landsat 8. (Wang et al., 2015) ont amélioré l'algorithme et l'ont adapté à la bande 10 de Landsat 8. Le nouveau algorithme est appelé algorithme mono-fenêtre amélioré comme le montre *l'équation II.4*.

$$T_s = [a_6(1 - C_6 - D_6) + (b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6) \cdot T_6 - D_6 T_a] / C_6 \quad (II.3)$$

$$T_s = [a_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + (b_{10}(1 - C_{10} - D_{10}) + C_{10} + D_{10}) \cdot T_{10} - D_{10} T_a] / C_{10} \quad (II.4)$$

Où :

$a_{10}$  et  $b_{10}$  sont des constantes, et leurs valeurs sont différentes dans différentes plages de température comme le montre le *Tableau I. 1*.

$C_{10}$  et  $D_{10}$  sont des paramètres de l'émissivité de la surface terrestre LSE ( $\varepsilon_{10}$ ) et de la transmittance atmosphérique ( $\tau_{10}$ ), et les méthodes de calcul sont présentées dans les équations *II.5* et *II.6*, respectivement.

$T_a$  est la température atmosphérique moyenne effective.

**Tableau II. 2** : détermination des coefficients  $a_{10}$  et  $b_{10}$  pour la bande 10 du Landsat 8. *Source* : (L. Wang et al. 2019).

Plage de température	$a_{10}$	$b_{10}$	R <sup>2</sup>
20 – 70 C°	-70.1775	0.4581	0.9997
0 – 50 C°	-62.7182	0.4339	0.9996
-20 – 30 C°	-55.4276	0.4086	0.9996

$$C_{10} = \varepsilon_{10} \times \tau_{10} \quad (II.5)$$

$$D_{10} = (1 - \tau_{10}) \times [1 + (1 - \varepsilon_{10}) \times \tau_{10}] \quad (II.6)$$

*IV.1.1.2 L'algorithme de fractionnement des fenêtres (split window algorithm SWA)*

(McMillin, 1975) a proposé à l'origine l'algorithme de fractionnement des fenêtres. C'est un algorithme d'observation de la température de surface des océans basé sur les données infrarouges thermiques AVHRR<sup>2</sup>. Le principe est que deux bandes infrarouges thermiques adjacentes ont des caractéristiques d'absorption différentes, l'information sur l'atténuation du rayonnement thermique par l'atmosphère peut être obtenue par la différence entre les températures de luminosité des deux bandes TIRS. Le SWA est largement utilisé en raison du fait que cet algorithme est moins dépendant des paramètres atmosphériques et est simple à utiliser.

$$T_s = A_0 + A_1 T_{10} - A_2 T_{11} \quad (II.7)$$

Où :

$T_s$  : la température de surface terrestre LST

$T_{10}$  et  $T_{11}$  : la température de luminosité de la bande 10 et de la bande 11 respectivement.

$A_0$ ,  $A_1$  et  $A_2$  : les paramètres peuvent être calculés à l'aide des formules suivantes :

$$A_0 = E_1 a_{10} + E_2 a_{11} \quad (II.8)$$

$$A_1 = 1 + A + E_1 b_{10} \quad (II.9)$$

$$A_2 = A + E_2 B_{11} \quad (II.10)$$

$$C_i = \varepsilon_i \tau_i \quad (II.11)$$

$$D_i = (1 - \tau_i)[1 + (1 - \varepsilon_i)\tau_i] \quad (II.12)$$

$$A = D_{10}/E_0 \quad (II.13)$$

$$E_1 = D_1 D_{11}(1 - C_{10})/E_0 \quad (II.14)$$

$$E_2 = D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})/E_0 \quad (II.15)$$

$$E_0 = D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11} \quad (II.16)$$

---

<sup>2</sup> Le radiomètre à très haute résolution avancée (AVHRR) réalise des mesures de la température de surface des terres et des océans, de la couverture nuageuse, de la couverture neigeuse et glaciaire, de l'humidité du sol et des indices de végétation. Les données sont également utilisées pour la surveillance des éruptions volcaniques. URL : (<https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/avhrr>).

Où :

$\varepsilon_i$  : la LES de la bande i

$\tau_i$  : la transmission atmosphérique de la bande i

Les façons de les calculer sont indiquées ci-dessus. La différence est que, pour la SWA, la LES et la transmittance atmosphérique devrait être calculée séparément pour la bande 10 et la bande 11.

$a_{10}$ ,  $b_{10}$ ,  $a_{11}$  et  $b_{11}$  sont des constantes, leurs valeurs sont données par (Rozenstein et al., 2014) comme le montre le **Tableau II. 3**.

**Tableau II. 3** : les valeurs de :  $a_{10}$ ,  $b_{10}$ ,  $a_{11}$  et  $b_{11}$ . *Source* :(L. Wang et al., 2019).

Plage de température	$a_{10}$	$b_{10}$	$r_{10}^2$	$SEE_{10}$	$a_{11}$	$b_{11}$	$r_{11}^2$	$SEE_{11}$
0 - 30	-59.1391	0.4213	0.9991	0.0424	-63.3921	0.4565	0.9991	0.0438
0 - 40	-60.9196	0.4276	0.9985	0.0746	-65.2240	0.4629	0.9985	0.0769
10 - 40	-62.8065	0.4338	0.9992	0.0415	-67.1728	0.4694	0.9992	0.0427
10 - 50	-64.6081	0.4399	0.9986	0.0730	-69.0215	0.4756	0.9986	0.0750

#### IV.1.1.3 La méthode à canal unique (single channel SC)

La méthode à canal unique (SC) a été proposée en 2003 (Jiménez-Muñoz & Sobrino, 2003) et améliorée en 2009 par (Jimenez-Munoz et al., 2009). Cet algorithme ne nécessite que deux paramètres d'entrée, la LSE ( $\varepsilon$ ) et la teneur en vapeur d'eau atmosphérique ( $\omega$ ). À la différence de la MWA, la méthode SC n'a pas besoin de la température atmosphérique moyenne effective ( $T_a$ ) et la teneur en vapeur d'eau atmosphérique n'a pas besoin d'être calculée en fonction de la transmission atmosphérique, ce qui réduit l'erreur du LST finale récupérée en raison de l'erreur de la température atmosphérique moyenne efficace ( $T_a$ ). Pour ces avantages, après la proposition de l'algorithme à canal unique, il a été utilisé par de nombreux chercheurs pour divers types de télédétection infrarouge thermique, tels que Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, MODIS, ASTER et ENVISAT AATSR.

En 2014, Jiménez-Muñoz et Sobrino (Jiménez-Muñoz et al., 2014) ont amélioré la méthode SC pour Landsat 8 et ont calculé les paramètres correspondants, les formules de la méthode SC sont présentées comme suit :

$$T_s = \gamma [1 \varepsilon (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad (II.17)$$

Où :

$T_s$  : est la température de surface terrestre LST

$\varepsilon$  : est l'émissivité de la surface terrestre LSE

## IV.2 Le prétraitement des images satellitaires de Landsat 8

Les images acquises par les capteurs Landsat 8 sont sujettes à des distorsions dues à des effets de capteurs, solaires, atmosphériques et topographiques (Young et al., 2017). Le prétraitement tente à minimiser ces effets dans la mesure souhaitée pour une application particulière. La détermination du niveau approprié de prétraitement constitue un obstacle important pour les non spécialistes de la télédétection (Pettorelli et al., 2014). Cette difficulté est exacerbée par des approches de prétraitement, chacune avec de nombreux flux de travail possibles que les spécialistes doivent naviguer. Toutefois, les étapes de prétraitement prennent du temps, traitent imparfaitement les artefacts à retirer et peuvent présenter d'autres sources d'erreur. Avant de prétraiter l'imagerie Landsat 8, il est important de comprendre les unités couramment associées à ces données : nombre numérique (DN), radiance et réflectance pour les bandes optiques et thermiques visibles à SWIR (vis-SWIR) et pour les bandes thermiques, radiance et température (*Figure II.6*).

Le prétraitement de ces unités spécifiques suit généralement un flux de travail général (*Figure II.7*). La plupart des étapes peuvent être classées en trois grands groupes : **géométriques absolus** et **relatifs**. Certaines étapes convertissent l'imagerie d'une unité à l'autre (p. ex., rayonnement au capteur à la réflectance au sommet de l'atmosphère par correction solaire), tandis que d'autres visent spécifiquement les artefacts potentiels (p. ex., correction topographique).

Les étapes de prétraitement peuvent être mises en œuvre à l'aide de divers logiciels qui continuent de se développer et de s'améliorer (ENVI, MATLAB, Geomatica, Arcgis, Qgis, Google Earth Engine...etc.). Certaines de ces logiciels fournissent une interface graphique (Arcgis) tandis que d'autres utilisent le traitement en ligne de commande (Google Earth Engine) qui nécessite l'entrée de code. Par conséquent, la sélection des logiciels est largement dictée par la familiarité du chercheur avec le logiciel ainsi que par les exigences d'une analyse donnée (Young et al., 2017).

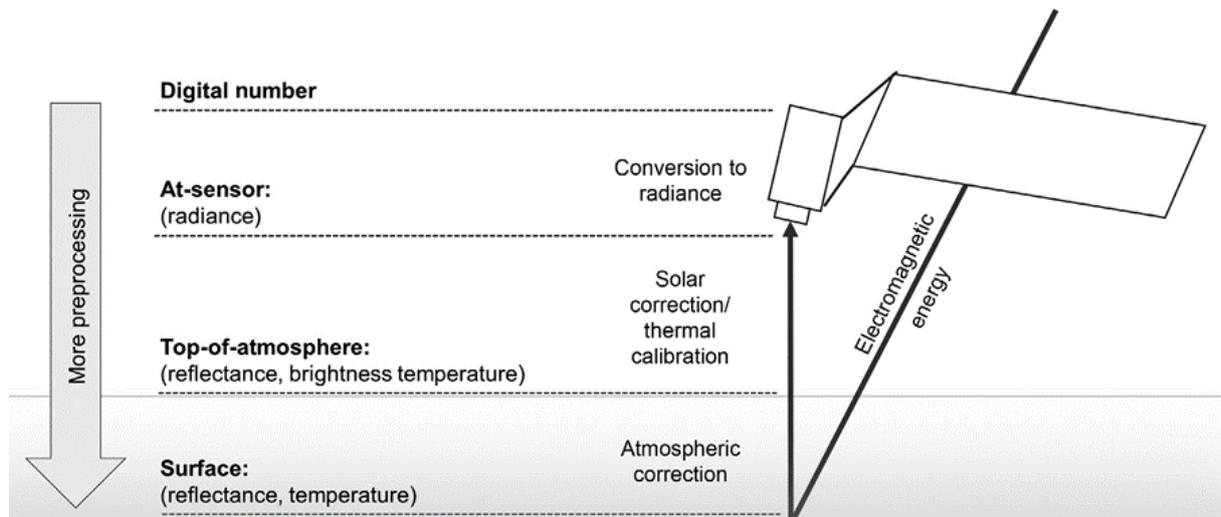


Figure II. 6 : Étapes de prétraitement des images satellitaires. *Source* : (Young et al., 2017).

#### IV.2.1 Correction géométrique

Les processus de géoréférencement (alignement de l'imagerie sur son emplacement géographique correct) et d'orthorectification (correction des effets du relief et de la direction de la vue sur l'emplacement des pixels) sont des composantes de la correction géométrique, une étape importante pour assurer le positionnement exact d'une image. L'imagerie peut être positionnée par rapport au système de référence, à la topographie ou à d'autres types de données (Young et al., 2017). Les produits Landsat Level-1 sont appelés « **terrain-corrected** » et la majorité des images peuvent être utilisées telles que livrées par l'USGS<sup>3</sup>. Les images de la collection 1 sont classées en niveaux selon la qualité et le niveau de traitement (USGS, 2016). Les autres niveaux ne sont pas nécessairement aussi précis et devraient être évalués au cas par cas.

#### IV.2.2 Correction radiométrique absolue

La correction radiométrique absolue (parfois appelée correction absolue) peut se rapporter à une seule étape de prétraitement ou à une série d'étapes qui tiennent compte des effets des capteurs, du soleil, de l'atmosphère et de la topographie (Young et al., 2017). Le terme absolu est utilisé pour décrire le processus d'obtention de valeurs « vraies » et comparables, bien que les valeurs corrigées soient encore des approximations.

<sup>3</sup> L'Institut d'études géologiques des États-Unis (en anglais : United States Geological Survey, USGS) est un organisme gouvernemental américain qui se consacre aux sciences de la Terre. Il est notamment chargé de la surveillance de l'activité sismique sur son territoire et à travers le monde.

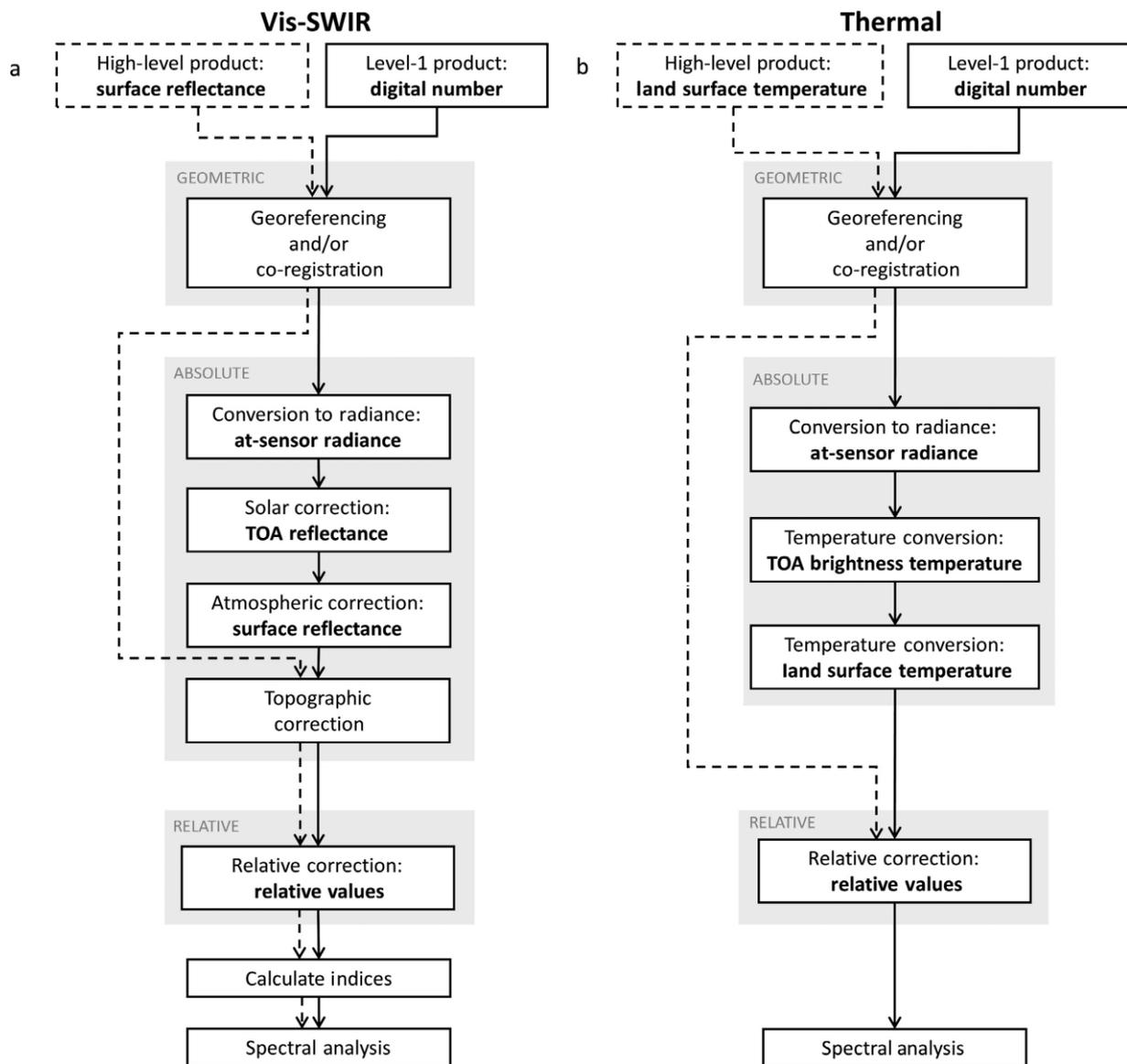


Figure II. 7 : Organigramme montrant les détails de chaque étape de prétraitement. Source : (Young et al., 2017).

#### IV.2.2.1 Conversion en radiance

Des efforts importants ont été déployés pour que les données recueillies dans le cadre des multiples missions de Landsat 8 et des dates d'acquisition atteignent une échelle commune pour une surveillance constante de la Terre dans le temps (Chander et al., 2009; Markham & Helder, 2012). L'étape de conversion en radiance est nécessaire avant d'autres étapes de correction absolue. Les nombres numériques DN ne peuvent pas être utilisés pour comparer les valeurs spectrales à travers le temps en raison de la gradation des capteurs et des différences entre les capteurs. Bien que les DN puissent être utilisés efficacement pour de nombreuses analyses, une correction absolue est nécessaire pour amener les valeurs à une échelle

comparable. La conversion en radiance est l'étape de prétraitement par laquelle les DN sont convertis en radiance<sup>4</sup> (souvent appelée radiance au niveau du capteur) en utilisant des coefficients d'étalonnage associés à chaque bande pour un capteur donné. Les facteurs de redimensionnement sont stockés dans le fichier de métadonnées associé à chaque image<sup>5</sup>.

#### IV.2.2.2 La correction solaire

La correction solaire tient compte des influences solaires sur les valeurs de pixel. Elle consiste à réduire la radiance du capteur à la réflectance de la partie supérieure de l'atmosphère (TOA) en intégrant l'irradiation solaire exo atmosphérique<sup>6</sup> (puissance du soleil), la distance Terre-Soleil et l'angle d'élévation solaire. Ceux-ci varient selon la date, l'heure et la latitude, de sorte que leurs effets doivent être pris en compte lorsque l'on travaille sur plusieurs images, même dans une seule scène. La réflectance au sommet de l'atmosphère est une mesure de la proportion de rayonnement entrant réfléchi à partir d'une surface détectée au-dessus de l'atmosphère.

Les valeurs de correction solaire pour les données Landsat 8 peuvent être extraites des fichiers de métadonnées associés à chaque image ou, dans certains cas, trouvées dans les documents scientifiques. Landsat 8 fournit des coefficients à convertir directement en un produit de réflectance TOA à partir de DN, mais cela ne devrait pas être considéré comme une véritable réflectance TOA puisque le processus ne fournit pas de correction pour l'angle d'élévation solaire (USGS 2014).

#### IV.2.2.3 La correction atmosphérique

L'énergie captée par les capteurs Landsat 8 est absorbée par l'atmosphère terrestre. Ces effets comprennent la dispersion et l'absorption dues aux interactions du rayonnement électromagnétique avec les particules atmosphériques (gaz, vapeur d'eau et aérosols). La correction atmosphérique tente de tenir compte de ces effets. Cependant, certains effets

---

<sup>4</sup> « Le taux auquel l'énergie radiante dans un ensemble de directions, limitées à un angle solide unitaire, est transférée à travers une unité de surface projetée dans cette direction ( $W m^2 sr^{-1}$ ). Contrairement à l'irradiance, il s'agit d'une propriété exclusive du champ de radiation et non de l'orientation de la surface. » (Oke et al., 2017)

<sup>5</sup> Cf. Annexe 04

<sup>6</sup> L'irradiation solaire mesure la quantité d'énergie par unité de surface du rayonnement solaire incident sur une surface. C'est-à-dire la puissance reçue pendant un temps ( $J/m^2$  ou  $Wh/m^2$ ).

atmosphériques sont très variables à la surface de la Terre et peuvent être difficiles à corriger dans l'imagerie de Landsat 8. Bien qu'il ne soit pas toujours nécessaire de corriger les données Landsat en fonction des valeurs de surface, ce niveau de correction est parfois nécessaire. En général, des corrections atmosphériques absolues sont nécessaires dans les cas suivants :

- Pour développer un modèle empirique.
- Pour comparer les données acquises par les satellites avec celles de réflectance au sol mesurées par des instruments tel qu'un spectroradiomètre.
- Comme alternative à la correction relative lorsque des comparaisons sont effectuées sur plusieurs images.

#### IV.2.2.4 Correction topographique

La correction solaire ne tient pas compte des effets d'éclairage de la pente, de l'aspect et de l'élévation qui peuvent entraîner des variations dans les valeurs de réflectance pour des caractéristiques semblables avec des positions de terrain différentes (Riano et al., 2003). La correction topographique est le processus utilisé pour tenir compte de ces effets. Bien que cette correction ne soit pas toujours nécessaire, elle peut être particulièrement importante pour les applications en montagne ou en terrain accidenté (Colby, 1991).

Une distinction importante doit être faite entre la correction de surface et la correction de terrain. La correction topographique est un processus radiométrique, tandis que la correction du relief est de nature géométrique. Bien que les produits Land sat Level-1 soient corrigés en fonction du terrain, cela ne tient pas compte des mêmes effets qu'une correction topographique. La correction de terrain garantit que chaque pixel est affiché directement au-dessus, indépendamment de la topographie ou de l'angle de vue, et, bien que ce soit important, ne tient pas compte des mêmes effets que la correction topographique.

### IV.3 Le calcul de l'émissivité

L'émissivité  $\varepsilon$  est le rapport entre la radiance émise par un corps noir et celle émise par un autre corps dans la même température (Li et al., 2013). C'est une variable critique pendant l'extraction de la LST pour séparer entre l'effet de l'atmosphère et celui de la surface. Elle varie selon le type de couverture terrestre, l'humidité de surface, la rugosité et l'angle d'observation (Salisbury & D'Aria, 1992; Sobrino et al., 2008). En général, l'émissivité de surface dans les zones urbaines est inférieure d'environ 2% par rapport aux zones rurales (Arnfield, 1982). Le

fait de ne pas faire une correction de l'émissivité et de négliger la différence entre le rural et l'urbain peut récupérer la LST des deux milieux avec des différences allant jusqu'à 1.5C° ou plus, par conséquent, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain peut être sous-estimé (ROTH et al., 1989).

Dans la littérature, de nombreuses méthodes ont été proposées pour récupérer l'émissivité. Cependant ces méthodes diffèrent dans les avantages, les limites et les conditions d'application (Rasul, 2016). Selon le même chercheur, il existe trois catégories de méthodes pour le calcul de l'émissivité :

- la catégorie des méthodes semi-empiriques.
- la catégorie des méthodes multicanaux.
- la catégorie des méthodes physiques.

La méthode la plus utilisée et la plus facile est une méthode semi-empirique, elle se base sur l'indice normalisé de végétation NDVI<sup>7</sup>.

#### IV.4 Validation de la LST

La validation des résultats de température de surface terrestre (LST) constitue un défi majeur. La principale difficulté réside dans la synchronisation des acquisitions d'images avec des mesures au sol représentatives à l'échelle de l'image, en raison de la grande variabilité temporelle et spatiale de la LST. Les méthodes de validation actuelles comprennent des approches basées sur la comparaison de la température, du rayonnement et des techniques de validation croisée (Li et al., 2013). Les méthodes basées sur la température consistent à comparer les valeurs de LST obtenues à partir des images satellites avec les valeurs mesurées par des capteurs au sol. Ces mesures sont réalisées sur des zones uniformes à l'échelle du pixel ou représentatives des différentes composantes de la couverture terrestre (par exemple, pelouse, canopée ensoleillée, ombre, sol nu). La comparaison directe entre la LST dérivée des satellites et la LST mesurée sur le terrain semble être la méthode de validation la plus évidente, mais elle est souvent difficile à réaliser en raison de la difficulté à trouver des sites appropriés. Par conséquent, la validation des LST régionales et mondiales est souvent effectuée au moyen de méthodes basées sur le rayonnement, qui simulent les LST de référence à l'aide de modèles de transfert radiatif (J. Sobrino et al., 2004). Le succès de cette approche dépend de la disponibilité des données sur l'émissivité des surfaces et des profils atmosphériques. En l'absence de données

---

<sup>7</sup> Cf. Chapitre IV

sur les conditions atmosphériques, la qualité des LST peut être évaluée par validation croisée, en comparant les LST obtenues à partir des images satellites avec des LST dérivées d'autres capteurs. Il convient de tenir compte des différences entre les capteurs en termes de caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles, ainsi que de leurs géométries d'observation.

#### **IV.5 La relation entre la température de surface LST et la température de l'air $T_a$**

La température de surface exerce une influence indirecte, mais significative sur les températures de l'air, en particulier dans le contexte urbain. Des études antérieures (coll., 2010; Zhou et al., 2014) ont démontré que la température de surface terrestre (LST) est directement liée à la nature et aux caractéristiques des surfaces. Par conséquent, les modèles de température dans les régions urbaines sont fortement influencés par les propriétés d'émissivité des surfaces urbaines et par la capacité thermique des structures construites (Schwarz et al., 2012). Selon Lindén et al. (2015), les changements dans le bilan énergétique de surface des zones urbaines sont influencés par les variations des propriétés de surface, telles que l'émissivité, l'albédo et la rugosité de la surface. Par conséquent, la relation entre la température de surface et la température de l'air varie en fonction de l'utilisation et de la couverture du sol (US EPA, 2014). La température de surface est très sensible aux changements des conditions de surface, ce qui entraîne une plus grande variabilité spatiale et temporelle que la température de l'air (Tzavali et al., 2015).

L'impact de la température de surface sur l'atmosphère des zones urbaines et rurales est donc important. Au coucher du soleil, les taux de refroidissement différentiel entre les zones urbaines et rurales sont à leur maximum, alors que les régions rurales commencent à se refroidir rapidement. Cependant, les zones urbaines conservent leur chaleur plus longtemps et se refroidissent plus lentement (Goward et al., 2002). La différence de température de l'air est la plus importante après le coucher du soleil et la plus faible avant le lever du soleil (Tzavali et al., 2015). Cela est dû à la présence de surfaces imperméables dans les zones urbaines qui absorbent et emmagasinent la chaleur pendant la journée, puis la libèrent ultérieurement dans l'atmosphère. La densité de population et la densité d'accumulation, utilisées pour différencier les zones urbaines et rurales, influencent également les tendances de température dans une région urbaine.

## **V. Conclusion**

Au cours des dernières années, la télédétection thermique est devenue un outil performant pour étudier l'îlot de chaleur urbain dans différents climats. Cette méthode a permis de caractériser et de comprendre les spécificités du comportement thermique de la surface terrestre. Ce chapitre présente un ensemble de concepts liés à la télédétection ainsi que les différentes lois qui peuvent être la clé pour sa compréhension.

Il en ressort que la télédétection est une méthode intéressante pour étudier l'îlot de chaleur urbain de manière spatiale, et que les images de Landsat sont les plus adaptées pour les études urbaines parmi les capteurs étudiés. Cependant, le processus de télédétection est complexe et nécessite une expertise en physique, ce qui peut rendre la mission délicate pour les non-spécialistes.

La température de surface terrestre est le paramètre clé pour étudier les îlots de chaleur urbains, et sa détection peut se faire selon plusieurs algorithmes qui diffèrent en fonction des paramètres nécessaires pour faire le calcul. Il est important de noter que le prétraitement (correction) des images est une étape cruciale pour effectuer une télédétection réussie. Le type de correction nécessaire dépend des capteurs utilisés et de l'information souhaitée.

Enfin, la validation de la température de surface terrestre peut se faire selon trois méthodes, la méthode la plus efficace étant la comparaison avec des mesures prises sur le terrain. Cependant, la réalisation de cette méthode n'est pas évidente étant donné la difficulté de trouver la zone représentative de la région étudiée.

# **CHAPITRE III :**

## ***Interaction entre morphologie urbaine et climat***

*« Avant d'être un évènement construit, la ville est un fait de culture. La morphologie urbaine est inséparable d'une morphologie sociale. Elle ne saurait se réduire à l'étude de la forme physique de la ville. La réalité des villes, complexe, vivante, mouvante, à la fois physique et mentale, n'est de plus pas dissociable en éléments distincts. En revanche, elle est analysable à différents niveaux d'échelle et selon plusieurs points de vues. Certaines approches morphologiques mettent au centre de leurs préoccupations la question des formes et des paysages urbains. Certes la forme n'est pas tout mais elle est la structure physique et mentale de la ville. Une structure dotée d'une grande inertie et d'une permanence pouvant durer des millénaires, comme en atteste l'omniprésence des tracés romans auteur de la Méditerranée. »*

*(Salat, 2011)*

## I. Introduction

La configuration physique des zones urbaines peut influencer significativement le microclimat local en modifiant les conditions météorologiques telles que la température, l'humidité et la circulation de l'air, ce qui peut avoir des conséquences sur le confort thermique extérieur. Les éléments urbains tels que les bâtiments, les rues, les parcs et autres peuvent entraver les vents, retenir la chaleur et créer des zones ombragées ou ensoleillées. En outre, les surfaces imperméables comme les trottoirs et les routes peuvent accélérer l'évaporation de l'eau de pluie et augmenter la température de la surface du sol. La densité de la végétation peut également affecter le microclimat en modifiant l'énergie solaire reçue et la transpiration des plantes.

Il est indéniable que l'interaction entre la morphologie urbaine et le climat est un phénomène complexe. Ce chapitre se concentre sur les mécanismes d'interaction entre les paramètres climatiques et l'environnement bâti urbain, et vise à simplifier les relations entre les différents paramètres plutôt que d'analyser et d'expliquer les lois physiques sous-jacentes. En outre, la morphologie urbaine sera analysée en termes d'échelle d'impact dans ce chapitre.

La deuxième partie du chapitre examinera différentes approches et méthodologies pour analyser la morphologie urbaine dans sa dimension bioclimatique. Pour illustrer ces approches, une étude de cas sera présentée pour chacune d'entre elles.

## II. Définition de la morphologie urbaine

Selon le dictionnaire de l'urbanisme est de l'aménagement (Merlin, Pierre & Choay, Françoise, 1988), la morphologie urbaine est l'étude de la forme urbaine. Le concept de morphologie apparut d'abord chez les géographes allemands et français, entre les deux guerres. Les principaux spécialistes sont rarement d'accord sur le sens qu'ils attachent à des termes comme structure urbaine, forme urbaine, ...etc. ou même morphologie.

Selon, Philippe PANERAI et Julien LANGE, 2001, la morphologie urbaine est :  
« *L'étude (la description et la classification) des causes qui contribuent à la formation et à la modification de la structure physique de la ville* »<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Panerai, Ph. et Langé, J. (2001). Formes urbaines, Tissus urbains, Essai de bibliographie raisonnée 1940-2000. Paris, France : ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction - DGUHC, Centre de documentation de l'urbanisme, 92 p.

Pour Koen Steemers & Mary Ann Steane (2004), la morphologie urbaine est définie comme étant la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments et l'espace qu'ils créent, c'est-à-dire dans ses dimensions physiques et tangibles. Ainsi, elle correspond à une description de la ville comme un système interactif de bâtiments, de rues et d'espaces ouverts. La forme urbaine est donc considérée comme une configuration statique et matérielle composée d'un arrangement relatif de masses solides et de volumes non bâtis.

La morphologie urbaine se définit selon les chercheurs du Martin Centre de Cambridge comme l'association de la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments, de son étalement et de la volumétrie des espaces extérieurs qu'ils créent (Nikolopoulou, 2004).

Selon (Levy, 2005), l'intérêt de l'étude morphologique est de permettre la lecture de la ville en comprenant l'évolution de la forme urbaine qu'elle est l'objet d'étude construit à partir d'une hypothèse de définition subjective, la forme urbaine est une notion polymorphe<sup>2</sup> qui peut être abordée selon le point de vue de chaque urbaniste. Lévy a distingué cinq approches pour la définition de la forme urbaine.

- L'approche de la forme urbaine comme forme des **paysages urbains**, pour laquelle l'espace urbain est saisi visuellement (couleur, style, ...etc.) dans sa tridimensionnalité (volumétrie et gabarits) et dans son style architectural (mouvement moderne par exemple) (Lynch, 1960 ; Castex et al. 1980).
- L'approche de la forme urbaine comme forme **sociale**, pour laquelle l'espace urbain est étudié dans son occupation par les divers groupes sociaux, démographiques, ethniques ou religieux (Grafmeyer et Joseph, 1984 ; Roncayolo, 1996).
- L'approche de la forme urbaine comme forme des **tissus urbains**, qui consiste à étudier les corrélations entre les éléments composants l'espace urbain (parcellaire, voiries, rapport espaces libres/espaces bâtis et morphologie des îlots par exemple) (Panerai et langé, 2001).
- L'approche de la forme urbaine comme forme des **tracés** (Pinon, 1994 ; Lévy, 1996). Cette approche renvoie à la forme géométrique du plan de la ville (par exemple : plan organique, plan en damier ou plan radioconcentrique).
- L'approche de la forme urbaine comme forme bioclimatique<sup>3</sup> : cette démarche a conduit à un important débat sur les formes urbaines du futur (formes étalées ou compactes)

---

<sup>2</sup> Selon le ROBERT : « *Qui peut se présenter sous des formes différentes* ». URL : <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/polymorphe>

<sup>3</sup> Dans la bioclimatologie des êtres vivants, une approche bioclimatique du bâtiment et des zones urbaines se réfère à l'étude des échanges de chaleur et de masse entre les bâtiments et leur environnement

initié autour de l'enjeu du développement durable, du surcroît de la consommation d'énergie et ses conséquences sur le climat et récemment avec l'optimisation des ambiances physiques dans les espaces urbains.

Selon Lévy (2005), elle est en étroite relation avec les autres approches, notamment celle des tissus urbains. En effet, Les éléments composant les formes des tissus urbains et des tracés agissent comme des facteurs de variation du microclimat urbain et induisent une distribution fluctuante des paramètres de confort (température de l'air, vitesse du vent et rayonnement incident par exemple).

### III. Phénomènes climatiques en milieu urbain liés à la morphologie urbaine

Les microclimats urbains, qui sont le résultat du bilan énergétique urbain complexe, affectent la santé et le confort des citoyens ainsi que les charges énergétiques des bâtiments. Les températures moyennes radiantes  $T_{MRT}^4$  et d'air, l'humidité et les flux d'air influent également le bilan énergétique du bâtiment. D'une part, le chauffage solaire passif<sup>5</sup> des bâtiments peut être réduit en raison de nombreux obstacles urbains qui produisent de l'ombre. D'autre part, leur potentiel de refroidissement radiatif est généralement limité en raison du facteur de vue du ciel limité. De plus, les reflets multiples peuvent réchauffer les façades ombragées. La ventilation naturelle et les échanges thermiques induits sont également souvent réduits en raison de la vitesse réduite des vents urbains et du développement des phénomènes de recirculation (Merlier, 2015). Cette section explique les deux fameux phénomènes dans contexte urbain qui peuvent contribuer au développement d'un climat urbain.

---

(Larousse, 2014). L'extension habituelle de ce concept caractérise la capacité d'un bâtiment ou d'une zone urbaine à optimiser son utilisation de l'énergie solaire et une ventilation naturelle afin de fournir des conditions de transport confortables. En adaptant l'initiative donnée par Lévy (2005), l'approche d'une forme urbaine en tant que forme bioclimatique implique de la considérer dans sa dimension environnementale et dans son climat urbain.

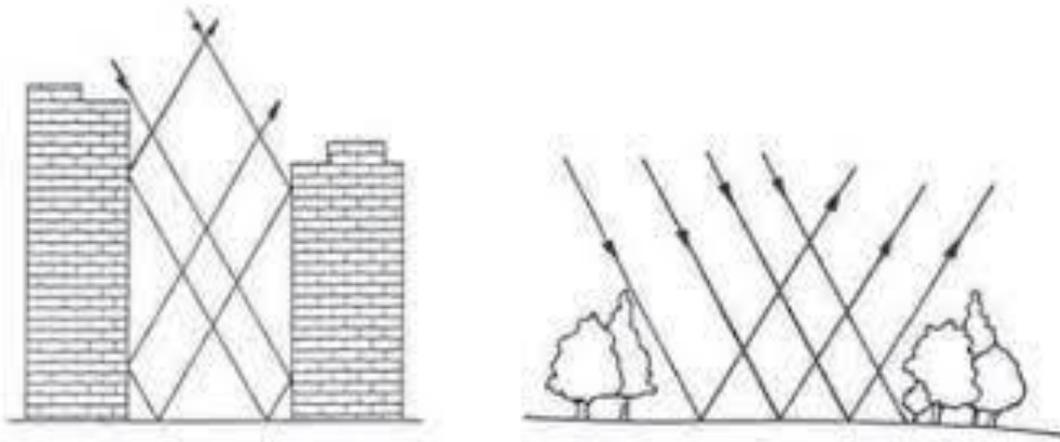
<sup>4</sup> Il s'agit de la température équivalente de l'environnement auquel une personne est exposée, qui génère le même apport de rayonnement au corps que celui reçu à partir des ondes longues et courtes nettes de l'environnement naturel.

<sup>5</sup> Cf. consulter le site suivant pour plus de détails, URL : <https://jeveuxsauverlaplanete.fr/index.php/articles-ecolos/energies-renouvelables/72-utiliser-le-solaire-passif>.

### III.1 Piégeage radiatif en milieu urbain

Le piégeage radiatif est l'un des phénomènes remarquables observés dans les environnements urbains. Il se réfère au processus selon lequel les rayons solaires subissent des multiples réflexions (*Figure III.1*) sur les surfaces des bâtiments avant d'être partiellement redirigés vers l'atmosphère (Fahed, 2018). Les expérimentations et les modélisations de ce phénomène ont principalement été appliquées à une géométrie standard et reproduites dans les contextes urbains (Bouyer, 2009).

Les matériaux utilisés dans les zones urbaines ont la capacité de stocker une quantité importante du rayonnement solaire (chaleur de stockage), qui est ensuite réémise sous forme de rayonnement à longue longueur d'onde. Ce rayonnement est également piégé de la même manière que les rayons solaires, en subissant des multiples réflexions et en étant réorienté vers l'atmosphère (Colombert, 2008).



*Figure III. 1:* le phénomène du piégeage radiatif. *Source* : (Greuillet, 2013).

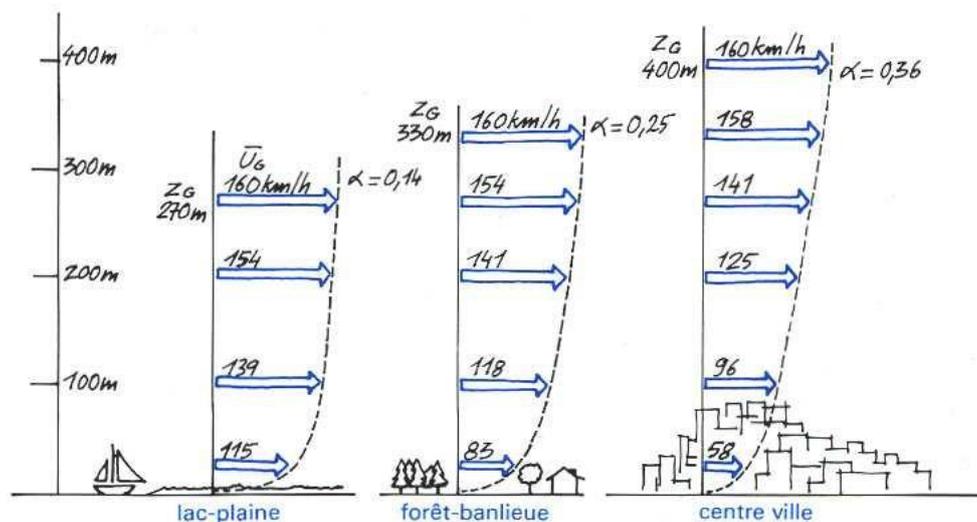
L'intensité du piégeage radiatif peut être caractérisée par le rapport d'aspect H/L, toutefois, l'accroissement de ce rapport d'aspect entraîne une augmentation de la chaleur accumulée par rayonnement à l'échelle du fragment urbain à l'échelle du canyon, les flux radiatifs sur les surfaces verticales au niveau de la rue sont plus faibles du fait des ombres portées (Bouyer, 2009).

### III.2 Effets aérauliques en milieu urbain

Le vent est le mouvement horizontal de l'air qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans la CLA. En raison de la forme complexe des villes, les conditions aérodynamiques urbaines locales sont très complexes. Pour mieux comprendre les flux d'air

urbains, plusieurs essais en soufflerie ont été réalisés au cours des dernières décennies. Plus récemment, des études des CFD<sup>6</sup> ont également été effectuées.

À l'échelle méso, le vent est décrit par deux attributs : sa direction d'incidence, donnée par une rose des vents, et son profil vertical de vitesse qui est couramment défini par des fonctions logarithmiques ou puissances (Gandemer et al., 1976). Le vent n'est pas un phénomène constant, il varie en direction et en grandeur (rafales) et ces variations peuvent être saisonnières et même horaires. Sur de larges étendues, le profil reste constant si la rugosité du terrain est homogène et que le relief n'est pas accidenté (voir **Figure III. 2**). La vitesse moyenne du vent dans les zones urbaines peut être réduite de 50% par rapport à celle mesurée au niveau des surfaces d'eau libre.



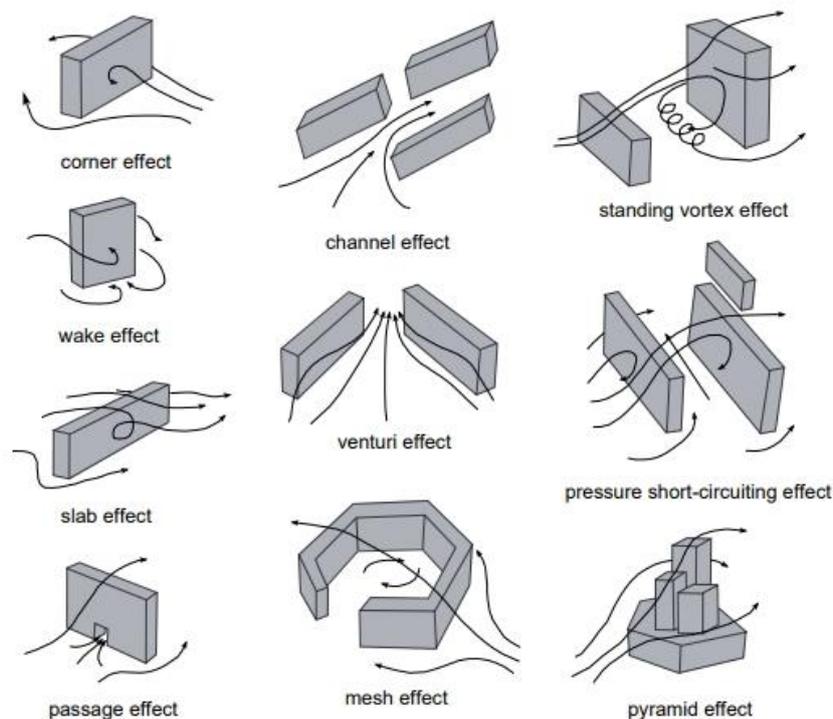
**Figure III. 2:** Profils verticaux de vitesses de vent au-dessus de 3 terrains de rugosités différentes.  $Z_G$  est la hauteur de rugosité et  $\alpha$  est un paramètre de terrain issu de mesures en vraie grandeur. *Source :* (Gandemer et al., 1976).

À l'échelle microclimatique, le vent est fortement perturbé par la configuration du bâti et les deux indicateurs précédents à savoir sa direction d'incidence et son profil vertical ne peuvent pas être utilisés pour le décrire. Les directions sont très influencées par l'orientation des rues et les divers obstacles. Par conséquent, les flux urbains sont très difficiles à décrire et à comprendre même lorsque le flux est bien défini. Il est cependant possible d'identifier certaines configurations urbaines typiques qui sont liées à des conditions aérodynamiques spécifiques (Merlier, 2015).

<sup>6</sup> «Computational Fluid Dynamics (CFD) : Une approche de modélisation numérique qui tente de résoudre l'ensemble complet d'équations aux dérivées partielles non linéaires qui régissent l'écoulement visqueux des fluides autour d'objets (par exemple, des bâtiments). Voir également la simulation des grands tourbillons.» (Oke et al., 2017).

Basé sur la soufflerie de plusieurs configurations urbaines (Gandemer et al., 1976) ont identifié des anomalies aérodynamiques qui affectent le confort thermique des piétons. Ces anomalies caractérisent certains schémas d'écoulement d'air liés à des configurations typiques ou urbaines, qui conduisent généralement à des flux sensiblement accélérés ou des régions abritées. La *Figure III.3* illustre ces différentes anomalies.

- **L'effet de passage** : se produit quand il y a un couloir ouvert au fond d'un bâtiment. L'écoulement est concentré dans le passage et forme un jet qui produit un écoulement accéléré dans et en aval du passage. Cet effet a également été étudié en détail par (Blocken et al., 2004).
- **L'effet de la brame** : se produit selon la taille relative de l'obstacle par rapport à l'échelle de turbulence du vent. Une circulation d'écoulement tourbillonnée se forme en aval de l'obstacle, ce qui induit des vitesses fortes d'écoulement.



*Figure III. 3* : Quelques effets aérodynamiques types. *Source* : (Gandemer et al. 1976)

- **L'effet de canal** : se produit lorsque la disposition des bâtiments forme un chemin presque continu qui est ouvert sur son sommet. Cette configuration peut amplifier les effets d'une autre anomalie, mais ne crée généralement pas de conditions aérodynamiques spécifiques en soi.

- **L'effet venturi** : se produit lorsque la disposition du bâtiment est en forme d'entonnoir, avec un angle aigu ou droit. Les flux accélérés sont principalement produits dans le goulot d'étranglement. Plusieurs conditions doivent être remplies pour former une telle anomalie.
- **L'effet de maillage** : se produit lorsqu'une disposition de bâtiment forme une cour presque fermée. Il est généralement caractérisé par des conditions abritées à l'intérieur, car il pourrait être renversé par le vent selon sa taille. Beranek (1984) a mis en évidence certaines structures d'écoulement intérieur pour des mailles presque carrées ouvertes sur leurs coins.
- **L'effet de court-circuit de pression** : se produit lorsque la disposition de grands bâtiments perpendiculaires au vent est décalée. Il se caractérise par un écoulement accéléré qui relie transversalement les deux zones de pressions différentes. Selon Beranek (1984), lorsque de longs bâtiments sont parallèles les uns aux autres et perpendiculaires à l'incidence de l'écoulement, un fort écoulement transversal se produit.
- **L'effet pyramidal** : se produit dans le cas d'un plan de construction compact avec plusieurs terrasses. Bien que cette forme soit plutôt aérodynamique, les terrasses peuvent connaître des vitesses de vent accélérées.
- **L'effet masque** : est dû à la présence de bâtiments en amont, qui abritent généralement des espaces urbains. En cas de tracé homogène, les  $2 \times 10^2$  premiers mètres sont les plus influencés par les changements aérodynamiques.

### III.3 Classification des paramètres morphologiques

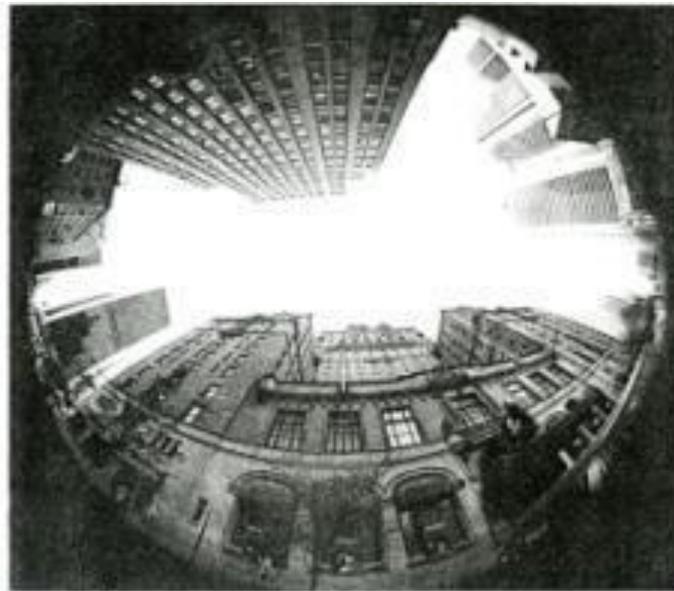
#### III.3.1 À l'échelle micro

##### III.3.1.1 Le facteur de vue du ciel FVC

Le facteur de vue du ciel (*Figure III. 4*) est la mesure de l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un point de l'espace urbain (sarradin, 2004), c'est le rapport du rayonnement reçu par une surface, un FVC égal à 0 indique que la vue du ciel est totalement obstruée. En revanche, un FVC égal à 1 signifie que la vue du ciel est totalement dépourvue de tout obstacle.

Le FVC peut être calculé selon plusieurs manières (mathématiques et graphiques) et à partir de multiple supports (photographie aériennes, images satellitaires à haute résolution,

bases de données spatiales). Le calcul est fait soit à partir de l'appareil de mesure caméra Fish eyes (**Figure 3.4**), soit à partir des informations issues de bases de données SIG en prenant en compte l'emplacement géographique, la hauteur des bâtiments et la largeur de la chaussée (Grimmond et al., 1991), d'autres logiciels<sup>7</sup> de simulation peuvent calculer le FVC. Le FVC donne l'information sur les échanges radiatifs entre les bâtiments et l'atmosphère et il estime la part du rayonnement qui entre dans l'espace public. La surface géométrique des bâtiments empêche la perte des rayonnements de grandes longueurs d'onde émis par la surface du sol et remplace une partie de la lithosphère<sup>8</sup> froide par les flux des surfaces chaudes (Oke et al 1991). Cela engendre une augmentation de la température de l'air dans les endroits où le FVC est faible.



**Figure III. 4 :** Vue sur le ciel visible d'une rue à Boston aux États-Unis. *Source :* (Ratti et al., 2003).

<sup>7</sup> Citant : ENVI met et Rayman

<sup>8</sup> Selon le Larousse « Couche externe du globe terrestre, épaisse de 100 à 200 km, rigide, constituée par la croûte et une partie du manteau supérieur, et limitée en profondeur par l'asthénosphère. [La lithosphère est fragmentée en plaques mobiles les unes par rapport aux autres.] ». URL : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/lithosph%C3%A8re/47474>.

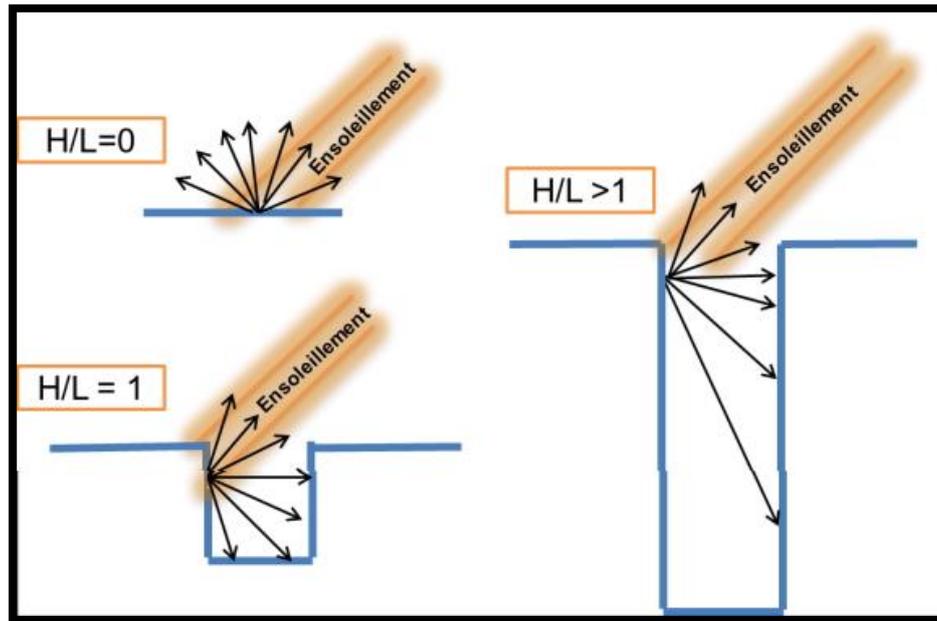


**Figure III. 5:** Procédé de photographie fish-eye, à droite) appareil photo numérique fish-eye. **Source :** (Ghaffour, 2020).

Dans une étude menée par Ratti et al. (2003), une corrélation significative a été observée entre le coefficient de forme des voies (FVC) dans une rue de Boston, aux États-Unis (Figure 3.4), et la température des surfaces urbaines. Cette recherche s'est concentrée sur trois configurations urbaines spécifiques dans un climat aride. Les résultats ont révélé que les configurations dispersées présentaient des températures plus élevées, atteignant environ 40,5°C. Cette valeur était supérieure de 5,3°C par rapport aux configurations compactes et de 8,6°C par rapport aux configurations fermées. Sur la base de ces constatations, les chercheurs ont suggéré d'introduire davantage d'espaces ouverts dans les tissus urbains afin de favoriser la dissipation de la chaleur.

### *III.3.1.2 Le rapport H/L des rues canyons*

La rue canyon est la structure la plus typique des tissus urbains, représente une rue bordée d'immeuble dont la hauteur est au moins deux fois supérieure à la largeur de la rue (izard, 1992), elle est définie par la largeur de la rue et la hauteur moyenne des bâtiments et à partir de ces deux indicateurs la description quantitative du canyon est effectuée par le biais du rapport H/L, ce paramètre évalue la quantité du rayonnement solaire incidente au canyon (**Figure III. 6**).



**Figure III. 6:** Distribution schématique du rayonnement solaire incident dans différents canyons avec différents rapports H/L. *Source :* (Ghaffour, 2020).

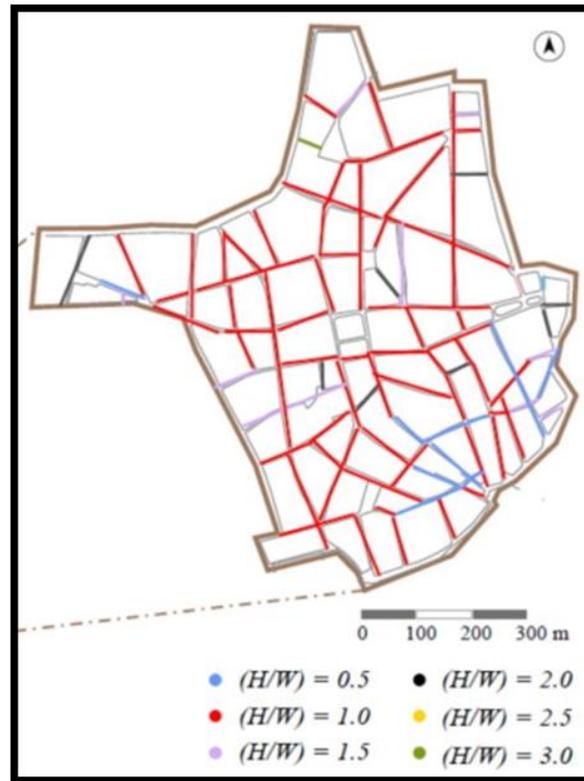
Dans le cadre d'un fragment urbain, le ratio H/L représentatif du fragment (**Figure III. 7**) est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{H}{L} = \frac{Hm}{Lp} \quad \text{(III. 1)}$$

H : hauteur moyenne des bâtiments

$Hm = \sum \frac{H}{N}$ , (n : le nombre de bâtiments)

$Lp$  : la plus petite largeur de l'espace



**Figure III. 7 :** Exemple de ratio du centre urbain historique de Camagüey-Cuba. *Source :* (Rodríguez Algeciras et al., 2016).

#### IV. À l'échelle méso

##### IV.1 La densité du bâti

La densité surfacique urbaine est définie comme le rapport entre la surface construite et la surface totale d'une zone urbaine. À une échelle micro, la densité est souvent mesurée à l'aide du coefficient d'emprise au sol (CES), qui varie en fonction des différents modes d'occupation de l'espace urbain. Les villes se caractérisent par une évolution des formes urbaines, allant d'une densité élevée dans le centre-ville, à des formes plus ouvertes comprenant des habitations individuelles en périphérie, avec des formes urbaines de transitions.

Cette variation de densité entre les différentes entités urbaines conduit à des inégalités microclimatiques. Une étude réalisée par Boukhezer en 2002 dans la ville d'Oran, située dans le nord-ouest de l'Algérie, a examiné l'impact des densités surfaciques différentes sur la quantité d'énergie absorbée par les tissus urbains. Les résultats ont démontré que la densité surfacique influence significativement la quantité d'énergie absorbée par les tissus urbains. En particulier, le centre-ville dense, caractérisé par un tissu urbain organique et une imperméabilité élevée,

absorbe une plus grande quantité d'énergie par rapport aux autres types de tissus urbains tels que les tissus dispersés et en damier.

## IV.2 La rugosité

Au niveau du sol, l'écoulement d'air est plus faible qu'au-dessus des bâtiments (Escourrou, 1982 ; sacré1983) cette diminution est engendrée par les bâtiments qui s'opposent aux vents modifiant par conséquent le profil de la vitesse du vent. Ce qui fait que le profil du vent au-dessus du sol varie considérablement en fonction du nombre d'obstacles importants dans le flux d'air, tels que caractérisés par la rugosité : plus la rugosité est élevée, plus la vitesse d'air moyenne est lente (Adolphe, 2001).

L'effet global d'un tissu urbain sur la réduction de la vitesse moyenne du vent au niveau du sol peut être dérivé de la rugosité absolue, caractéristique de la hauteur moyenne des obstacles proéminents dans le flux d'air. La rugosité absolue est la hauteur moyenne de la canopée urbaine. Comme il est souvent inférieur à la hauteur moyenne des bâtiments, parce que les espaces non construits doivent être intégrés, la rugosité absolue  $H_m$  est donnée par le produit de la hauteur des bâtiments et de leur superficie, divisée par la superficie totale (construite et non construite) (Kondo, 1986). Cet indicateur peut être donné comme suit :

$$H_m = \frac{\sum_{bati} A_i h_i}{\sum_{bati} A_i + \sum_{non\ bati} A_j} \quad (III.2)$$

Où

$A_i$  : la superficie au sol du bâtiment  $i$

$h_i$  : la hauteur du bâtiment  $i$

$A_j$  : la superficie de l'élément non construit  $j$ .

La rugosité relative  $R_\alpha$  est la déviation carrée moyenne de la hauteur du couvert (éléments construits et non construits), pour une direction donnée (et pour un rayon de tissu donné autour d'un point central), pondérée par la largeur de chaque élément dans le plan de section. La modification de la vitesse moyenne du vent selon la variation directionnelle de la morphologie urbaine peut être liée à la rugosité relative. Elle peut s'exprimer comme suit :

$$R_\alpha = \frac{[\sum_i (h_i - h_\alpha)^2 l_i^2]^{1/2}}{\sum_i l_i} \quad (III.3)$$

Où

$H\alpha$  : la hauteur moyenne de la canopée urbaine dans la direction  $\alpha$

$h_i$  : la hauteur de l'élément (construit ou non construit)  $i$  de la canopée

$L_i$  : la largeur de l'élément  $i$  de la canopée dans le plan de direction  $\alpha$

$\sum_i L_i$ : le diamètre de la canopée urbaine étudiée.

### IV.3 La porosité

La porosité urbaine fait référence au volume total d'air des creux urbains et leurs rapports avec le volume de la canopée urbaine. Elle est évaluée en pourcentage et peut varier selon la nature du tissu urbain (Ghaffour, 2020). Dans un milieu poreux à ossature solide, la vitesse du flux d'air varie le long des pores en fonction de l'inégalité locale (Adolphe, 2001). La porosité permet de comprendre le mécanisme d'interaction entre les structures urbaines d'une part et le vent et le rayonnement solaire d'autre part, elle conditionne l'écoulement d'air au sein du tissu urbain, sa trajectoire et sa vitesse. Par des mouvements tourbillonnaires en contact avec le cadre bâti urbain et à travers les creux urbains, le rayonnement solaire pénètre varie en fonction de la configuration urbaine.

D'après Luc Adolphe, la porosité est calculée selon l'équation suivante :

$$P_0 = \frac{\sum_i \pi r_{hi}^2 L_i}{\sum_i V_i + \sum_{bati} V_j} \quad (III.4)$$

Où

$L_i$  : la longueur de l'espace ouvert  $i$

$r_{hi}$  : le rayon hydraulique équivalent de l'espace ouvert  $i$

$V_j$ : le volume moyen du volume construit  $j$

$V_j$  : la canopée moyenne volume au-dessus de l'espace ouvert  $i$ .

### IV.4 Orientation des tissus urbains

L'orientation d'un tissu urbain est un facteur qui peut être analysé et étudié à différentes échelles, que ce soit à l'échelle de l'agglomération ou du fragment urbain. Cette orientation joue un rôle déterminant dans la dynamique de l'écoulement de l'air, le contrôle de la vitesse du vent et l'accessibilité de l'énergie solaire. Elle crée des espaces exposés au soleil ainsi que des zones ombragées, entraînant des variations de température de l'air et de surface qui sont généralement

efficaces en début et en fin de journée. Lorsque le soleil est au zénith, les surfaces ombragées sont considérablement réduites.

L'orientation des tissus urbains par rapport aux vents incidents a un impact sur la vitesse du vent. Lorsque les structures urbaines sont parallèles aux vents, la vitesse du vent augmente davantage que lorsque les structures sont perpendiculaires aux vents. L'effet de l'orientation des tissus urbains sur le comportement thermique des tissus urbains a été étudié dans plusieurs recherches (Athamena, 2012).

#### IV.5 Comportement thermique des matériaux

Les propriétés thermiques des matériaux qui composent les bâtiments, les voies et les infrastructures rendent la ville stocke plus de chaleur que la campagne, deux paramètres favorisent le stockage de chaleur par un tissu urbain et donc une augmentation aussi bien de la température de l'air que de surface, il s'agit de l'albédo et l'émissivité (Aida, 1982; Robinson & Stone, 2004; Giguère, 2009). Un matériau procédant une forte émissivité et faible albédo capte d'importante quantité de chaleur en journée et la restitue dans l'atmosphère la nuit ce qui contribue à l'augmentation de la température d'air et par conséquent l'intensité de l'îlot de chaleur urbain

##### IV.5.1 L'albédo

Corresponds au rapport entre la quantité de rayonnement à ondes courtes réfléchi par cette surface (réflectance) et la quantité de rayonnement à ondes courtes atteignant cette surface (irradiance) (Oke et al., 2017).

Les matériaux de couleurs clairs ont un albédo supérieur à celui des matériaux sombres, c'est la raison pour laquelle les villes du sud ont généralement un albédo plus fort (0.3 -0.45) que celles du nord (0.1 – 0.2) (Athamena, 2012).

(Akbari et al., 2003) ont élaboré une étude pendant les heures de plein soleil dans le but d'analyser l'impact de la couleur des façades sur la température des surfaces. Les résultats ont montrés que les façades sombres ont des températures supérieures de 7°C par rapport à celle peintes en blanc.

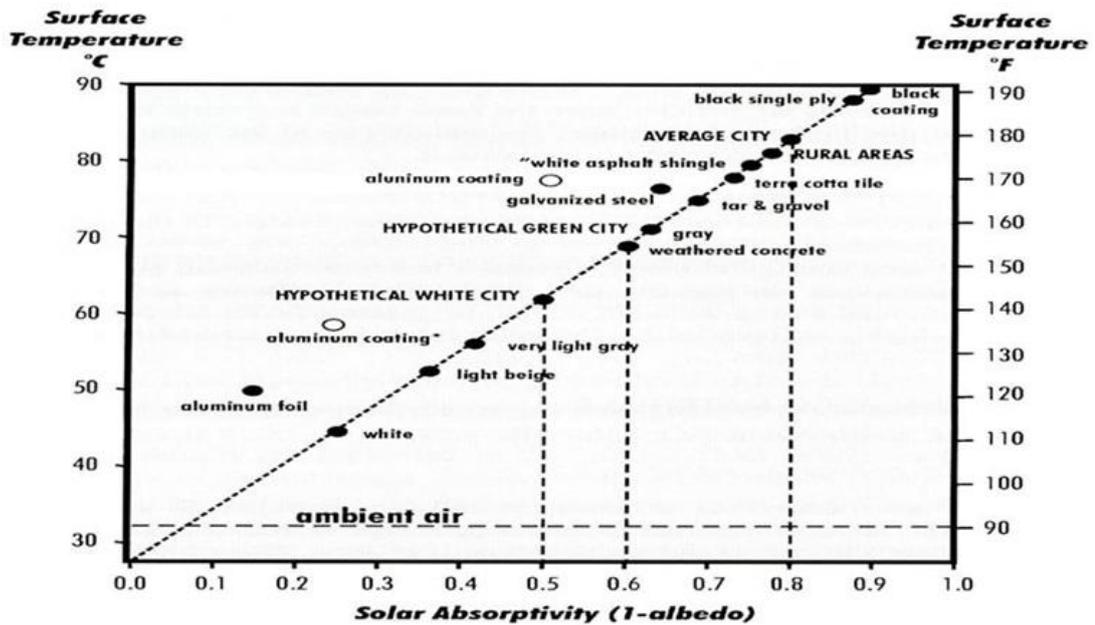


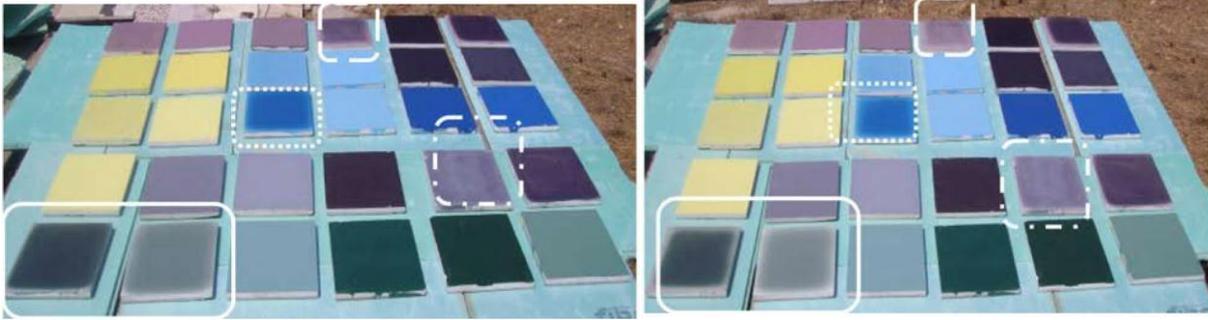
Figure III. 8 : La quantité d'énergie solaire absorbée en fonction de la température de surface pour plusieurs matériaux. *Source* : (Taha & Bornstein, 1999).

Dans le désert d'Arizona aux états unis McPherson a étudié l'impact de la couleur des toitures sur la température de surface, dans son cas les toitures blanches avec un albédo de 0.75 étaient jusqu'à 20°C plus froides que les toitures beige avec un albédo de l'ordre de 0.3 et jusqu'à 30°C plus froides que celle des toits avec un albédo de 0.1 (Figure III. 8).

L'albédo des matériaux peut être optimisé notamment par l'ajout de pigment réfléchissant dans les peintures de revêtements (Synnefa et al., 2007) ou par l'utilisation de revêtement thermochromique. Ces derniers changent leurs couleurs selon leur environnement thermique, en passant de couleurs foncées à des couleurs plus claires quand la température augmente (Athamena, 2012).

Une étude expérimentale a été menée par (karlessi et al 2009) sur le potentiel des matériaux thermochromiques<sup>9</sup> sur la quantité d'énergie absorbée (Figure III. 9). Selon cette étude lorsque la température de surface est inférieure à la température de transition 30°C la quantité d'énergie absorbée augmente et elle diminue quand la température dépasse le seuil de transition.

<sup>9</sup> Cf. consulter à ce propos le site internet suivant. L'URL : <https://www.olikrom.com/fr/blog/oeil-de-lexpert/les-materiaux-thermochromiques/>



**Figure III. 9 :** Les phases de changement de couleur des revêtements thermo-chromiques. (a) L'état coloré au-dessous de 30°C. (b) le début de l'éclaircissement des couleurs au-dessus de 30°C. *Source :* (Karlessi et al., 2009).

Les surfaces peuvent perdre leur pouvoir de réflexion initiale due aux conditions climatiques et l'encaissement des moisissures (berdahl et al 2005), cette détérioration induit une modification de l'albédo. Selon berdahl (2005) l'albédo varie en fonction de la quantité d'eau contenue dans le matériau, cette quantité augmente l'absorption du flux solaire incident et diminue le pouvoir réfléchissant du matériau. L'albédo d'un sable sec est de 35% alors de lorsqu'il est humide, la valeur peut diminuer jusqu'à 25%.

### 1. Approches d'étude

Cette section aborde les diverses méthodes permettant d'analyser la structure urbaine en prenant en compte son influence sur le climat et l'environnement. En se concentrant sur l'aspect bioclimatique, il s'agit d'observer comment la forme et la configuration des villes peuvent affecter les conditions climatiques locales ainsi que le bien-être des habitants.

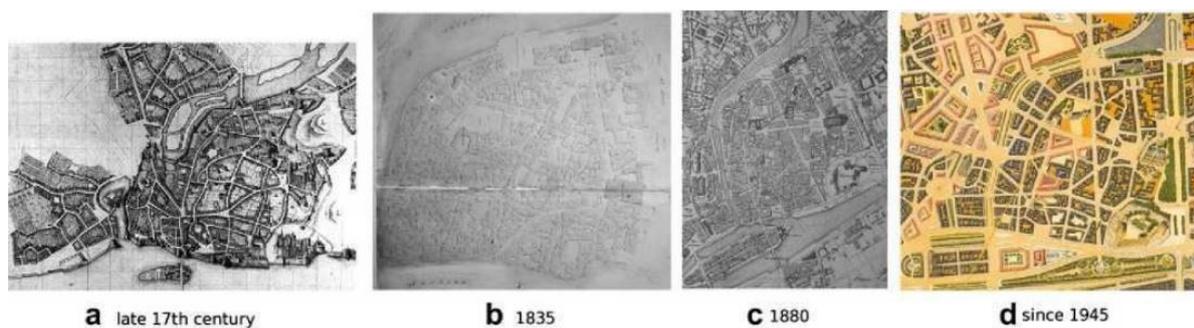
#### IV.6 Approche historique

L'approche historique de l'étude des morphologies urbaines consiste à évaluer la performance thermique des structures urbaines en examinant leur évolution chronologique. Cette évaluation se fait généralement à l'aide de modèles de simulation numérique, ce qui permet de quantifier l'impact des changements morphologiques sur l'évolution du microclimat. Cette approche contribue à mieux comprendre comment les villes peuvent être conçues et aménagées de manière plus durable sur le plan environnemental, en créant des environnements urbains plus confortables et économes en énergie.

## IV.6.1 Étude de Benzerzour (Benzerzour et al., 2011)

Le chercheur a quantifié l'effet de la politique urbaine sur le microclimat de la ville de Nantes (France), en particulier ceux initiés par les salubristes au milieu du 19<sup>e</sup> siècle. Pour cela il a défini l'évolution de la forme urbaine du centre historique de Nantes en se basant sur les archives de la ville. Cinq états représentatifs du changement de la ville, correspondant à environ la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, 1756, 1835, 1880 et 1945 (*Figure III. 10*).

- État 1 : Fin du 17<sup>e</sup> siècle : représente l'état initial de l'ancien centre-ville, se caractérise par des bâtiments à faible hauteur, avec une structure à ossature en bois. Une faible densité de bâti et des rues non pavées
- État 2 : 18<sup>e</sup> siècle (1756) : Cet état met en évidence trois principales transformations : rues pavées, remplacement des bâtiments à ossature de bois par des bâtiments en pierre et l'implantation de bâtiments à grande hauteur.
- État 3 : Début du 19<sup>e</sup> siècle (1835) : élargissement et alignement des rues, les fossés entourant le centre ont été comblés et la densification des îlots (suppression des jardins)
- État 4 : Fin du XIX<sup>e</sup> siècle (1880) : Suivant les instructions de la commission Cherot (1852), la généralisation de l'élargissement et de l'alignement des rues dans tout le centre ancien et la création de nouvelles percées. Dans la même époque, les cours intérieures ont été pavées
- État 5 : Ce dernier état est représentatif des modifications apportées au centre ancien suite au comblement de l'Erdre et du bras nord de la Loire. Les bâtiments ont été isolés.

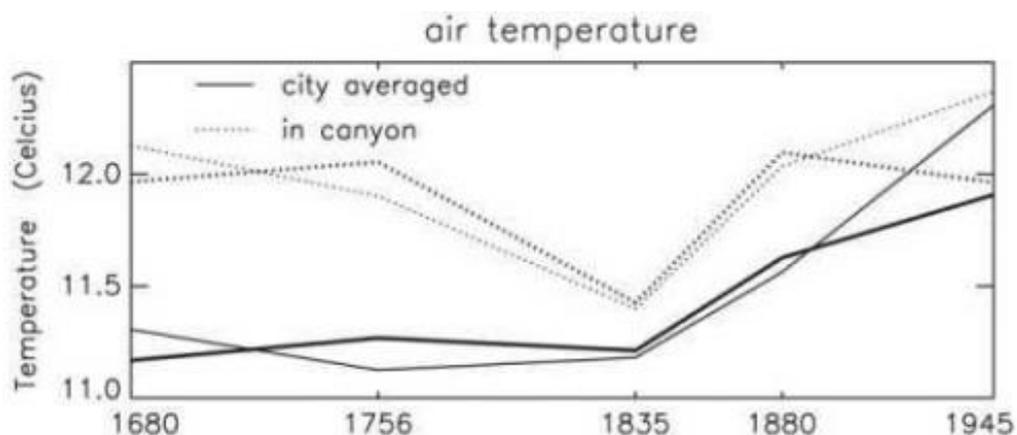


*Figure III. 10:* les états représentatifs la modification du centre ancien de la ville de Nantes. *Source :* (Benzerzour et al., 2011)

Le comportement énergétique et microclimatique du centre-ville de Nantes est évalué en utilisant une simulation numérique basée sur le modèle TEB pour chaque date. Cette simulation a été alimentée par des informations historiques telles que des plans, des illustrations

et des documents réglementaires intégrés dans un SIG pour caractériser la ville à différentes époques et initialiser TEB en conséquence.

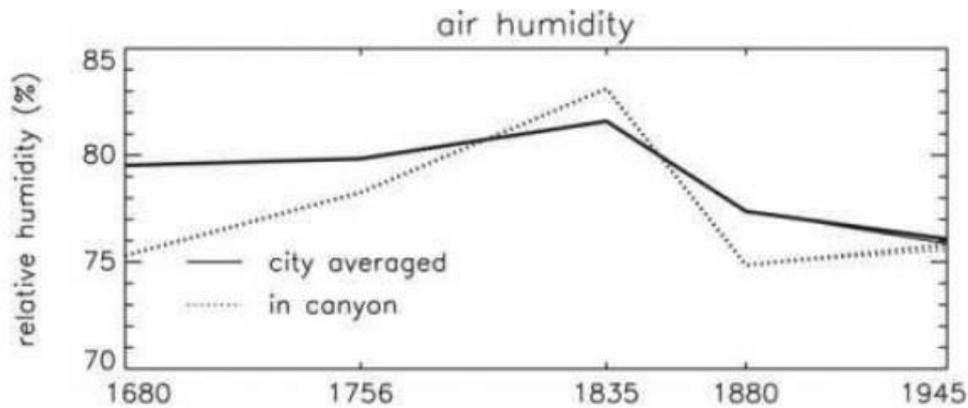
La moyenne annuelle de la température de l'air dans l'ensemble de la vieille ville de Nantes a été simulée (*Figure III. 3*), et les résultats indiquent qu'elle est similaire à celle de la campagne au 17<sup>e</sup> siècle, période où la proportion de terrain construit était très faible. Malgré une densité de population croissante, la température est restée stable jusqu'en 1835, contrairement aux attentes, étant donné que les villes plus denses ont généralement un indice de chaleur urbain plus élevé. Cette stabilité est attribuée en partie à la présence d'eaux usées sur les routes, ainsi qu'à l'étroitesse extrême des rues, qui empêchait la lumière du soleil d'y pénétrer. Ensuite, la température a commencé à augmenter, atteignant une augmentation totale d'environ 0,8 degré. Une phase de réchauffement plus rapide s'est produite au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, avec une augmentation d'environ 0,1°C par décennie, correspondant à la généralisation du chauffage domestique dans tout le centre-ville de Nantes. Enfin, la température simulée a continué à augmenter jusqu'en 1945, mais à un rythme plus lent en raison de la généralisation de l'isolation des bâtiments.



*Figure III. 11*: la température moyenne annuelle de la ville de Nantes. Source : (Benzerzour et al., 2011).

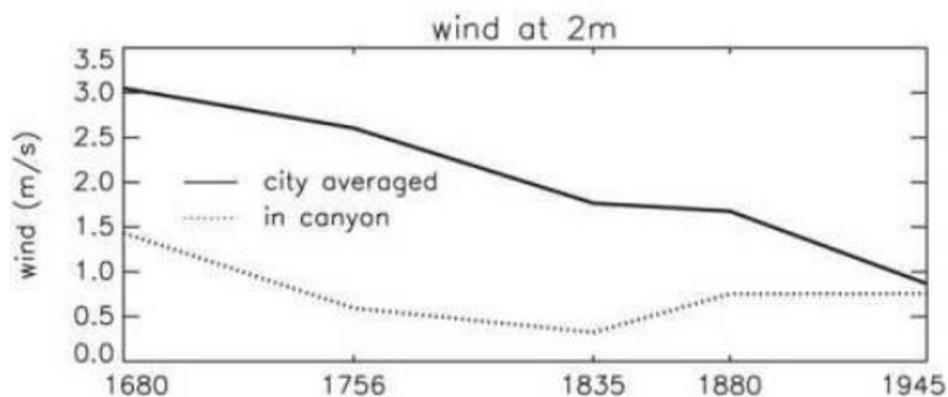
La simulation montre une variation de l'humidité relative au fil des siècles (*Figure III.12*), avec des différences significatives entre les rues étroites et insalubres et les zones les plus ventilées, telles que les jardins et les quartiers riches sur les hauteurs. Au XVII<sup>e</sup> siècle, la ville était relativement humide en raison de la présence de nombreuses végétations et jardins. Le pavage des rues a légèrement réduit l'humidité entre 1680 et 1756, mais cette tendance a été masquée par le rétrécissement des rues, qui a réduit la ventilation et empêché l'humidité de s'échapper. L'augmentation de la densité et de la hauteur des bâtiments jusqu'en 1835 a tendance à rendre l'air plus humide. Cependant, l'enfouissement des égouts au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle a

entraîné une baisse drastique de l'humidité relative dans les rues, la ville devenant alors plus sèche que la campagne environnante. Enfin, l'humidité relative a continué de diminuer jusqu'en 1945, principalement en raison de la généralisation de l'isolation des bâtiments.



**Figure III. 12 :** la moyenne annuelle de l'humidité relative dans la ville de Nantes. Source : (Benzerzour et al., 2011).

La densification urbaine entraîne une diminution du vent moyen (**Figure III. 4**) dans les rues, une tendance qui a perduré jusqu'aux années 1850, lorsque les hygiénistes ont commencé à élargir et à ouvrir les rues. Le modèle de simulation reproduit une augmentation de la ventilation des rues, en accord avec les intentions des urbanistes de l'époque, qui cherchaient à purifier l'air.



**Figure III. 13 :** la moyenne annuelle de la vitesse du vent dans la ville de Nantes. Source : (Benzerzour et al., 2011)

Cette recherche fournit une indication convaincante de la manière dont les interventions en urbanisme peuvent affecter le climat urbain sur le long terme. En particulier, la portée de l'étude, qui couvre une ville réelle ayant existé et une période de plus de trois siècles, démontre la possibilité de mettre en place des politiques d'urbanisme en conformité avec les objectifs de préservation de l'environnement tels qu'ils sont définis aujourd'hui. Les hygiénistes ont lancé cette politique, qui s'appuie à la fois sur des actions ciblées (telles que le comblement des

rivières ou la construction de boulevards) et sur des réglementations (comme la définition du rapport hauteur des bâtiments/largeur des rues, les techniques et les matériaux de construction, les réseaux d'égouts souterrains).

#### IV.7 Approche de l'étude des morphologies existantes

Une approche supplémentaire, fondée sur l'analyse des configurations urbaines existantes, consiste à caractériser les climatopes<sup>10</sup> dans le but de fournir des lignes directrices de conception pour le développement urbain. Cette approche vise à identifier et décrire les différentes zones urbaines en fonction de leur utilisation du sol et de leurs caractéristiques de ventilation, afin de mieux comprendre leur influence sur le microclimat local.

Cette approche intègre l'utilisation d'outils tels que les mesures sur site et la simulation numérique pour étudier les différents types de zones et leurs caractéristiques climatiques. En fournissant des directives basées sur ces caractéristiques, cette approche favorise le développement urbain durable en prenant en compte les aspects bioclimatiques.

##### IV.7.1 Etude de Johansson (Johansson, 2006)

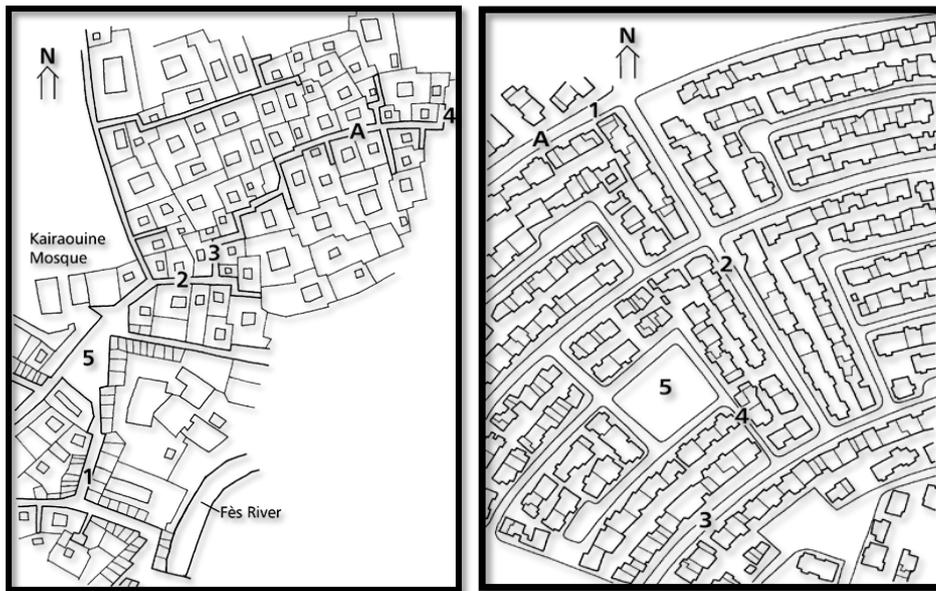
Dans le climat semi-aride de Fez au Maroc, le chercheur a examiné l'influence de la géométrie urbaine sur le confort thermique extérieur en comparant un canyon de rue extrêmement profond et un autre peu profond. En prenant une zone dans l'ancienne ville et une autre dans la nouvelle ville, le chercheur a conduit une campagne de mesure sur les deux zones choisies.

l'une des zones étudiées se situe dans la vieille ville, au cœur de la médina, caractérisée par une forme urbaine compacte avec des rues étroites et des bâtiments occupant tout le terrain, à l'exception des cours intérieures, tandis que l'autre se trouve dans la nouvelle ville, récemment construite avec une forme urbaine dispersée et uniforme en termes de largeur de rue et de hauteur de bâtiment (**Figure III. 5**). Une campagne de mesure a été menée dans les deux zones sélectionnées.

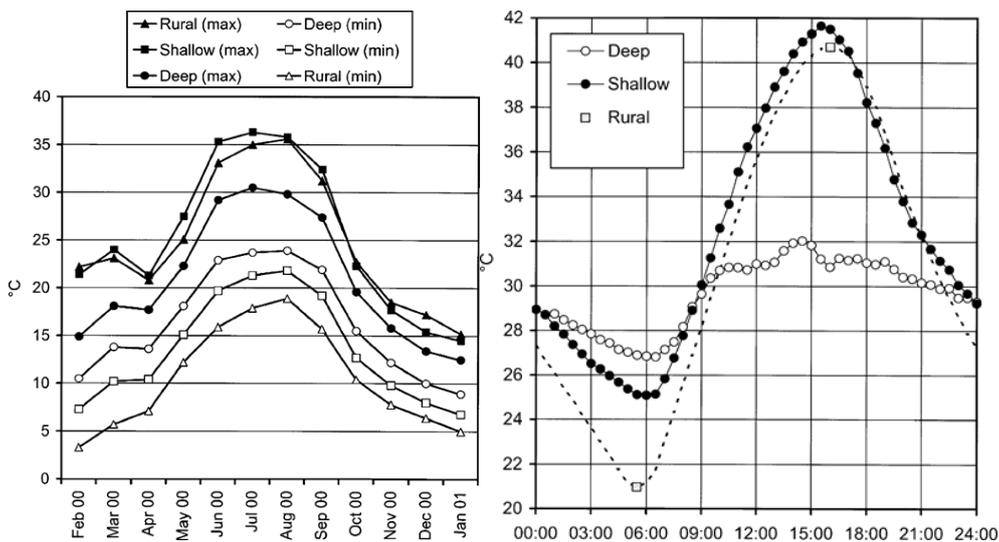
---

<sup>10</sup> Selon Scherer et al. (1999), les climatopes peuvent être définis comme des « zones de combinaisons caractéristiques de facteurs climatiques et d'importance relative semblable pour leur environnement, fonctionnant sur une échelle spatiale de plusieurs dixièmes à des centaines de mètres »

Les mesures ont été divisées en mesures continues à long terme à l'emplacement A et en mesures instantanées à court terme aux emplacements de 1 à 5 et A (*Figure III. 6*). Le confort thermique a été évalué pour les canyons profonds et peu profonds (emplacement A) en calculant le PET<sup>11</sup>. Tous les paramètres nécessaires pour calculer la PET ont été mesurés, à l'exception du rayonnement à ondes courtes (directes et diffuses) pour Fez, qui a été extrait du logiciel Meteonorm.



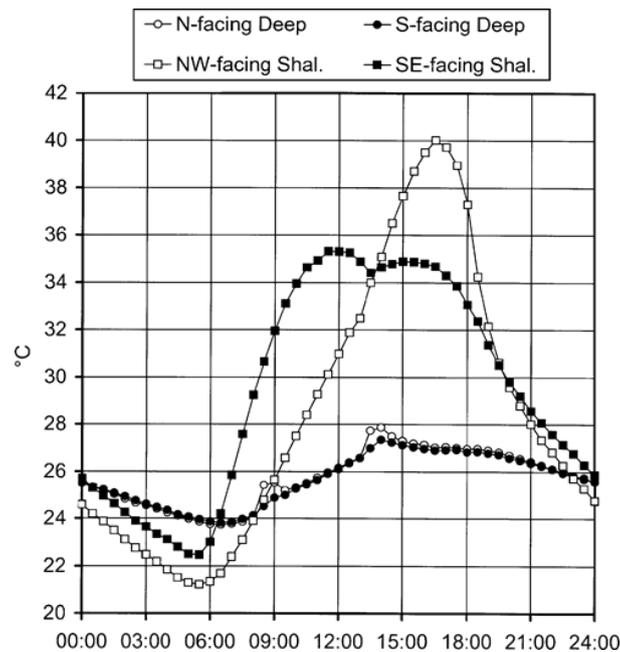
*Figure III. 14* : les deux cas d'étude, à droite la nouvelle ville, à gauche le centre ancien. Source : (Johansson, 2006)



*Figure III. 15* : à gauche la variation annuelle de la température dans les deux canyons urbains et la station rurale ; à droite la moyenne de température en été pour les deux canyons et la station rurale. Source : (Johansson, 2006)

<sup>11</sup> L'indice thermique : La température physiologique équivalente.

En analysant la période la plus chaude de la journée, le canyon profond était nettement plus frais que celui peu profond. Cette différence a été observée toute l'année, mais elle a été particulièrement affirmée en été (**Figure III.15**). Pendant la saison chaude, la différence moyenne des températures maximales diurnes entre les deux canyons était de 6 K. En général, la différence était la plus élevée les jours chauds et ensoleillés (la différence de température maximale enregistrée entre les canyons pendant la période estivale était de 15 K).



**Figure III.16** : la température de surface pour le canyon profond (juin) et peu profond (juillet). Source : (Johansson, 2006)

Le canyon profond présente des températures de surface faibles (**Figure III. 76**) et stables, en raison d'un faible facteur de vue du ciel FVC qui réduit à la fois le rayonnement solaire incident pendant la journée et le refroidissement radiatif pendant la nuit. Cependant, une légère augmentation de la température a été remarquée sur la façade nord en juin, qui résulte de courtes périodes d'exposition solaire vers 9h00 et 14h00. Les mesures instantanées des températures de surface sont similaires aux mesures continues.

Le canyon peu profond présente de grandes variations de température de surface, expliquées par des différences d'orientation, de réflectivité de surface, de hauteur au-dessus de la rue et d'heure de la journée. Les mesures instantanées, prises à une hauteur inférieure, ont montré des températures de façade inférieures aux mesures continues pendant la journée et supérieures pendant la nuit. Cela peut s'expliquer par la présence de végétation le long des parties inférieures des façades qui réduit à la fois le rayonnement solaire incident et le refroidissement radiatif nocturne.

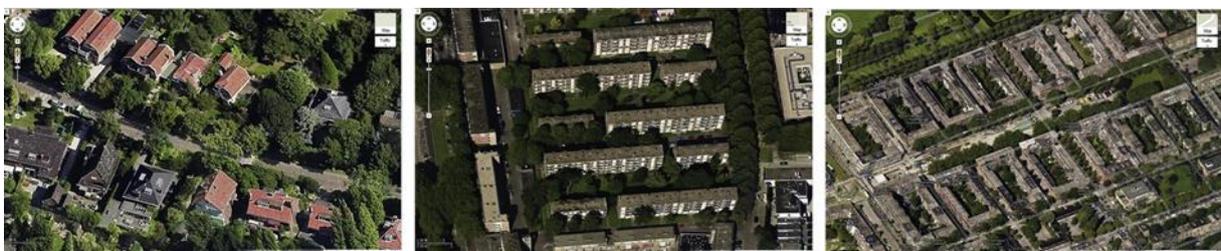
## IV.8 Approche des archétypes

Une approche courante consiste à analyser des formes urbaines génériques prédéfinies et à catégoriser les configurations urbaines typiques en fonction de leurs effets microclimatiques, thermiques ou aérodynamiques attendus, cela peut être effectué à l'échelle micro (Merlier, 2015). L'étude des archétypes est relativement simple et permet des comparaisons et des investigations détaillées des différents phénomènes physiques ainsi que des études paramétriques. Par conséquent, les mécanismes fondamentaux peuvent être identifiés et fournir une base utile pour des études plus complexes.

En utilisant une telle approche et certains indicateurs morphologiques (Steemers et al., 1997) ont analysé les implications de la morphologie urbaine en termes de disponibilité solaire, conditions éoliennes et de dispersion des polluants. (Ratti et al., 2003) ont réduit la portée à trois de ces archétypes, qui ont été comparés pour leur performance environnementale dans un climat chaud et aride : la cour arabe traditionnelle, le micropavillon et le plus grand pavillon. Ces études ont mis en évidence les différents comportements des formes compactes ou détachées, ainsi que le cas particulier des cours, qui connaissent des conditions thermiques et aérodynamiques internes très particulières.

### IV.8.1 Étude de Taleghani (Taleghani et al., 2015)

Dans son étude il a sélectionné et évalué cinq formes urbaines en termes de confort thermique dans le climat tempéré des Pays-Bas. Les formes urbaines sont simplifiées et tirées de l'étude de Ratti (Ratti et al., 2003) et des exemples existants dans les contextes urbains néerlandais (*Figure III. 8*). L'étude vise à étudier le confort thermique d'un piéton au centre de cinq formes urbaines.



*Figure III. 17* : Formes urbaines singulières (gauche) linéaires (milieu) et de cour (droite) aux Pays-Bas. Source : (Taleghani et al., 2015).

À cet égard, la journée la plus chaude de l'année de référence néerlandaise est considérée pour les simulations avec le logiciel spécialisé ENVI-met et les résultats ont été pris

à 1,40 m de hauteur au centre des formes urbaines. Ces données ont été entrées dans RayMan pour calculer la température physiologique équivalente (PET) basée sur les facteurs de vue du ciel des points centraux. Premièrement, ENVI-met a été utilisé pour générer la température moyenne radiante, la température de l'air, la vitesse du vent et humidité relative des points récepteurs pour un piéton normal.

Les blocs sont de 10×10m<sup>2</sup> chacun avec une hauteur de 9m (3 étages). Le récepteur est situé au centre du canyon ou de la cour à une hauteur de 1.40m. Les cinq formes urbaines sont :

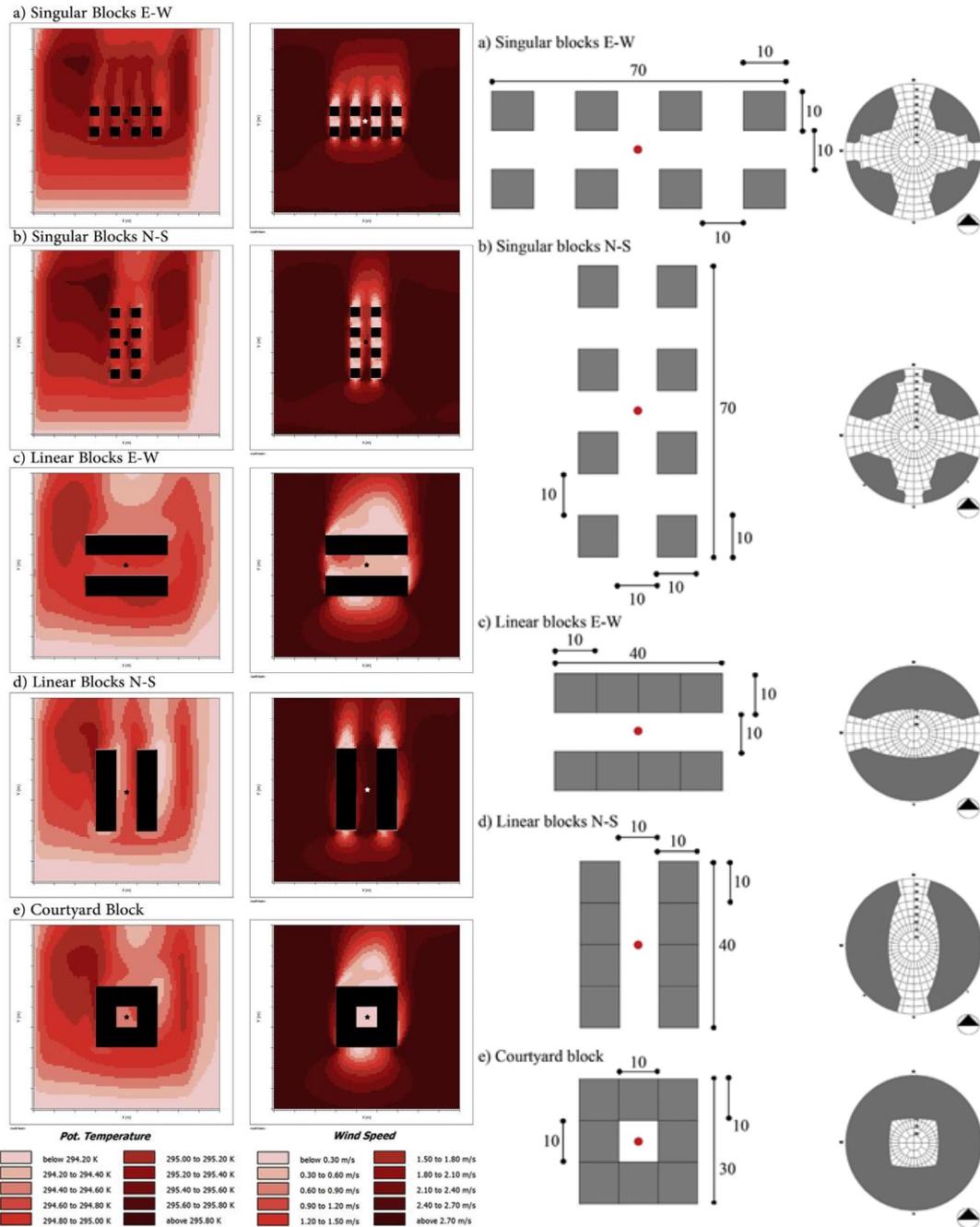
- Le bloc isolé orienté est-ouest
- Le bloc isolé orienté nord-sud
- Le bloc linéaire orienté est-ouest
- Le bloc linéaire orienté nord-sud
- Le bloc à patio

La **Figure III. 9** montre la température de l'air et la vitesse du vent au moment le plus chaud de l'année de référence pour ces modèles. En comparant la température de l'air et la vitesse du vent dans ces modèles, les modèles singuliers (a et b) sont simultanément plus exposés au soleil et au vent du Sud. De même, le modèle linéaire E/O a une longue durée de soleil direct. La température radiante moyenne diminue puisque les rayons directs du soleil sont bloqués par le bord du toit du bloc linéaire inférieur réduisant le rayonnement solaire sur le point de référence. De plus, lorsque les rayons du soleil réapparaissent derrière l'obstacle, la température radiante moyenne monte à la même température qu'à 11 h.

En revanche, le modèle linéaire N/S (d) montre un comportement différent. Avant 11h00, le point central est protégé par les bâtiments environnants et T<sub>mrt</sub> augmente avec une faible pente. Entre 10:00 h et 14 :00 h, il reçoit le soleil direct et T<sub>mrt</sub> augmente très rapidement. De même, le modèle de cour présente la même augmentation de T<sub>mrt</sub>, mais son sommet est inférieur à celui du modèle N/S linéaire. Cela est dû au blocage du soleil par la façade sud de la cour.

A propos du confort thermique, les formes singulières fournissent une longue durée de rayonnement solaire pour l'environnement extérieur. Cela provoque la pire situation du confort parmi les modèles au centre du canyon. En revanche, la cour offre un microclimat plus protégé qui a moins de rayonnement solaire en été. Compte tenu de la température physiologique équivalente (PET), la cour a les heures les plus confortables un jour d'été. Étant donné que les cours ne sont pas encore très courantes dans les climats tempérés, le changement climatique

mondial, avec une augmentation prévue des niveaux de température en Europe occidentale, préconise l'utilisation de cours dans les milieux urbains (nouveaux ou réaménagés).



**Figure III.18 :** à droite les scénarios choisis, à gauche les résultats de température de l'air et de vitesse du vent pour les scénarios simulés. *Source :* (Taleghani et al., 2015).

Concernant les différentes orientations des modèles et leurs effets sur le confort thermique extérieur, il est difficile de préciser les différences entre les formes singulières orientées E/O et N/S car elles reçoivent des quantités égales d'insolation et sont également exposées au vent. Néanmoins, les formes linéaires orientées E/O et N/S sont différentes dans leur comportement thermique.

#### IV.9 Approche de la définition de catégories de configurations urbaines typiques en fonction de leurs effets microclimatiques

D'un autre point de vue et en fonction de l'identification des utilisations importantes des terres qui peuvent affecter les microclimats urbains ainsi que les zones thermiques urbaines qui sont liées à la géométrie urbaine, à la configuration des rues et aux matériaux de construction, Oke (2006) a conçu une typologie des zones urbaines connues sous le nom de zones climatiques urbaines (ZCU) aient des effets substantiels sur le climat urbain. Elles sont corrélées avec différentes classes de rugosité, structures (en termes d'aspect de la rue et densité du bâtiment), couverture (l'imperméabilité de la surface) et les métabolismes (utilisation des sols ou activités humaines).

(Stewart & Oke, 2012) ont raffiné les ZCU afin de mieux représenter les types urbains et ruraux qui sont liés à des niveaux de température précis. Une typologie des zones climatiques locales (ZCL) a été établie. Chaque ZCL est caractérisée par son régime de température et fait référence à une unité d'échelle locale (environ 1 km<sup>2</sup> selon Oke (2006)). Sur la base de ces ZCL, l'effet ICU peut être mieux caractérisé et les types de morphologies urbaines peuvent être liés aux propriétés microclimatiques attendues. La classification des ZCL distingue dix types construits montrés dans la *Figure III. 10*. Elles sont caractérisées par leur facteur de vue du ciel typique, le rapport d'aspect, la hauteur, le rapport de surface construite et l'imperméabilité relative de surface ainsi que la classe de rugosité. Ces types de constructions peuvent être associés à sept couvertures terrestres afin de mieux évaluer leurs effets climatiques potentiels. Il est à noter que des critères aérodynamiques devraient être pris en considération pour effectuer cette approche, en plus des paramètres liés à la température.

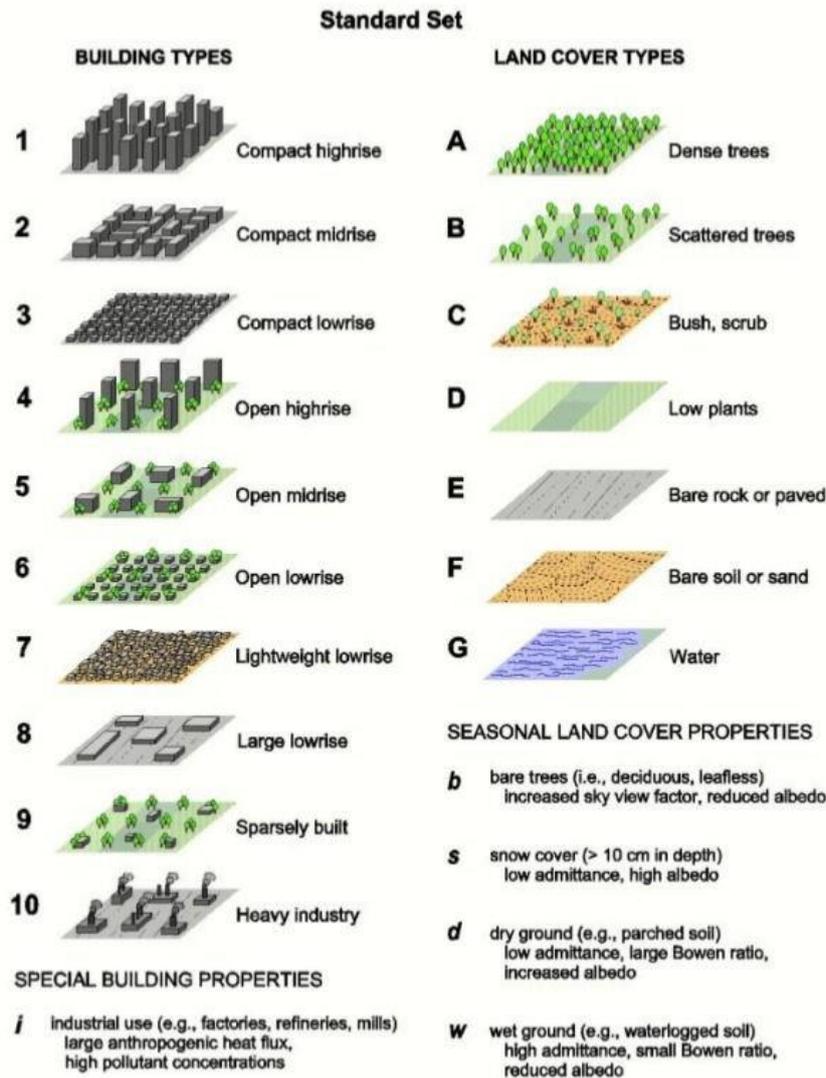


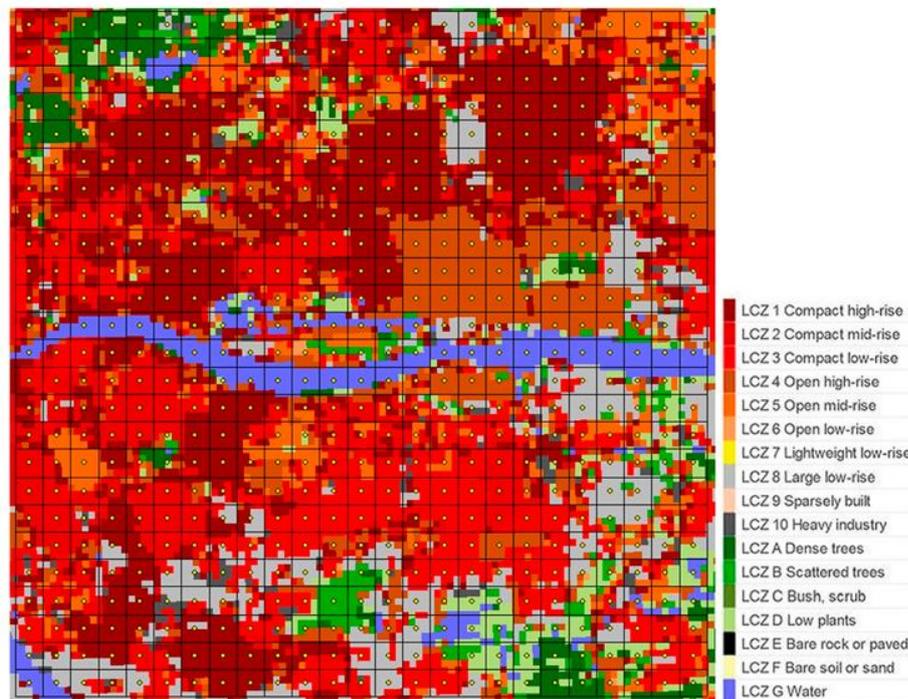
Figure III. 19 : classification de zones climatiques locales ZCL. Source : (Stewart & Oke, 2012).

IV.9.1 L'étude de Yurong Shi (Shi et al., 2019)

Dans cette étude, la zone centrale urbanisée de Guangzhou dans la région subtropicale humide en Chine a été sélectionnée comme cas d'étude. Des images satellitaires de Landsat 8 ont été utilisées pour obtenir des cartes des zones climatiques locales ZCL, de la température de surface terrestre LST, de l'îlot de chaleur urbain de surface ICUS et des facteurs morphologiques. Une base de données SIG a été élaborée en utilisant une série d'algorithmes de traitement et de classification basés sur 625 échantillons de ZCL.

Neuf variables ont été prises en compte dans cette étude, notamment l'albédo de surface ( $\alpha$ ), le facteur de vue du ciel (SVF), le rapport de couverture végétale, le rapport de surface au sol, la densité du bâtiment, l'émissivité du sol ( $\epsilon$ ), le rapport de surface complet proposé par

(Voogt & Oke, 1997), la hauteur moyenne du bâtiment et le rapport entre la hauteur et la superficie du bâtiment.

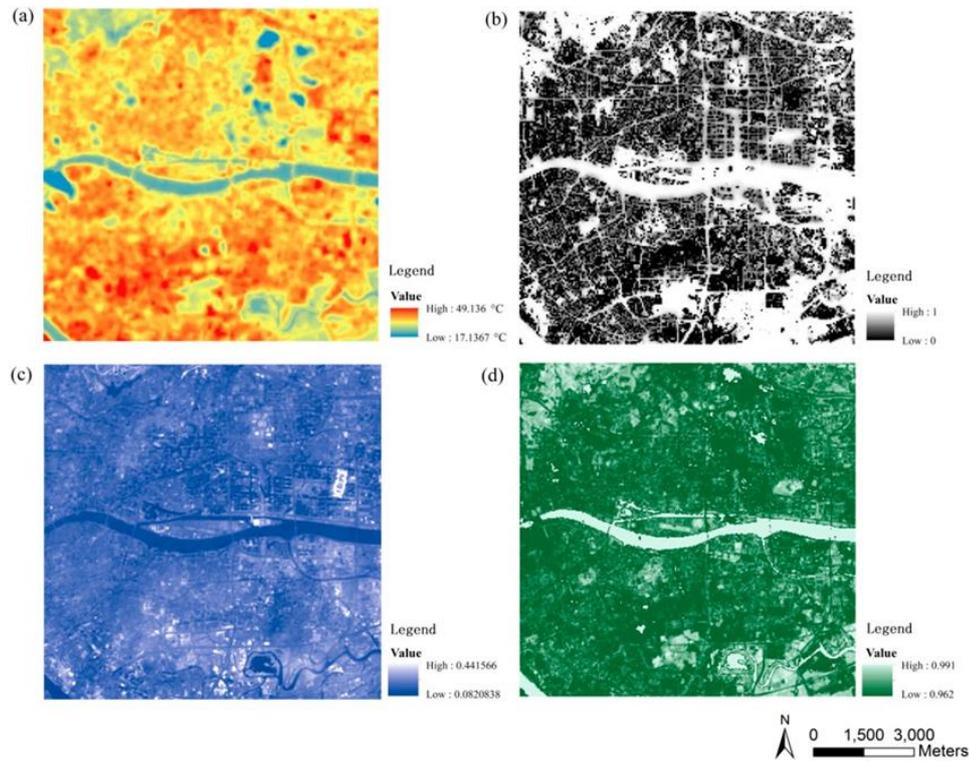


**Figure III. 20 :** Carte de classification LCZ avec grilles de 400 m 400 m pour la zone urbaine centrale de Guangzhou. **Source :** (Shi et al., 2019).

Les échantillons de données ont été obtenus en combinant les données de la carte de la ZCL (**Figure III. 11**), de l'image LST et des relevés des facteurs morphologiques (**Figure III. 12**). Ils ont été sauvegardés dans une base de données et intégrés au logiciel des statistiques SPSS pour l'analyse des données. L'analyse de corrélation de Pearson et la régression linéaire multiple ont été effectuées sur tous les échantillons de données pour observer l'évolution de la tendance des ICUS avec divers facteurs morphologiques et pour identifier les facteurs clés avec des corrélations significatives et élevées avec l'îlot de chaleur urbain de surface. Les cinq sixièmes des échantillons ont ensuite été choisis au hasard pour générer les modèles de prédiction ICUS en utilisant la méthode de régression linéaire multiple. Et le sixième restant des échantillons a été utilisé pour valider les modèles.

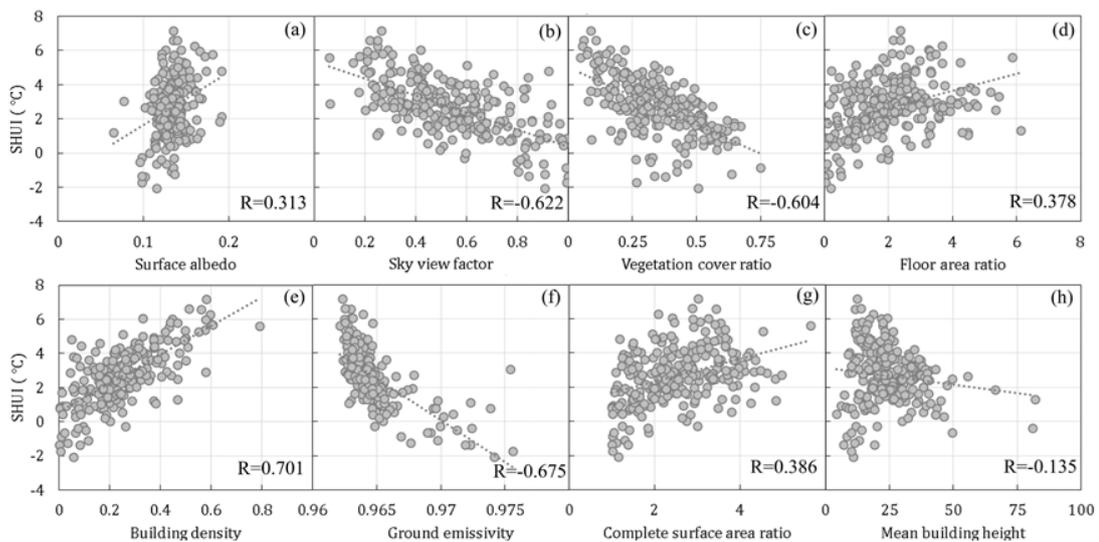
Les résultats de l'analyse de corrélation de Pearson pour la ZCL mixte sont présentés dans la **Figure III. 13**. Les facteurs de : l'albédo de surface, du rapport de surface au sol, de la densité du bâtiment et du rapport de surface complet montrent des corrélations positives avec l'ICUS, tandis que d'autres facteurs montrent des corrélations négatives. Les tendances changeantes du taux de couverture végétale, de la densité des bâtiments, de l'émissivité du sol

et de la hauteur moyenne des bâtiments concordent bien avec les ZCL de 1 à 5 et les résultats antérieurs (*Figure III. 14*). La corrélation dans sa valeur absolue est plus grande pour la densité du bâtiment et l'émissivité du sol, suivie par les facteurs de vue du ciel et du ratio de couverture de la végétation, alors qu'elle est inférieure à 0,4 pour les autres.



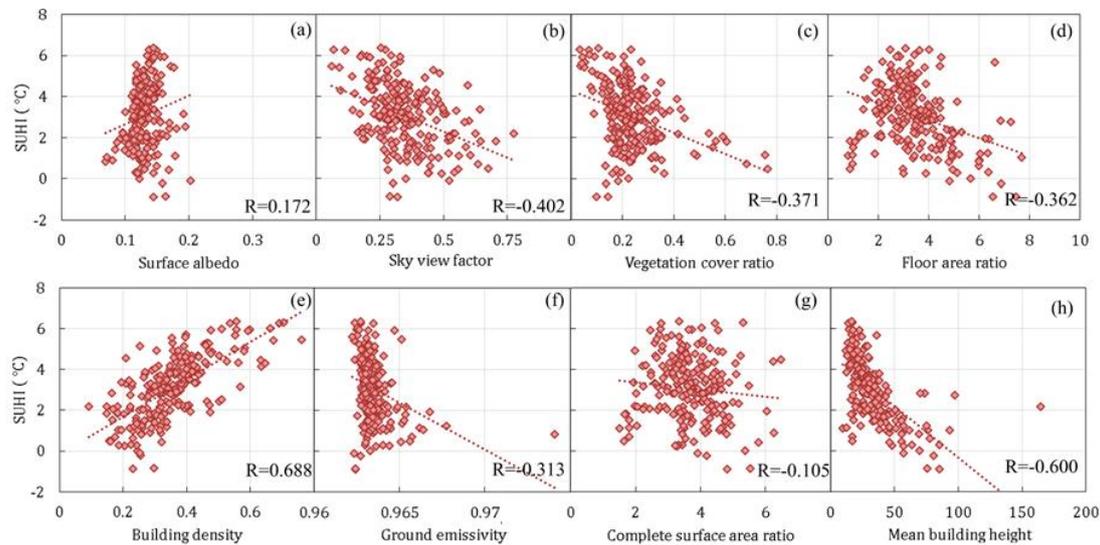
**Figure III. 21 :** Température de surface du sol (LST), (b) facteur de vue du ciel, (c) albédo de surface, et (d) images de récupération de l'émissivité du sol pour la zone urbanisée centrale de Guangzhou.

*Source :* (Shi et al., 2019).



**Figure III. 22 :** La corrélation entre l'ICU et les facteurs morphologiques pour la zone LCZ mixte dans la zone urbaine centrale de Guangzhou. *Source :* (Shi et al., 2019).

Tant pour les LCZ 1 à 5 que pour la LCZ mixte, les corrélations de l'albédo de surface et du facteur de vue du ciel avec le SUHI de jour d'été ont montré des signes opposés à ceux des constatations précédentes. De plus, les deux facteurs de rapport de surface au sol et de rapport de surface complet ont montré des corrélations opposées dans les LCZ de 1 à 5 et dans la LCZ mixte.



**Figure III. 23 :** La corrélation entre l'ICUS et les facteurs morphologiques pour les LCZ de 1 à 5.

*Source :* (Shi et al., 2019).

## V. Conclusion

En conclusion, la morphologie urbaine peut être définie comme la manière dont les formes, les structures et les caractéristiques de l'espace urbain sont organisées et interconnectées. Cette organisation peut être analysée à différentes échelles, allant de la micro-échelle (où l'on étudie les détails physiques de l'environnement urbain) à la méso-échelle (où l'on prend en compte les relations entre les différentes parties de la ville).

Les paramètres morphologiques peuvent être classés en deux catégories principales : les paramètres micro-morphologiques (tels que la largeur des rues, la densité de construction, la hauteur des bâtiments, etc.) et les paramètres méso-morphologiques (tels que la distribution des différents types d'utilisation du sol, la hiérarchie des rues ...etc.).

L'étude de la morphologie urbaine sous l'angle bioclimatique consiste à prendre en compte les effets de la forme urbaine sur le climat local et sur les conditions de confort thermique et acoustique pour les habitants. Cette approche nécessite une compréhension fine

de la manière dont les paramètres morphologiques influencent les phénomènes météorologiques tels que le vent, le rayonnement solaire, la température et l'humidité de l'air.

Enfin, les études de cas ont permis de mettre en lumière l'importance de l'analyse morphologique pour la compréhension et la gestion des villes. Par exemple, l'étude des quartiers historiques de certaines villes permet de mieux comprendre leur évolution et leur fonctionnement actuel, tandis que l'analyse des quartiers récents peut aider à concevoir des espaces urbains plus durables et plus adaptés aux besoins des habitants.

# ***Partie 02 :***

---

*Présentation de la  
méthodologie adoptée et les  
résultats obtenus*

La présente section pratique de la recherche est divisée en trois chapitres ayant pour objectif d'approfondir l'étude du comportement thermique de la ville de Mostaganem à deux échelles spatiales distinctes. Ces chapitres mettent en œuvre une méthodologie rigoureuse visant à analyser l'impact de la morphologie urbaine sur l'intensité des îlots de chaleur urbains. Pour ce faire, nous combinons différentes approches, notamment la télédétection, les mesures in situ, les simulations numériques et la modélisation statistique.

Le premier chapitre se focalise sur l'étude du comportement thermique de la ville de Mostaganem à une échelle mésoclimatique, utilisant la télédétection comme méthode d'investigation.

Le deuxième chapitre se concentre sur l'analyse du comportement quotidien de l'îlot de chaleur urbain en relation avec la morphologie urbaine, à une échelle microclimatique.

Enfin, le troisième chapitre présente la partie la plus essentielle de cette recherche. Les résultats des simulations numériques sont interprétés et évalués à travers diverses étapes. Une étude statistique est réalisée pour analyser l'impact du facteur de vue du ciel (FVC), un paramètre morphologique largement étudié dans la littérature, sur la température de l'air et la température de surface. Cette analyse s'appuie sur une régression linéaire appliquée à dix-huit scénarios simulés. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre l'effet de la morphologie urbaine sur le comportement thermique à différentes échelles.

# **CHAPITRE IV :**

*Analyse de l'ICU à l'échelle  
mésoclimatique : Détection et  
cartographie de la température de surface  
LST et de l'îlot de chaleur urbain de  
surface sur la ville de Mostaganem*

## **I. Introduction**

Ce chapitre présente la première partie de la contribution de cette recherche, qui vise à étudier le comportement thermique de la ville de Mostaganem à une échelle mésoclimatique. Il vise également à évaluer la qualité environnementale des formes urbaines existantes dans la ville et l'impact des politiques urbaines adoptées sur la création et le développement des zones à haute température. La première section du chapitre consiste en une présentation détaillée de la ville de Mostaganem, incluant sa situation géographique, son climat, ainsi qu'un bref historique sur son apparition et sa formation. La fin de cette partie sera consacrée à l'étude de l'évolution de l'urbanisation de la ville, ainsi qu'aux formes urbaines caractérisant chaque période.

La deuxième partie de ce chapitre exposera la méthodologie adoptée pour détecter la température de surface (LST) et l'îlot de chaleur urbain de surface. Cette partie présentera les différentes étapes d'application des algorithmes et de traitement des images satellitaires visant à extraire les informations relatives aux caractéristiques thermiques de la surface terrestre.

La troisième section sera dédiée à la présentation et à l'interprétation des résultats obtenus grâce à la méthodologie appliquée, ainsi qu'à l'analyse de la relation entre la distribution spatiale de la température de surface (LST) et l'emprise au sol d'une part, et la distribution spatiale des paramètres biophysiques analysés (NDVI et NDBI) d'autre part. Cette partie permettra également d'analyser l'impact de la morphologie urbaine sur la distribution et l'intensité de la température de surface terrestre.

## **II. Présentation de la ville de Mostaganem**

### **II.1 Étymologie du mot Mostaganem**

Plusieurs essais pour expliquer la signification du mot ont été avancés et développés par M. Belahmissi (Yamani, 2014):

- « Machta » (station hivernale), « Ghnem » (riche éleveur de moutons).
- « Marsa » (port), « Ranem » (le butin).
- « Mechta » (cabane) et Ghanem (roseau).

Selon quelques historiens de l'antiquité, Mostaganem a tiré son nom à partir d'un port romain « Murusta ». D'autres déclarent que le terme vient de Misk Al Ghanem (bon pâturage).

Et d'après la population de cette ville, Mostaganem naît de « Mesk » (parfum) et « Ghanam » (le nom du fabricant).

## II.2 Situation géographique

Située au nord-ouest de l'Algérie, la ville est le chef-lieu de la wilaya de Mostaganem. Se situe à environ 80,7 kilomètres à l'est d'Oran et à 363 kilomètres à l'ouest d'Alger, à une latitude de 35°58'29.86 nord et une longitude de 0° 6'59.72 nord-est. Érigée sur un plateau côtier d'une altitude de 104 mètres, la ville domine la baie d'Arzew à l'ouest, laquelle se termine dans le Jebel Orouse. Mostaganem est bâtie sur les rives de la rivière Ain Sefra, qui a connu plusieurs inondations notables, notamment en 1927. La zone géographique de la ville s'étend sur environ 50 km<sup>2</sup>, avec une population totale dépassant les 245 330 habitants en 2008 et une densité de 2 914 habitants par kilomètre carré.

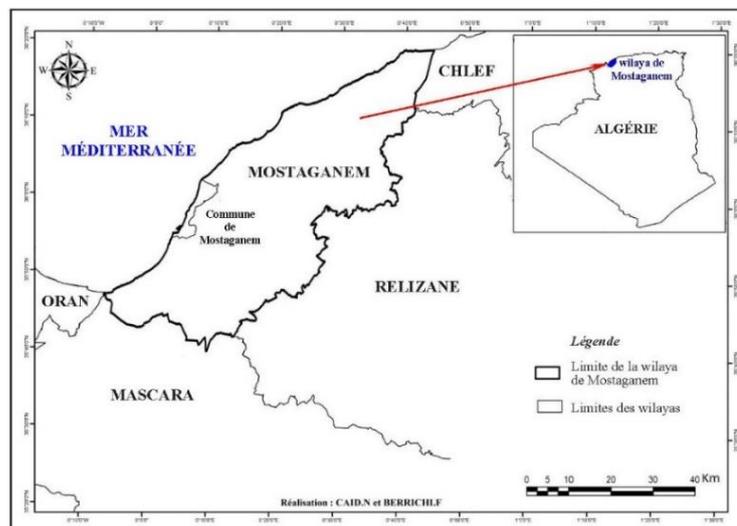


Figure IV. 1: Situation géographique de la ville de Mostaganem. *Source* : (Caïd et al., 2019)

## II.3 Climat de la wilaya de Mostaganem

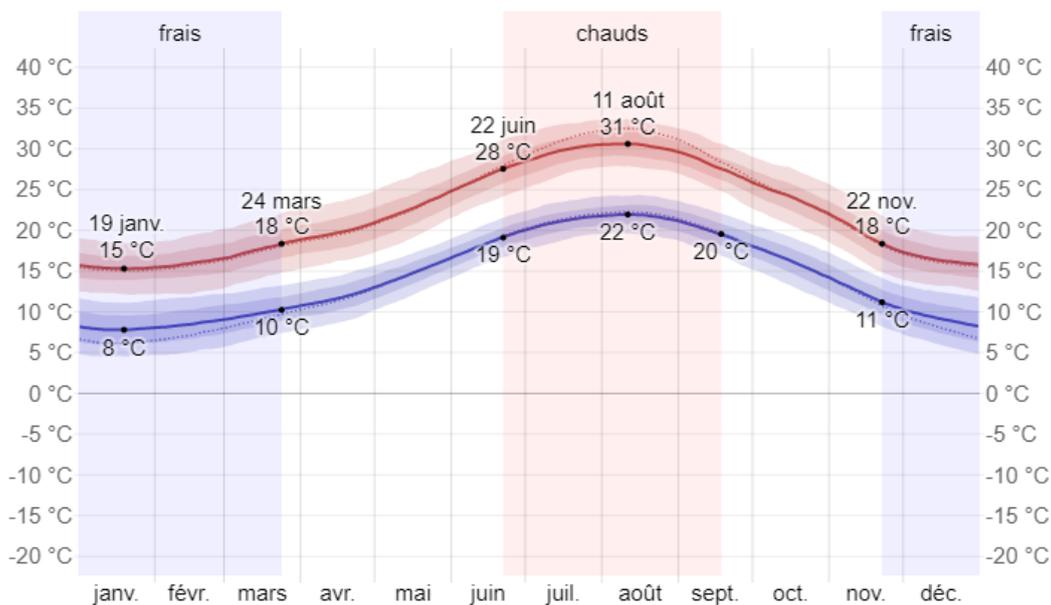
La région de Mostaganem se caractérise par un climat méditerranéen semi-aride. Selon la classification de Köppen-Geiger<sup>1</sup>, le climat est de type BSh, correspondant à un climat de

<sup>1</sup> La Classification de Köppen est une classification des climats fondée sur les précipitations et les températures. C'est Wladimir Peter Köppen qui l'a inventée dans les années 1920. C'est la plus courante des classifications climatiques dans sa version présentée par Rudolf Geiger en 1961. Un très grand nombre d'études climatiques et de publications ont adopté une des versions de ce système. La carte de Köppen-Geiger reste aujourd'hui une référence, grâce à ces mises à jour fréquentes, tant dans les domaines de l'hydrologie, de la géographie, de l'agriculture, de la biologie, la climatologie à travers ses recherches sur l'évolution des climats. Pour plus de détail consulter le site internet : URL : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Classification-de-Koppen.html>.

steppe sec et chaud. Les étés sont courts, très chauds, étouffants et secs, tandis que les hivers sont longs, frais et venteux, et le temps est généralement dégagé tout au long de l'année. Les températures varient entre 8 °C et 31 °C au cours de l'année, et sont rarement inférieures à 4 °C ou supérieures à 34 °C.

### II.3.1 Température

La période de forte chaleur s'étend sur 2,9 mois, du 22 juin au 18 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale dépassant 28 °C. Le mois d'août est le plus chaud de l'année, avec une température moyenne maximale de 31 °C et minimale de 22 °C. La période de fraîcheur s'étend sur 4,0 mois, du 22 novembre au 24 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 18 °C. Le mois le plus froid de l'année est janvier, avec une température moyenne minimale de 8 °C et maximale de 15 °C.



**Figure IV. 2:** variation annuelle de températures maximales et minimales à Mostaganem.

### II.3.2 Précipitations

Selon des données acquises entre 1977 et 2011, la saison la plus pluvieuse à Mostaganem est l'automne, avec une moyenne annuelle de précipitations de 156mm, suivie de l'hiver avec 128mm/an, puis du printemps avec 68mm/an, et enfin de l'été avec seulement 23mm/an. En raison du changement climatique, un accroissement des précipitations est observé sur toutes les saisons, avec une augmentation moyenne de 0,4mm/an pour les saisons d'hiver et de printemps, de 0,6mm/an pour la saison d'été, et une augmentation plus marquée de 2,4mm/an pendant l'automne.

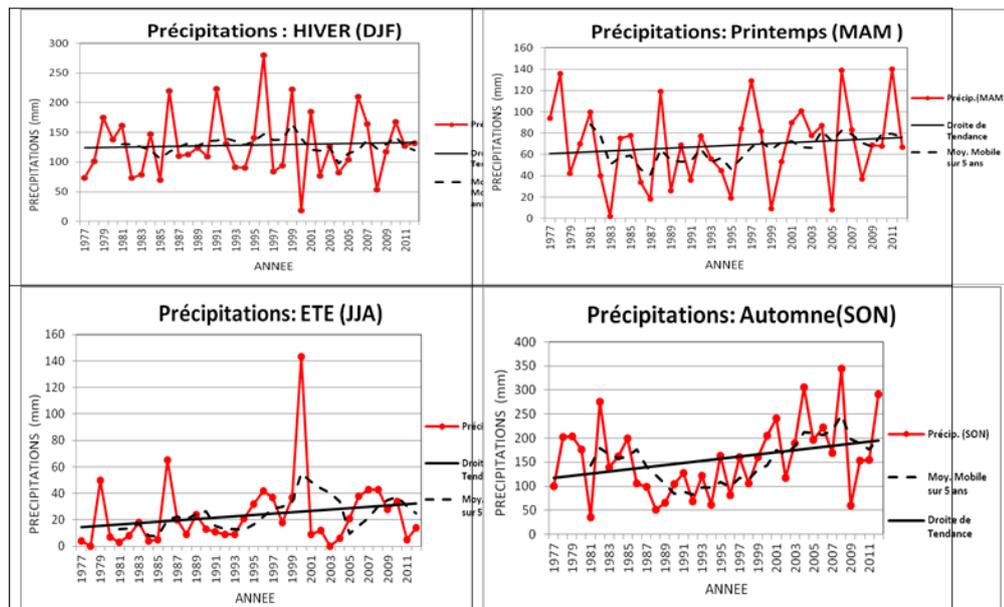


Figure IV. 3: variation des précipitations entre 1977 et 2011 pour les quatre saisons.

### II.3.3 Vent

Cette section porte sur la caractérisation du vent moyen horaire étendu, incluant sa vitesse et sa direction, à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol. La variation saisonnière de la vitesse horaire moyenne du vent à Mostaganem est modérée tout au long de l'année (**Figure IV. 4**).

La période la plus venteuse de l'année s'étend sur 6,5 mois, du 4 novembre au 20 mai, avec des vitesses moyennes supérieures à 15,6 kilomètres par heure. Le mois le plus venteux est février, avec une vitesse horaire moyenne de 17,5 km/h. La période la plus calme de l'année dure 5,5 mois, du 20 mai au 4 novembre, et le mois le plus calme est août, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 13,9 km/h.

La direction horaire moyenne principale du vent à Mostaganem varie au cours de l'année. Le vent vient principalement du nord pendant 3,8 mois, du 28 mai au 23 septembre, avec un pourcentage maximal de 46 % le 21 juillet. Le vent vient principalement de l'ouest pendant 8,2 mois, du 23 septembre au 28 mai, avec un pourcentage maximal de 39 % le 1er janvier.

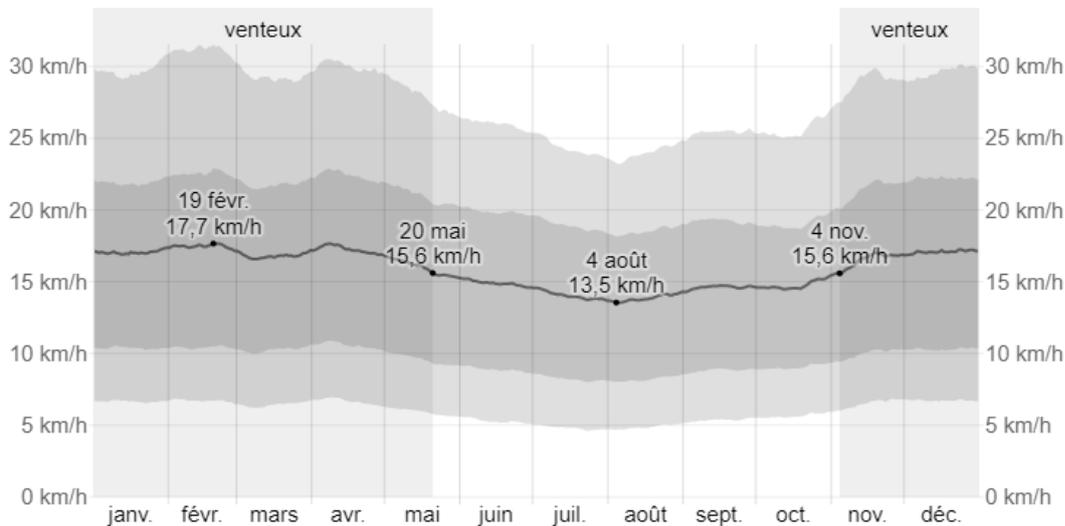


Figure IV. 4: le régime annuel des vents de la ville de Mostaganem

#### II.4 Aperçu historique de la ville de Mostaganem

La naissance de la ville de Mostaganem reste ambiguë. Selon le voyageur anglais Dr SHAW (1692-1751), la ville remonte à l'époque romaine (Dezobry et Bachelet, p 1963).

D'autres chercheurs ont rejeté cette hypothèse, comme l'exprime R. Tinthoin (1955) :

« Il n'existe à Mostaganem aucune trace certaine des Romains. La nature ingrate des terrains sablonneux du plateau, repris par des dunes mouvantes et envahis par landes et bois, n'a pas attiré les colons romains. Il n'existe de ruines de fermes de cette époque qu'en bordure, entre Bouguirat et L'hllil et vers Bled Touahria ; il se peut que les sables aient voilé d'autres témoins »<sup>2</sup>.

Selon G. Marçais, aucun établissement antique a été trouvé dans la région, car les Romains cherchaient toujours les endroits militaires et la plage de Mostaganem restait inaccessible pour plusieurs mois, l'accessibilité par voie littorale était difficile (M. Belahmissi, 1982).

Au 7<sup>e</sup> siècle, la région de Mostaganem était sous la domination de tribus berbères, les Médiouna et les Maghraoua<sup>3</sup> venues des environs de Biskra (R. Tinthoin, 1955).

<sup>2</sup> TINTHOIN, R., "Le Mostaganémois, création d'une région géographique ", actes du 79<sup>e</sup> congrès des sociétés savantes, Alger, 1954. Bulletin de la section de géographie, comité des travaux historiques et scientifiques, Tome LXVII, Paris, imprimerie nationale, 1955, PUF, P.174.

<sup>3</sup> Les Maghraoua appartiennent à la grande confédération des Zenata (Zénètes\*). Selon les généalogistes et principalement Ibn Hazm, ils descendraient de Yalistan Ibn Misra Ibn Zakïa Ibn Warshik Ibn ed-Didet fils de Djana, comme les Béni Ouacin, les Beni Yirniyan et les Béni Ifren. Avec ces derniers, ils formaient la plus grande branche de la race Zenata et Ibn Khaldun les plaçait juste derrière les Djerraoua en ordre d'importance. (Khelifa, 2010)

Au 11e siècle, les Arabes occupaient la région. Les Almoravides étaient les maîtres durant ce siècle. Youcef Ibn Tachfin, fondateur de la dynastie Almoravide, de Marrakech et de Tlemcen a construit la citadelle de Mostaganem (R. Tinthoin, 1955).

Au 12e siècle, le littoral et la rive droite du Chélif étaient sous la domination des Maghraoua. Ils contrôlaient les principales agglomérations entre Cherchel et Mazagran (M. Belahmissi, 1982).

Au début du 16e siècle, l'ancienne confédération arabe issue des Banu-Hillal appelée "Les M'hals ", sous la dominance de Hamid El-Abd s'installait à Mostaganem, en occupant la zone entre Ténès, Mazouna, Mostaganem et Mazaghran, (R. Tinthoin, 1955).

Plus tard, les espagnols, s'établirent à Mostaganem le 26 mai 1511, après avoir occupé Mars El-kebir en 1505, Oran en 1509, Bougie et Tripoli en 1510 (M. Belahmissi, 1982).

Les Turcs venaient en Afrique du Nord pour lutter contre la croix et la civilisation européenne et aider les musulmans à défendre leurs pays, suite à une capitulation signée avec les Marabouts et Cheikhs de cette ville.

Pour M. Belhamissi (1982), en 1526, il est admis que dans une zone géographique s'étendant de Djidjlli à Mostaganem, la population reconnaissait soit l'autorité directe des Turcs, soit leur souveraineté. Cette affirmation peut être interprétée comme une reconnaissance de l'influence politique et de l'autorité exercées par les Turcs dans cette région. C'est ainsi que Mostaganem devait rester une importante ville sous l'occupation turque comme le souligne T. Shaw (1738).

En juillet 1833, la ville de Mostaganem a été occupée par les forces françaises, et cette occupation est devenue définitive à la suite de la signature du traité de la Tafna en mai 1837. À partir de 1848, l'Algérie a été considérée comme faisant partie intégrante du territoire français et a été administrée de manière similaire à la métropole.

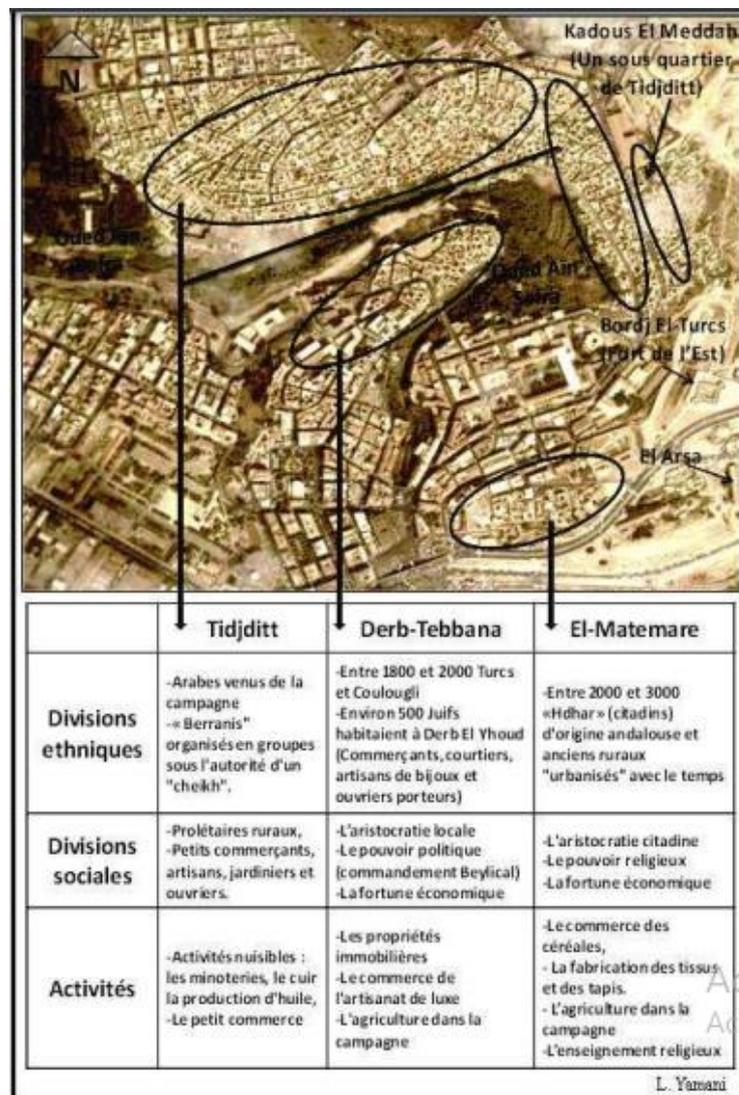
## **II.5 Logique d'urbanisation et forme urbaine**

L'urbanisation de la ville de Mostaganem tout comme les villes algériennes est passée par trois périodes distinctes :

### *II.5.1 La ville précoloniale*

La première ville précoloniale s'est installée à côté de l'Oued Ain-Sefra, un emplacement protégé par une topographie en altitude. Elle a dominé l'environnement en favorisant une situation de défense et de contrôle de la région ouest. En plus, l'Oued était une source d'eau pour la population, l'ensemble présente un modèle bien intégré dans les données

du site, occupant un terrain en pente le long du bord de l'oued, il comprend trois quartiers : Tjiddit, Al Matmar, Derb El Tebbana et quelques bâtiments connus sous le nom d'El Arsa (*Figure IV. 5*).



**Figure IV. 5:** Le noyau historique de la ville de Mostaganem et les grandes divisions ethniques, sociales et fonctionnelles de l'espace. *Source* : (Yamani, 2014)

- 1) **Le quartier de Derb-Tebbana** : également connu sous le nom d'El Bled, est situé sur la rive gauche de la ville et est entouré d'une muraille (*Figure IV. 6*). Sa position stratégique lui a permis de jouer un rôle de contrôle sur l'ouest et la mer, et il représente le noyau central de la ville traditionnelle, où se trouvent de nombreux édifices religieux et administratifs, tels que la grande mosquée, le Bordj M'hals, la mosquée de Sidi Yahia, le palais du Bey Mohamed El-Kebir et deux Zaouias.
- 2) **Le quartier d'El-Matemare** : est caractérisé par les silos construits par Hamid El-Abd (M. Belhamissi, 1982), ainsi que sa propre muraille et le Fort de l'est,

également connu sous le nom de Bordj El-Turcs par les Français. Les résidents de ce quartier étaient composés de citadins d'origine andalouse, ainsi que d'anciens ruraux qui se sont "urbanisés" avec le temps (Yamani, 2014).

- 3) **Le quartier de Tidjdit** : est caractérisé par la présence de Koubas, Makams et de petites mosquées, et est considéré comme une ville jumelle plutôt qu'un simple quartier. Les résidents de ce quartier étaient principalement des Arabes originaires de la campagne, qui s'adonnaient à des activités considérées comme nuisibles.



*Figure IV. 6* : vue sur le quartier Derb Tobbana. *Source* : (Yamani, 2014)



*Figure IV. 7* : vue sur le quartier Tidjdit. *Source* : (Yamani, 2014).

La structure urbaine permanente permet de comprendre les principes de sa composition. L'agencement compact des maisons, l'organisation de la mitoyenneté et d'autres caractéristiques architecturales confèrent à la ville précoloniale son unité et son homogénéité, sans être monotones.

### II.5.2 La ville coloniale

L'urbanisme colonial s'est implanté à proximité du noyau urbain historique, adoptant initialement une orientation nord-sud fondée pour des considérations militaires. Cependant, cette orientation a été ultérieurement abandonnée pour des raisons topographiques. Les quartiers nouvellement développés ont été structurés selon un schéma en échiquier, conformément à une croissance radioconcentrique, influencée par des facteurs tels que le port et l'oued Ain Sefra (Yamani, 2014).



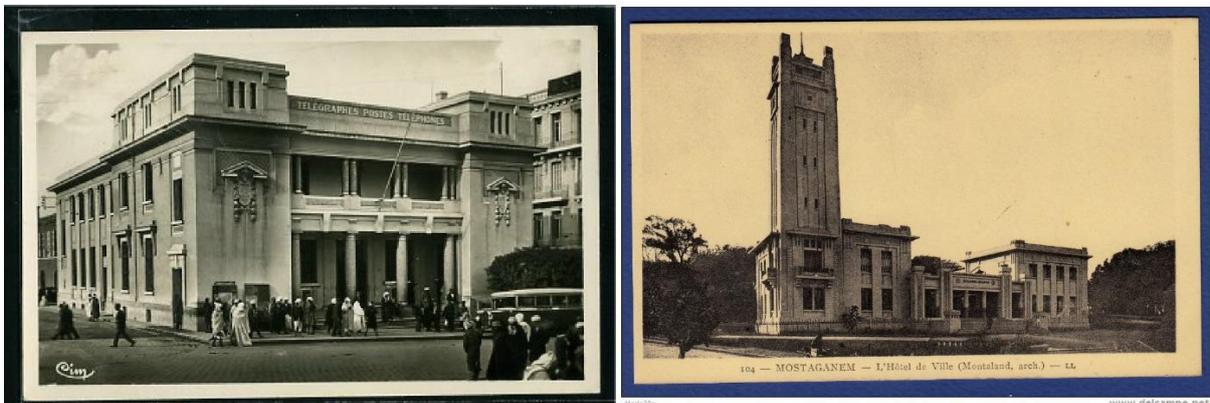
Figure IV. 8 : évolution de la ville coloniale. Source : (Yamani, 2014).

Selon Benyagoub (2011), deux tissus urbains peuvent être distingués correspondant à deux périodes d'urbanisation française :

- Le premier tissu urbain de Mostaganem est caractérisé par les principes de la ville classique, avec une composition urbaine marquée par des rues larges qui se croisent pour former des places centrales, bordées d'immeubles d'habitat

collectif dont le rez-de-chaussée est souvent occupé par des activités commerciales. Cette partie de la ville correspond au centre-ville, qui est actuellement surpeuplé et en état délabré. Ce tissu comprend également les anciennes casernes militaires construites par les Français pendant leur première période d'occupation (1833-1848), ainsi que la gare située au sud-est et quelques petites entreprises de tannerie et de moulins sur la rive gauche de l'Oued Ain-Sefra (L. Yamani, 1991).

- Le second tissu urbain se réfère aux extensions spatiales qui ont été réalisées durant la période de 1910 à 1959, caractérisé par l'expansion économique de la ville de Mostaganem, notamment avec l'essor de la viticulture<sup>4</sup>. Durant cette période, plusieurs infrastructures ont été construites, notamment l'hôtel de ville (*Figure IV. 7*), la poste (*Figure IV. 8*) et d'autres édifices à caractère administratif, donnant naissance à de nouveaux quartiers situés en périphérie du centre-ville, tel que Mon plaisir à l'Est et Salamandre au Nord-Ouest. De plus, ces extensions ont permis la jonction de quartiers préexistants, tels que Beymouth, Saint-Jules et Raisinville. D'autres projets, tels que la construction d'HLM à Raisinville, Beymouth et à l'extrémité Sud-Est de la ville, ont été mis en œuvre dans le cadre du grand programme du plan de Constantine, conçu selon les principes du mouvement fonctionnaliste qui prédominaient en Europe à cette époque.



**Figure IV. 9 :** A gauche la grande poste de Mostaganem, à droite l'hôtel de ville. **Source :** (Delcampe - la marketplace des collectionneurs, 2005).

Enfin, au cours des dernières années de la colonisation, des quartiers de bidonvilles se sont développés à proximité de Monplaisir, El-Arsa et Tijditt, pour accueillir la population

<sup>4</sup> Selon de ROBERT c'est la culture de la vigne. **URL :** <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/viticulture>

algérienne issue de l'exode rural massif. Cette situation a entraîné l'apparition de grandes zones d'habitat précaire autour de l'agglomération.

Les différents tissus européens qui se sont juxtaposés en adoptant, en général, le même type d'urbanisme définissent les lignes de croissance radioconcentrique de la ville après l'indépendance. C'est ainsi que l'urbanisation s'est déployée selon trois axes principaux reliant Mostaganem à Oran à l'ouest, Relizane au sud et Ténès à l'est.

### II.5.3 La ville postcoloniale

Après l'indépendance, le tissu urbain de la ville est devenu éclaté et discontinu, résultant d'une série de programmes d'urgence qui ont été ajoutés aux marges des quartiers existants, sans considération pour une utilisation rationnelle du sol. Cette politique a entraîné une rupture et une fragmentation architecturale et urbaine à l'échelle spatiale (Benyagoub, 2011).

L'observation de la ville actuelle montre la modification de la forme radioconcentrique adoptée pendant la colonisation en un étalement linéaire dû à l'existence de terrain plat le long des axes routiers. La ville s'évolue selon trois directions :

- Une direction sud et sud-ouest :
  - Atteignant Salamandre au sud-ouest avec de grands équipements symbolisant le pouvoir administratif tel que le tribunal, le siège de la wilaya, aussi des programmes d'habitat, semi-collectif de haut standing et collectif de type LSP. Cette zone subit actuellement une densification abusive en termes d'habitat collectif implanté à côté de l'habitat individuel existant.
  - Mazagran vers le sud, cette zone comprenant l'habitat collectif sur des poches urbaines aux limites de la commune, elle a bénéficié d'un programme de 260 logements en location-vente type AADL en 2001.
- Une urbanisation dirigée vers kharrouba au nord : deux grandes zones urbaines linéaires traversées par la route nationale 11, les deux abritent : des équipements de différentes catégories (des cités universitaires, une université, une sûreté urbaine, une école de la protection civile et un hôpital) et des logements type collectifs promotionnels, LSP, semi-collectif, ZHUN.
- Une direction est et nord est : caractérisée par deux zones en cours d'urbanisation importantes :
  - Un Pôle urbain de 170 ha à El-Hchem comportant 6 286 Logements collectifs, dont 1500 types AADL.

- Une zone urbaine qui déborde sur la commune de Sayada (Sidi Othmane) à partir de 2010 à travers la réalisation de logements types LSP et LPL.



**Figure IV. 90** : les ZHUNs de Mostaganem (cité 5 juillet). **Source** : (Mouaz, 2019).



**Figure IV. 101** : programme AADL de 1000 logements à Sayyada. **Source** : (BETS - Bureau d'Études techniques SALHI, 2016).

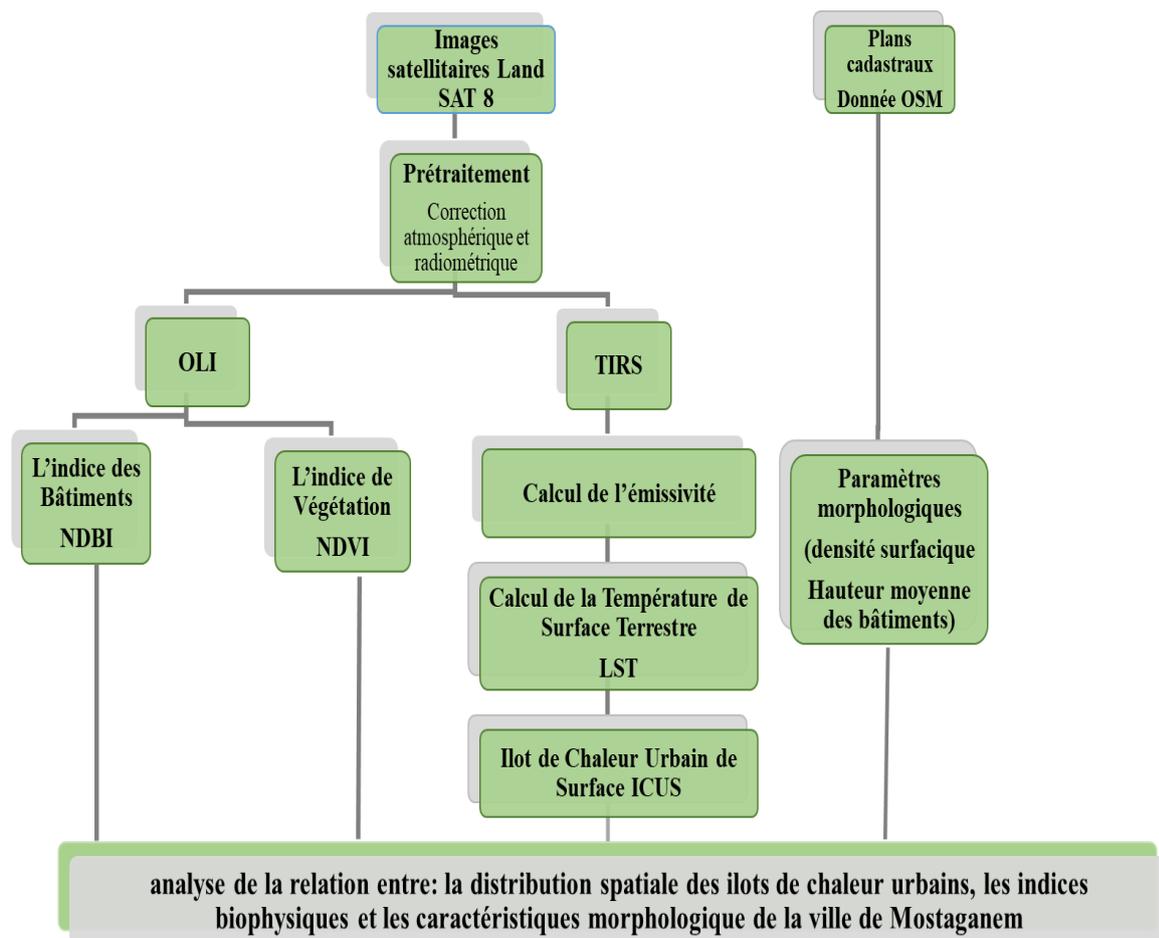
L.YAMANI et K.BRAHIMI soulignent que : « *La transformation du paysage urbain de Mostaganem passe par une forme compacte parfaitement liée à celle de l'Oued, à une forme éclatée faite de ruptures et de discontinuités morphologiques* ». En conséquence, l'image de la périphérie urbaine est caractérisée par une forme éclatée et discontinue, marquée par des bâtiments dispersés séparés par des espaces vides, ce qui complique davantage la reconnaissance des lieux et la lisibilité urbaine.

Par conséquent, le développement de la ville est le résultat de la prolifération des programmes d'habitat sous toutes ses formes, qui s'est traduite par des extensions périphériques étalées, de faible densité (Coefficient d'emprise au sol moyen égal à 0,17 pour l'habitat collectif, et 0,6 pour l'habitat individuel), consommant de vastes espaces et caractérisé par une fragmentation avec le tissu colonial, tant au niveau architectural qu'au niveau urbanistique. (Benyagoub, 2011).

Les chercheurs précédemment mentionnés ont concordé sur la constatation de l'hétérogénéité paysagère, de la fragmentation et de la discontinuité spatiale qui découlent des politiques d'urbanisation mises en place après l'indépendance. La section suivante de ce chapitre vise à évaluer la performance thermique des configurations urbaines existantes et à examiner l'impact des différentes décisions politiques et des programmes urbains sur les disparités microclimatiques et thermiques dans la ville de Mostaganem.

### III. Méthodologie

Dans ce premier chapitre de la deuxième partie, nous entreprendrons une étude spatiale de l'îlot de chaleur urbain pour les quatre saisons de l'année 2019. L'objectif est d'évaluer le comportement thermique de la ville et de localiser les zones de stress thermique à l'échelle mésoclimatique. Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons la télédétection, une technique qui a prouvé sa capacité à détecter la température de surface dans différents climats (Almeida et al., 2021; Kumar et al., 2021; Roustia et al., 2021). La **Figure IV. 11** illustre l'organigramme de la méthodologie adoptée dans ce chapitre.



**Figure IV. 122** : représentation schématique de la méthodologie adoptée pour analyser l'ICU à l'échelle méso. **Source** : Auteur.

#### III.1 Données

Dans cette étude, quatre images satellitaires de Landsat 8 OLI/TIRS ont été sélectionnées pour effectuer une analyse du phénomène d'îlot de chaleur urbain dans la ville de Mostaganem. Les images choisies sont des produits de niveau L1T1<sup>5</sup> et ont été capturées dans

<sup>5</sup> Pour plus de détail : consultez le lien suivant : <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>

des conditions atmosphériques transparentes avec une couverture nuageuse de moins de 10%. Les images ont été gratuitement téléchargées à partir du site USGS et elles représentent les quatre saisons de l'année 2019.

**Tableau IV. 1** : caractéristiques des images satellitaires de Landsat 8. **Source** : Auteur.

Date	Heure	Couverture nuageuse	Résolution spatiale	Élévation du soleil
02/01/2019	10:38:06	0.19	30*30	27.50612106°
16/03/2019	10:31:38	0.01	30*30	46.44428771°
29/07/2019	10:38:16	1.28	30*30	63.70376264°
17/10/2019	10:38:37	0.05	30*30	41.93346016°

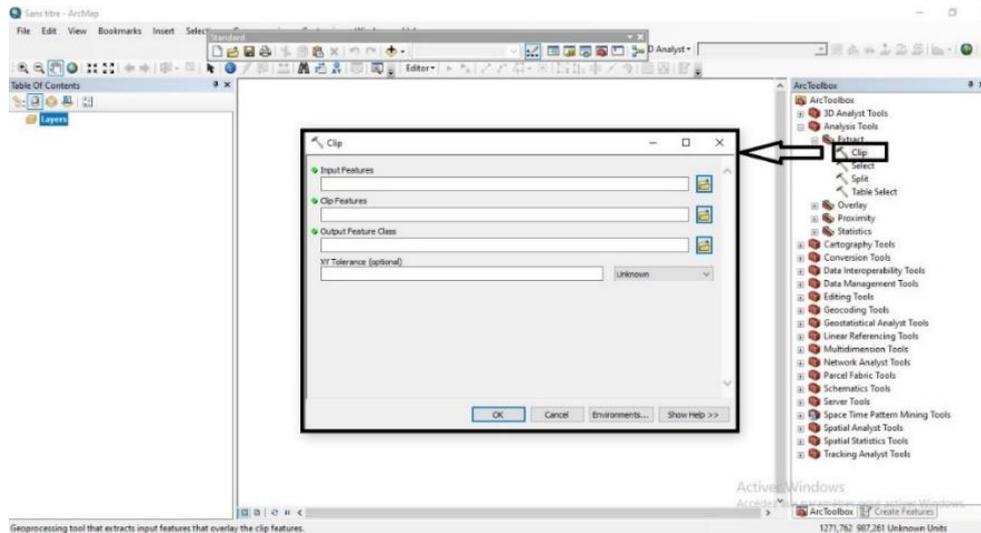
Nous avons utilisé le logiciel ArcGIS pour calculer et cartographier l'îlot de chaleur urbain de surface dans la ville de Mostaganem. Ce logiciel est largement utilisé pour l'analyse spatiale et la cartographie, ce qui en fait un outil approprié pour notre étude. Les images utilisées sont décrites dans le **Tableau IV. 1**. Nous avons pris en compte des facteurs tels que la date d'acquisition de l'image, la bande spectrale utilisée, la résolution spatiale, la qualité de l'image et la couverture nuageuse pour garantir la fiabilité et la précision de nos résultats.

### III.2 Étapes de l'extraction de la température de surface LST

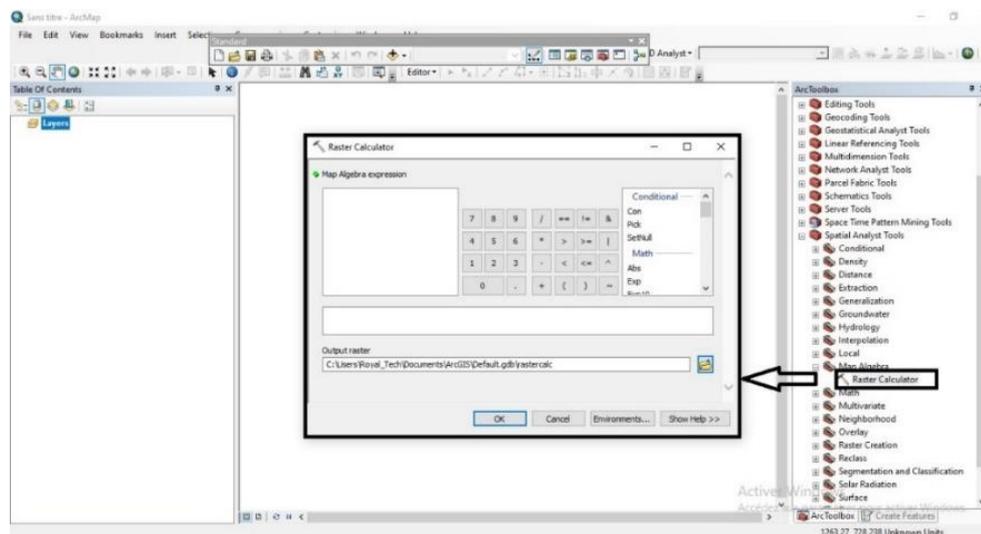
Nous avons procédé à la segmentation des images satellitaires en utilisant le fichier SHAPEFILE de la commune de Mostaganem, à l'aide de la commande CLIP disponible dans le menu ARCTOOLBOX du logiciel ArcGIS (voir **Figure IV. 13**). Cette approche nous a permis de découper les images selon les frontières administratives de la ville.

Par la suite, nous avons employé l'outil RASTER CALCULATOR (voir **Figure IV. 14**) afin d'effectuer les calculs requis pour extraire les valeurs de la température de surface (LST), de l'indice de l'îlot de chaleur urbain de surface (ICUS), ainsi que des indices biophysiques, à l'intérieur des limites de la commune.

En superposant cartographiquement les résultats de ces calculs sur la zone d'étude, comprenant à la fois la zone urbaine et une zone non construite au nord, nous avons pu observer et comparer les températures entre la ville et sa périphérie. Cette méthode nous a permis d'analyser les disparités thermiques et de déterminer la présence de l'îlot de chaleur urbain de surface dans la ville de Mostaganem.



**Figure IV. 133** : la commande CLIP pour couper les rasters selon un shapefile donné. *Source* : Auteur.



**Figure IV. 144** : l'outil calculateur des rasters pour éditer les équations sur Arcgis. *Source* : Auteur.

### III.2.1 Le prétraitement / correction atmosphérique et radiométrique

Cette étape vise à réaliser une correction atmosphérique et radiométrique afin d'éliminer les erreurs attribuables aux conditions atmosphériques et à la position relative au soleil. Pour ce faire, les données de niveau L1T1 de Landsat 8 peuvent être recalibrées en fonction de la réflectance et/ou de la radiance au sommet de l'atmosphère (TOA) à l'aide des coefficients de recalibrage radiométrique fournis dans le fichier de métadonnées (MTL.txt) accompagnant le produit de niveau L1T1 de Landsat 8. Le fichier MTL contient également les constantes thermiques nécessaires pour convertir les données de la bande thermique en température de luminosité (BT).

*III.2.1.1 Conversion en réflectance TOA*

Les DN des bandes réfléchissantes (OLI) peuvent être converties en réflectance TOA en utilisant les coefficients de redimensionnement dans le fichier MTL :

$$\rho_{\lambda} = M_p \times Q_{cal} + A_p \quad (IV.1)$$

Où :

$\rho_{\lambda}$  : la réflectance planétaire TOA, sans correction pour l'angle solaire.

$M_p$  : le facteur de redimensionnement multiplicatif propre à la bande à partir des métadonnées (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, où x est le numéro de bande)

$A_p$  : le facteur de redimensionnement additif propre à la bande à partir des métadonnées (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x, où x est le numéro de bande)

$Q_{cal}$  : la valeur de pixel standard du produit (DN) quantifiée et étalonnée

*III.2.1.2 La correction pour l'angle du soleil pour la réflectance TOA :*

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta_{SE})} \quad (IV.2)$$

Où :

$\rho_{\lambda}$  : la réflectance planétaire TOA avec correction pour l'angle solaire.

$\theta_{SE}$  : l'angle d'élévation du soleil local. L'angle d'élévation du soleil du centre de la scène en degrés est fourni dans les métadonnées (SUN\_ELEVATION).

*III.2.1.3 Conversion en Radiance TOA*

La valeur numérique de la bande thermique 10 a été convertie en rayonnement au capteur, à l'aide de l'équation (IV.3) (Chander & Markham, 2003).

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (IV.3)$$

Où :

$L_{\lambda}$  : le rayonnement spectral au capteur (Watts/(m<sup>2</sup>×srad×µm) (Rasul, 2016).

$M_L$ : le facteur de redimensionnement propre à chaque bande à partir des métadonnées (RADIANCE\_MULT\_BAND\_x, où x est le numéro de bande)

$A_L$  : le facteur de redimensionnement ajouté à chaque bande à partir des métadonnées (RADIANCE\_ADD\_BAND\_x, où x est le numéro de bande)

$Q_{cal}$  : le nombre numérique d'un pixel donné DN

Ces valeurs ont ensuite été converties en température de surface radiante avec l'équation (IV.4)

$$TB = \frac{K2}{\log\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (IV.4)$$

Où

TB : la température de surface radiante en Kelvin

$k_1 = 774,89$  et  $k_2 = 1321,08$  sont des constantes d'étalonnage à partir des métadonnées.

### III.2.2 Calcul de la température de surface LST

#### III.2.3 Calcul de l'émissivité

Une correction de l'émissivité est nécessaire pour calculer avec précision la LST à partir de l'imagerie satellitaire (Srivastava et al., 2009). La méthode choisie consiste à calculer l'émissivité sur la base de l'indice de végétation NDVI selon l'équation (IV.5).

$$\varepsilon = 0.004P_V + 0.98 \quad (IV.5)$$

Où :

$$P_V = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})^2} \quad (IV.6)$$

Où :

NDVI : l'indice de végétation donné par l'équation (IV.8), dérivé à l'aide des bandes optiques 4 et 5 du satellite Landsat 8 (Rouse et al., 1973).

Et finalement la température de surface est calculée selon l'équation (IV.7) (Estoque et al., 2017).

$$LST = \frac{TB}{\left(1 + \left(\frac{\lambda TB}{\rho}\right) \ln \varepsilon\right)} - 273 \quad (IV.7)$$

Où

LST : la température de la surface terrestre (en degré Celsius)

TB : la température de surface radiante (en Kelvin)

$\lambda$  : la longueur d'onde de la radiance émise de la bande 10 (11,5  $\mu\text{m}$ )

$$\rho = 1,438 * 10^2 \text{ m K.}$$

### III.3 Identification des îlots de chaleur urbains

L'îlot de chaleur urbain peut être défini comme étant la différence de température entre la ville et sa périphérie. Afin de détecter la présence de l'îlot de chaleur urbain, plusieurs chercheurs ont créé des zones tampons autour de leurs zones d'étude et ont mesuré l'intensité des ICUs en comparant la température moyenne de ces zones tampons et la température moyenne des zones étudiées (Hamoodi, 2018; Madanian et al., 2018; A. Rasul et al., 2016; Zhao et al., 2021). Étant donné que la ville de Mostaganem est une ville côtière, la brise de la mer<sup>6</sup> peut avoir un effet rafraichissant sur les zones côtières, et donc la création d'une zone tampon autour de la ville permet d'avoir des zones non équilibrées en termes d'influence de brises thermiques. Dans cette étude, nous avons adopté une méthode de classification de la LST basée sur l'écart type  $\sigma$ , qui est décrite en détail dans le **Tableau IV.2.** (dos Santos et al., 2017; Wei & Wang, 2022; Zhou et al., 2022)

Cette méthode permet de diviser les valeurs de LST en classes sur la base de l'écart type  $\sigma$  et la température de surface moyenne, ce qui permet de quantifier l'hétérogénéité spatiale des températures de surface. En utilisant cette méthode, les zones avec des valeurs de LST similaires peuvent être regroupées, permettant ainsi une meilleure analyse des modèles de température et des îlots de chaleur urbains.

**Tableau IV. 2 :** les classes de température de surface. *Source :* Auteur.

Les classes de température de surface (LST)	Plage de Température
Haute Température (ICUS)	$T \geq T_m + \sigma / 2$
Moyenne Température	$T_m + \sigma / 2 \geq T \geq T_m + \sigma / 4$
Basse Température (IFUS)	$T \leq T_m + \sigma / 4$

Où :

T : la température de chaque pixel (°C).

T<sub>m</sub> : la température moyenne générale (°C).

<sup>6</sup> Pendant le jour l'air au-dessus des terres s'échauffe plus que sur les surfaces d'eau situées à la même latitude. L'air plus chaud s'élève et l'air plus froid s'écoule vers la terre. La nuit le processus est inversé. Les vents générés de cette manière sont appelés des « brises ». Comme la différence de température entre la terre et la mer est plus grande dans la journée que la nuit, la brise de mer sur la terre est plus forte que la brise de terre vers la mer. (Givoni, 1978). Consultez les travaux de Salem Dahech pour plus d'information sur l'impact des brises sur les îlots de chaleur urbains.

$\sigma$  : l'écart type des données de température de surface (°C).

La classification de la température de surface LST en classes est une étape importante dans cette recherche pour étudier les îlots de chaleur urbains. Les valeurs de LST sont regroupées en classes avec des températures minimales, moyennes et maximales. La première classe correspond aux zones avec les températures les plus basses et où l'on observe l'existence d'un îlot de fraîcheur urbain de surface. La dernière classe représente les zones avec les températures les plus élevées et où l'on observe l'existence d'un îlot de chaleur urbain de surface. La classe moyenne regroupe les zones qui ont des conditions thermiques normales et qui ne sont pas touchées par l'effet d'îlot de chaleur urbain.

### III.4 Le calcul des indices biophysiques

#### III.4.1 L'indice de végétation NDVI

Le NDVI (Indice de végétation par différence normalisée) : est une mesure couramment utilisée pour évaluer la densité de la végétation dans les zones urbaines et pour comprendre les changements dans la santé des plantes, aussi ce paramètre est confronté généralement avec les données de la LST pour vérifier l'impact de la végétation sur l'intensité des ICUs et de développer des stratégies d'atténuation en termes de végétation urbaine (dos Santos et al., 2017; Ghaleb et al., 2015; Malik et al., 2019; A. Rasul et al., 2016; Traore et al., 2021). Cet indice est calculé comme étant le rapport entre la bande rouge (R) et proche infrarouge (NIR) comme indiqué dans l'équation **IV.8**. L'indice NDVI permet de quantifier la quantité de chlorophylle présente dans les plantes, ce qui peut aider à identifier les zones à forte densité de végétation. Le calcul de l'NDVI est primordial pour le calcul de l'émissivité.

$$NDVI = \frac{(Bande5 - Bande4)}{(Bande5 + Bande4)} \quad (IV.8)$$

Dans la plupart des cas, les valeurs du NDVI sont comprises entre 0.2 et 0.4 correspondent à des zones végétales clairsemées, la végétation modérée tend à varier entre 0.4 et 0.6 et toutes les valeurs qui dépassent 0.6 indiquent une forte densité de feuilles vertes.

#### III.4.2 L'indice de bâtiment NDBI

(Zha et al. 2003) ont proposé l'indice du bâtiment NDBI comme indicateur sensible aux zones bâties. Ils ont utilisé cet indice pour cartographier le bâti de la ville de Nanjing à l'est de la chine avec un climat subtropical. Un indice qui mesure la quantité de lumière réfléchiée par les surfaces imperméables telles que les bâtiments, les routes et les autres structures artificielles.

Calculé à partir des données de réflectance des bandes infrarouges et proches infrarouges des images satellitaires selon l'équation **IV.9**. Les valeurs de NDBI varient généralement entre -1 et 1, les valeurs les plus élevées indiquent une plus grande quantité de surfaces imperméables.

$$NDBI = \frac{(Bande6 - Bbande5)}{(Bande6 + Bande5)} \quad (IV.9)$$

Notez que les valeurs NDBI varient en fonction des conditions atmosphériques, de l'heure de la journée et de la saison, et peuvent être affectées par d'autres facteurs tels que la texture du sol. Il est donc important de considérer ces facteurs lors de l'interprétation des images NDBI. Cet indice est souvent utilisé pour examiner l'effet de l'urbanisation sur la température de surface LST (dos Santos et al., 2017; Malik et al., 2019; Traore et al., 2021).

Il est pertinent de souligner qu'il existe d'autres indices fréquemment étudiés lors de la cartographie de la température de surface (LST) et des îlots de chaleur urbains. Parmi ces indices, le NDWI (indice de l'eau par différence normalisée) (Bala et al., 2018; Guha et al., 2021), le NDLI (indice de différence normalisée de chaleur latente) (Liou et al., 2019; Traore et al., 2021) et le NMDI (indice de sécheresse multi-bandes normalisé) (Guha et al., 2021; Wang et al., 2020) sont particulièrement utilisés. Dans le cadre de ce chapitre, l'objectif est de caractériser l'îlot de chaleur urbain et de sélectionner les paramètres qui peuvent influencer son comportement. Ces deux indices (NDVI et NDBI) ont été choisis en raison de leur utilisation répandue dans la littérature scientifique.

### III.5 Calcul des paramètres morphologies à l'échelle de la ville

Nous avons choisi de calculer les paramètres morphologiques pour douze quartiers sélectionnés au hasard, situés dans les trois classes de température de surface. Des études antérieures ont identifié plusieurs paramètres qui peuvent affecter l'îlot de chaleur urbain, nous avons donc sélectionné deux indices biophysiques (NDVI et NDBI), ainsi que la densité surfacique et la hauteur moyenne des bâtiments comme paramètres morphologiques pour évaluer leur impact à l'échelle méso.

En utilisant ces paramètres, nous avons pu évaluer l'impact des caractéristiques morphologiques des quartiers sur la formation et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. Bien que nous ayons calculé ces paramètres pour un nombre limité de quartiers, leur sélection a été faite de manière aléatoire et dans les trois classes de température de surface, ce qui permet une bonne représentativité de l'ensemble de la ville. Les résultats obtenus peuvent donc être extrapolés à l'ensemble de la ville de Mostaganem.

## IV. Résultats

Cette troisième section présente les résultats de la méthodologie décrite précédemment, qui consiste à utiliser la télédétection pour mesurer et cartographier la température de surface terrestre (LST), l'îlot de chaleur urbain de surface (ICUS) ainsi que les indices biophysiques NDVI et NDBI. En outre, une analyse de la morphologie urbaine est également pertinente pour établir la relation entre le comportement thermique de la ville et sa morphologie urbaine à une échelle mésoclimatique.

### IV.1 Distribution spatiale de la température de surface (LST)

Les cartes de température de surface LST extraites pour les quatre dates ont été utilisées pour examiner la variation spatiale et saisonnière de la température de surface sur la ville de Mostaganem. La **Figure IV.15** montre la température de surface extraite à 10 :30h. La méthode adoptée classe la température en trois catégories selon son intensité comme suit :

Classe 1 : faible température (îlot de fraîcheur urbain)

Classe 2 : moyenne température

Classe 3 : forte température (îlot de chaleur urbain)

La distribution spatiale de la LST montre une variation significative au sein de la ville entre les quatre saisons, les températures sont entre 7.64°C et 19.68°C en janvier, entre 17.84°C et 32.04°C en Mars, entre 25.30 °C et 39.05°C en juillet et entre 20.17°C et 31.10°C en octobre.

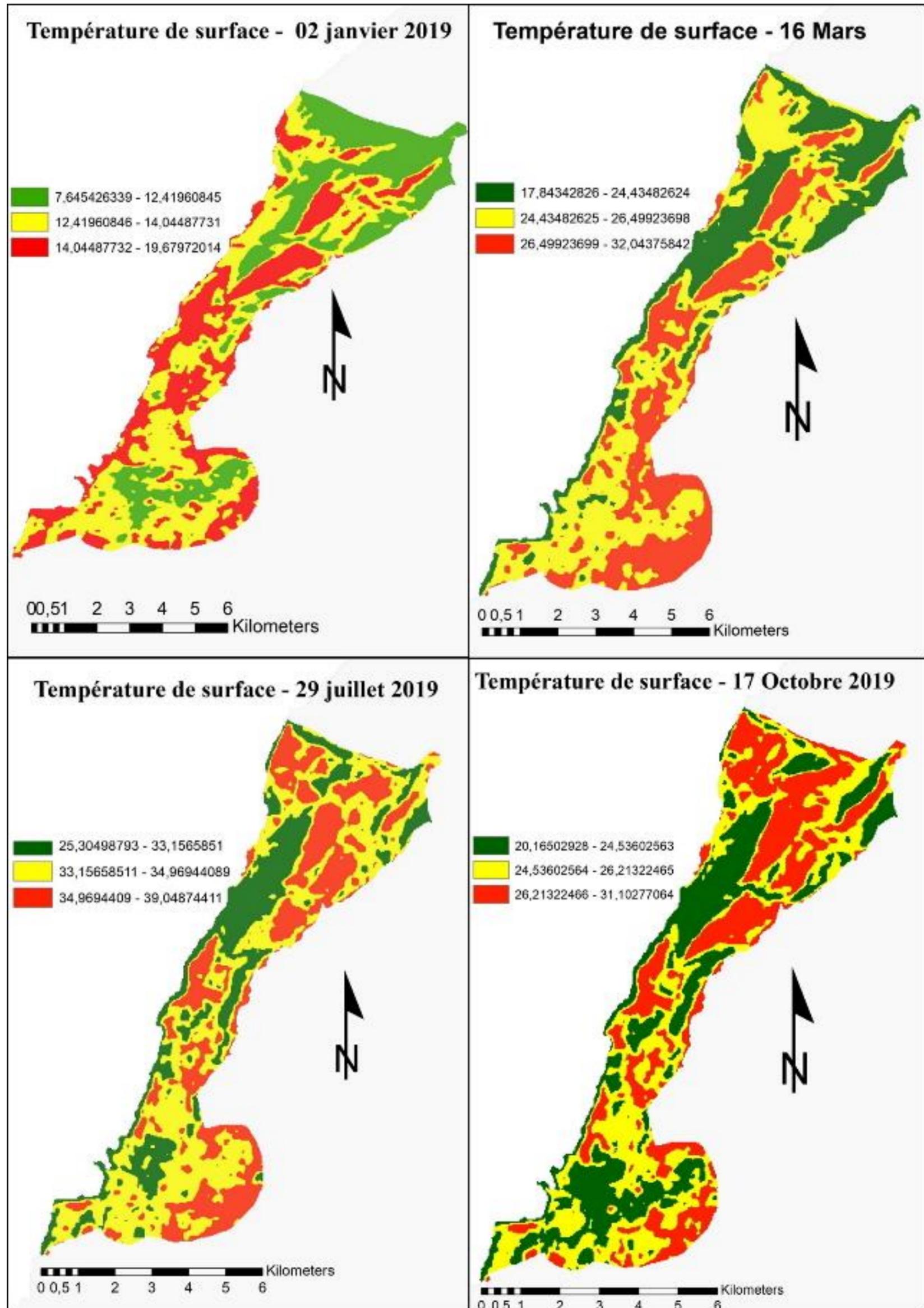


Figure IV. 155 : distribution spatiale de la température de surface pour janvier, mars, juillet et octobre. Source : Auteur

**La carte de janvier** : révèle les températures les plus basses parmi les quatre dates étudiées. Les nouvelles extensions de la ville génèrent des îlots de chaleur urbains, tels que Kharouba (+1,5°C), la cité el Houria (+1°C), Salamandre (+1,5°C), Chemmouma (+1°C), l'extérieur de la ville aussi montre l'existence des îlots de chaleur de plus de 4°C. Les zones ayant les températures les plus basses (-0,5°C) correspondent à l'existence d'un îlot de fraîcheur important se situent dans le centre colonial et à l'est de la ville vers le quartier Mon Plaisir. Pour le reste de la ville, les températures de surface sont moyennes, avec une fourchette allant de 12,42°C à 14,04°C.

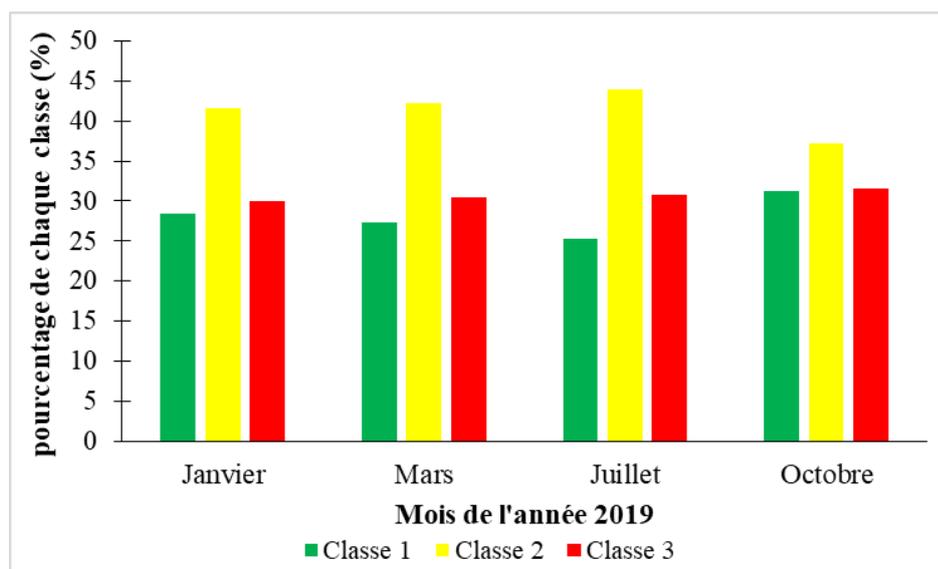
**Carte du 16 mars** : Les valeurs élevées de température coïncident avec la présence d'un îlot de chaleur urbain (+3,56°C) se localisent dans les nouvelles extensions de la ville vers le nord, l'est et le sud-ouest, telles que Kharrouba, la cité 5 juillet, la cité El Houria et Chemmouma. En revanche, un îlot de fraîcheur urbain est observé au centre-ville dans le quartier Derb Tobbana, ainsi qu'à l'extension nord de la ville dans Diar El Hanna et à Salamandre. La majorité de ces zones de classe 01 se trouvent au nord de la carte, en dehors de la ville. Le reste de la ville montre des températures moyennes.

**La Carte du 29 juillet** : présente les températures maximales enregistrées entre les quatre dates, avec une fourchette allant de 25,30°C à 39,05°C. Cette carte révèle la présence d'un îlot de fraîcheur urbain important (-1,5°C) dans le centre-ville colonial. Cependant. Les zones situées dans la ville postcoloniale telle que Kharrouba, la cité 5 juillet, la cité El Houria et Chemmouma affichent des températures élevées (plus de 2°C).

**La carte du 17 octobre** : met en évidence la présence d'un îlot de fraîcheur urbain important dans la ville étudiée (-2°C), qui est le plus marqué entre les quatre dates examinées dans les quartiers de la ville précoloniale et coloniale, cet îlot de fraîcheur s'étend sur une plus grande partie de la ville, notamment dans les quartiers de Beymout, mon Plaisir et Pépinière, ainsi qu'une partie de Salamandre. En revanche, les températures élevées enregistrées à l'intérieur de la ville sont principalement concentrées dans le nouveau tissu urbain et les terres nues (la Cité al Houria (+1,2°C), la Cité 5 juillet (+1,7°C) et Kharrouba (+0,5°C)).

Les quatre cartes montrent également la présence de zones chaudes correspondant au terrain de sport artificiel et à la zone industrielle.

La **Figure IV.16** montre le pourcentage de chaque classe de température dans la zone étudiée pour les quatre dates sélectionnées.



**Figure IV. 16** : pourcentage de chaque classe de température de surface. *Source* : Auteur.

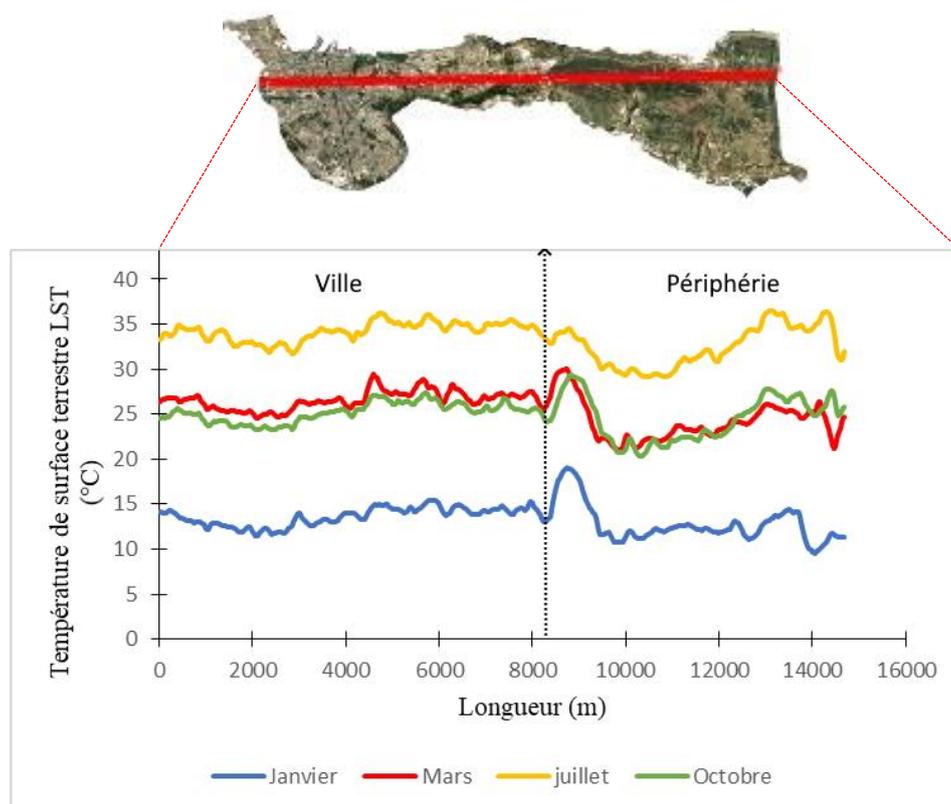
Les résultats montrent que les zones à basse température occupent 28,35% en janvier, 27,28% en mars, 25,28% en juillet et 31,24% en octobre de la surface totale du périmètre étudié, principalement situées dans le centre colonial et dans les zones considérées comme végétalisées. Les zones à moyenne température, quant à elles, représentent la plus grande partie de la ville (41,62% en janvier, 42,22% en mars, 37,16% en juillet et 44% en octobre), et se trouvent dans les zones bâties à moyenne densité. Enfin, les zones à haute température, qui indiquent la présence d'un îlot de chaleur urbain, occupent 30,03% en janvier, 30,50% en mars, 30,72% en juillet et 31,6% en octobre de la surface totale de la commune, principalement situées dans les sols nus.

Les quatre dates révèlent une distribution inégale de la chaleur dans la ville. Les nouvelles extensions semblent être les plus touchées par l'effet d'îlot de chaleur urbain, avec des températures de surface considérablement plus élevées que celles des zones plus anciennes de la ville.

#### **IV.2 Variation de la température de surface (LST) et de l'îlot de chaleur urbain de surface entre la ville et sa périphérie**

La **Figure IV.17** représente le profil de la température de surface (LST) pour les quatre mois sélectionnés de l'année 2019, à savoir janvier, mars, juillet et octobre, obtenu en faisant une coupe longitudinale sur les cartes de température (**Figure IV.15**).

L'analyse de la variation de la température en ville montre une légère différence de 2°C entre la ville et sa périphérie pour janvier et juillet, tandis que la variation est plus remarquable en mars et en octobre, où elle peut atteindre 4°C. En revanche, l'analyse des terres situées à l'extérieur de la ville, qui présentent une hétérogénéité de couverture végétale, de zones nues, de roches...etc., révèle des différences plus significatives de température, avec une fluctuation peut atteindre un écart maximal de 10°C entre la température maximale et minimale (en janvier).



**Figure IV. 17 :** profil en long des températures de surface. *Source :* Auteur.

Le mois de janvier est le plus froid avec des températures minimales peuvent atteindre 11.2°C. La moyenne des températures à l'extérieur de la ville est inférieure à celle de la ville, pour ce moi l'îlot de chaleur urbain est remarquable et ça peut être observé sur la carte des températures de surface (**Figure IV.15**).

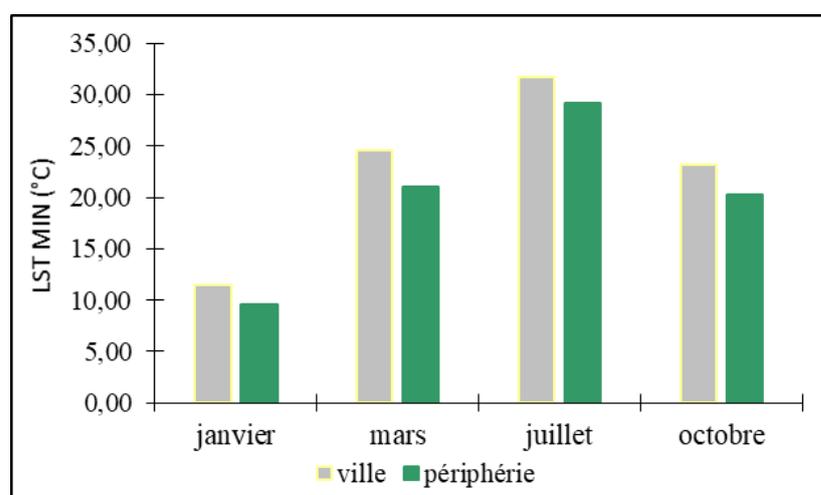
Les températures les plus élevées sont observées en juillet, avec un pic de température de 36°C. La variation de la température de surface est importante en périphérie de la ville, avec un écart de 7,4°C entre la température de surface maximale et minimale. À l'intérieur de la ville, l'écart de température de surface est moins important, de l'ordre de 4,5°C.

Les courbes de température de surface pour les mois de mars et octobre présentent une tendance similaire, avec une légère augmentation de la température de surface dans la ville pour le mois de mars dû à la végétalisation des poches libres. L'écart de température de surface en ville est de 5°C en mars et de 4°C en octobre. En revanche, l'écart de température de surface en périphérie est plus important, atteignant 9,5°C en mars et 10°C en octobre.

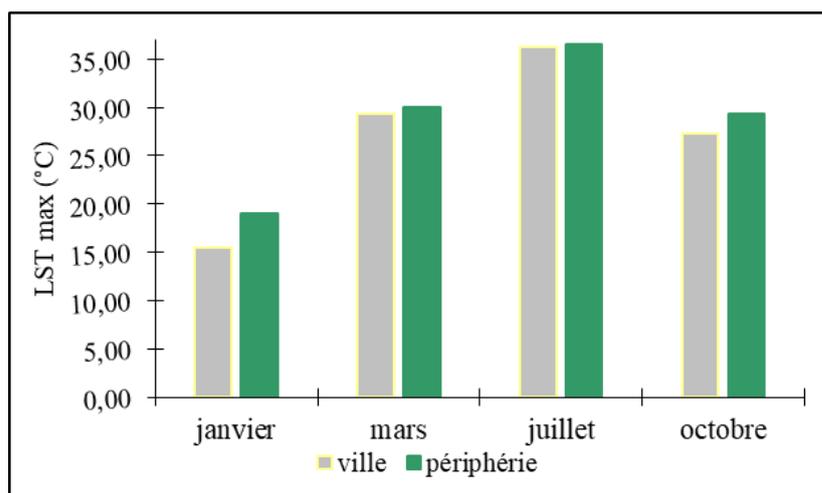
Ces résultats mettent en évidence la forte variabilité de la température de surface à Mostaganem, avec des différences significatives entre les zones périphériques et urbaines de la ville. Le mois de juillet présente les températures de surface les plus élevées, tandis que les courbes de température de surface pour les mois de mars et octobre suivent une tendance similaire.

Les températures minimales, maximales et moyennes entre la ville et la périphérie sont présentées dans les **Figures IV.18, IV.19 et IV.20**.

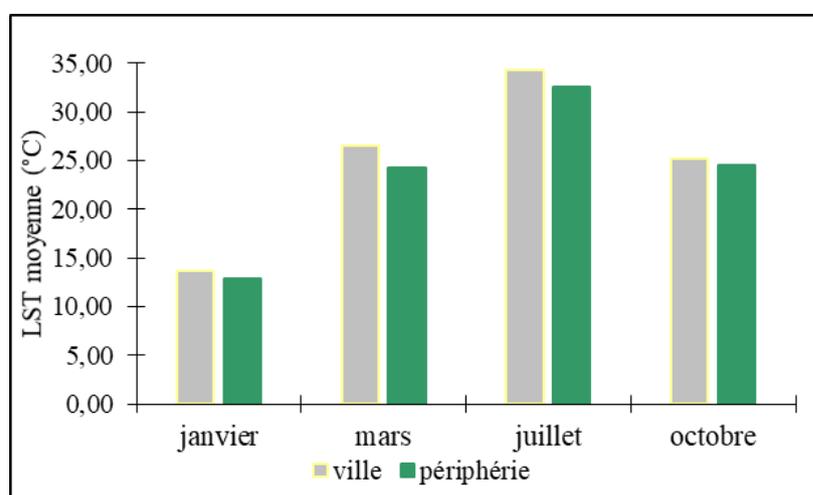
Les résultats montrent que pour chaque date examinée, les températures de surface minimales sont plus élevées en ville qu'en périphérie, avec des écarts de  $\Delta_{LST_{min}} = 2^{\circ}\text{C}$  en janvier,  $\Delta_{LST_{min}} = 4^{\circ}\text{C}$  en mars,  $\Delta_{LST_{min}} = 2.5^{\circ}\text{C}$  en juillet et  $\Delta_{LST_{min}} = 3^{\circ}\text{C}$  en octobre. En revanche, les températures de surface maximales sont plus élevées en périphérie qu'en ville, avec des différences de  $\Delta_{LST_{max}} = 3.5^{\circ}\text{C}$  en janvier,  $\Delta_{LST_{max}} = 0.65^{\circ}\text{C}$  en mars,  $\Delta_{LST_{max}} = 0.3^{\circ}\text{C}$  en juillet et  $\Delta_{LST_{max}} = 2^{\circ}\text{C}$  en octobre. En ce qui concerne les températures moyennes, elles sont plus élevées en ville qu'en périphérie, avec des différences de  $\Delta_{LST_{moyenne}} = 0.8^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta_{LST_{moyenne}} = 2^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta_{LST_{moyenne}} = 2^{\circ}\text{C}$  et  $\Delta_{LST_{moyenne}} = 0.7^{\circ}\text{C}$  pour janvier, mars, juillet et octobre respectivement.



**Figure IV. 18 :** Température de surface LST minimale entre ville et périphérie pour les quatre saisons de l'année 2019. *Source :* Auteur.



**Figure IV. 19 :** Température de surface LST maximale entre ville et périphérie pour les quatre saisons de l'année 2019. **Source :** Auteur.



**Figure IV. 160 :** Température de surface LST moyenne entre ville et périphérie pour les quatre saisons de l'année 2019. **Source :** Auteur.

Les résultats révèlent une élévation des températures minimales et moyennes de surface en ville par rapport à la périphérie. Ces disparités témoignent de manière significative la présence d'un îlot de chaleur urbain à Mostaganem, attribuable aux changements de surface et aux conditions aérodynamiques induites par l'urbanisation. Ces facteurs ont entraîné une augmentation générale de la température de surface moyenne tout au long des quatre saisons, cette augmentation est également influencée par le climat local.

### IV.3 Interprétation des résultats des indices biophysiques NDVI et NDBI

#### IV.3.1 L'indice de végétation NDVI

La carte du NDVI a été établie pour les mêmes dates que la LST dans la ville de Mostaganem. L'indice de végétation NDVI mesure la quantité de lumière réfléchi par la végétation à l'aide des données de réflectance dans les bandes rouges et infrarouges des images satellitaires du Landsat 8.

La **Figure IV.21** montre la distribution spatiale du NDVI pour les quatre saisons. On constate que la végétation est plus abondante en janvier et mars par rapport à juillet et octobre. Cette différence est attribuable à la sécheresse et au manque de précipitations en été et en automne. Les valeurs maximales ont été observées à l'extérieur de la ville en raison de la forte couverture végétale dans ces zones (forêt).

Des valeurs élevées de NDVI ont été observées pour janvier et mars à l'intérieur de la ville, notamment dans des zones comme le cimetière de Tijdid (0,79 en hiver, 0,61 au printemps), le jardin Émir Abd El Kader (0,80 en hiver, 0,70 au printemps), Derb Tobbana (0,83 en hiver et 0,8 au printemps), la forêt à côté du quartier El Houria (0,61 au printemps et 0,77 en hiver) et la limite sud du quartier Chemmouma (0,84 en hiver et 0,80 au printemps). Toutefois, ces zones deviennent moins végétalisées en été et en automne ou non végétalisées.

#### IV.3.2 L'indice de bâtiments NDBI

La distribution spatiale du NDBI pour chaque saison est illustrée dans la **Figure IV.21**. Les valeurs du NDBI varient entre - 0.79 et 0.28 en janvier, -0.41 et 0.20 en mars, -0.39 et 0.31 en juillet et entre -0.28 et 0.20 en octobre. La carte du NDBI ne reflète pas les zones bâties, les valeurs maximales pour les quatre dates se concordent avec des zones bâties, mais aussi avec : des surfaces artificielles, la roche et les terres nues non végétalisées. Citant : le port (Salamandre) qui génère des valeurs de 0.20 en janvier, 0.12 en mars, 0.17 en juillet et 0.15 en octobre. Tandis que les valeurs minimales se coïncident avec les valeurs maximales du NDVI, citant : le quartier Derb Tobbana avec des valeurs de -0.51 en janvier, -0.24 en mars, -0.38 à juillet et -0.19 en automne et la limite sud du quartier Chemmouma avec des valeurs de l'ordre de -0.50 en janvier, -0.30 en mars, -0.30 en juillet et -0.29 en automne.

Le NDBI (Normalized Difference Built-Up Index) est un indice utilisé pour quantifier la présence de zones construites ou urbanisées en mesurant la différence de réflectance entre

les bandes infrarouge et rouge des images satellites. Dans les régions arides et semi-arides, où les surfaces nues prédominent, la faible couverture végétale se traduit par une diminution de l'absorption de la lumière infrarouge par les feuilles et les structures végétales. Les surfaces nues sont principalement constituées de sols nus ou de matériaux non végétaux tels que le sable, la roche ou le béton, qui présentent des propriétés d'absorption et de diffusion similaires pour la lumière infrarouge, conduisant ainsi à des réponses spectrales similaires.

Il est important de noter que cette observation générale peut être influencée par divers facteurs tels que la composition spécifique des surfaces, la densité de la végétation, l'utilisation des terres et les caractéristiques climatiques propres à chaque région. Par conséquent, des variations peuvent être observées en fonction de ces paramètres.

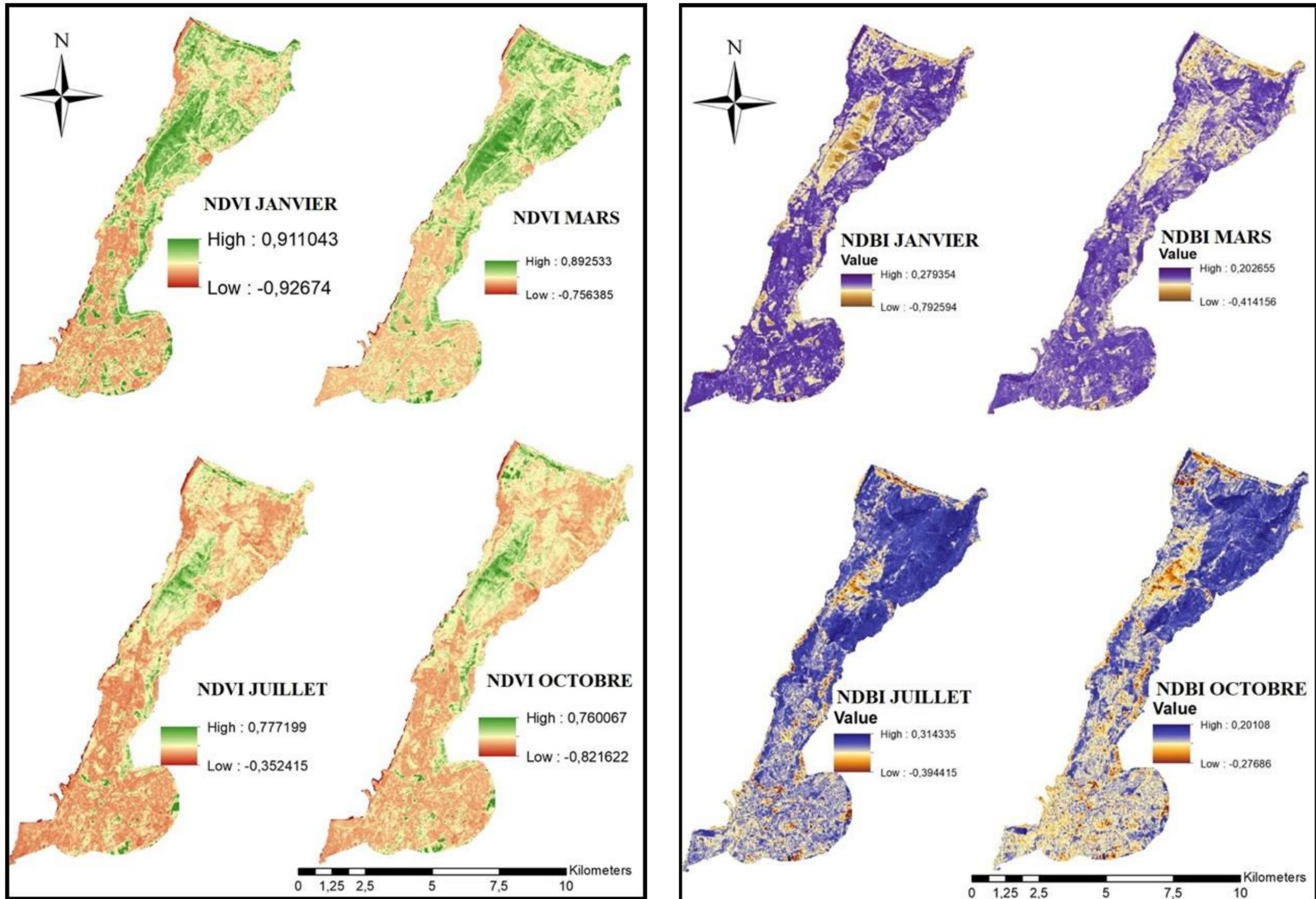


Figure IV. 171 : Variation spatiale du NDVI et NDBI sur la commune de Mostaganem pour les quatre dates choisies de l'année 2019. Source : Auteur.

L'influence des indices biophysiques sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est évaluée en calculant les moyennes du NDVI et NDBI pour chaque classe de température et d'évaluer la courbes de tendance de ces paramètres.

Les résultats présentés dans cette section concernent les courbes des valeurs moyennes de la température de surface terrestre (LST), de l'indice de végétation NDVI et de l'indice de bâti NDBI pour les quatre dates, illustrés dans la *Figure IV.21*.

La courbe de la LST suit une tendance ascendante avec un accroissement des valeurs de température moyenne, de basses à élevées. En revanche, la courbe du NDVI présente une tendance inverse avec une valeur maximale en classe 1 (à basse température), une valeur moyenne en classe 2 (à température moyenne) et une valeur minimale en classe 3 (à haute température). Cette corrélation négative entre la LST et le NDVI est expliquée par le fait que les zones à forte végétation ont tendance à engendrer des valeurs minimales de LST.

La courbe du NDBI présente une tendance similaire à celle de la LST pour les quatre dates, avec une légère variation. Les résultats indiquent que la LST augmente lorsque le NDBI augmente, ce qui suggère que l'indice de bâti a la possibilité d'augmenter la température de surface. Cette corrélation positive entre la LST et le NDBI a été confirmée par d'autres études menées dans différents climats, y compris les climats arides et semi-arides.

En résumé, ces résultats suggèrent qu'il existe une relation entre la température de surface terrestre, l'indice de végétation et l'indice de bâtiment dans la ville de Mostaganem. Les zones à forte végétation ont tendance à être plus fraîches que les zones à faible végétation, tandis que les zones urbanisées ont tendance à être plus chaudes que les zones rurales. Bien que l'indice de bâtiment NDBI n'ait pas pu décrire les zones bâties, il est corrélé positivement avec la température de surface.

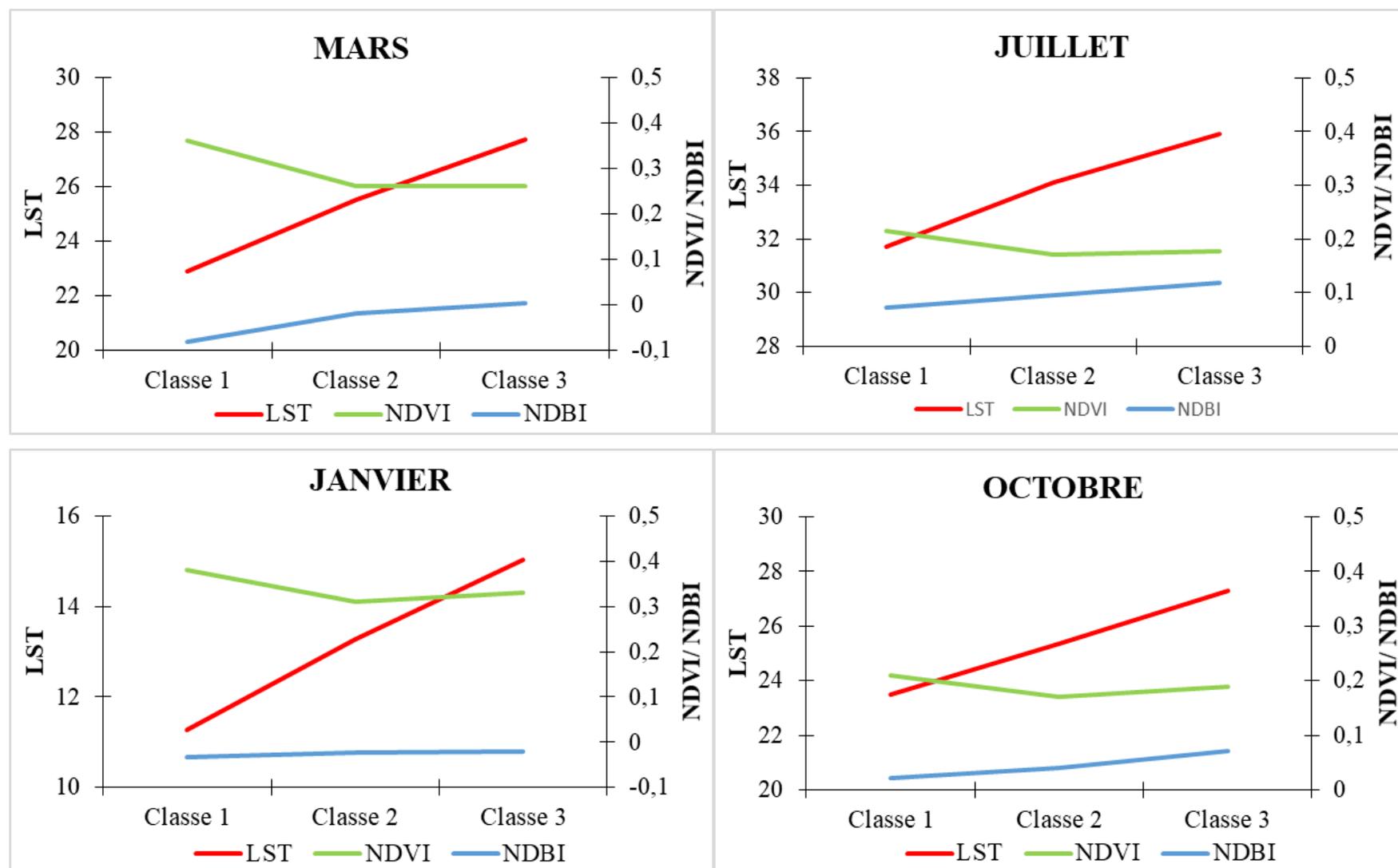


Figure IV. 182 : variation de la moyenne des LST, NDVI et NBI entre les trois classes pour les quatre saisons de l'année 2019. Source : Auteur.

#### IV.4 L'impact des paramètres morphologiques sur la LST

La ville de Mostaganem, tout comme la majorité des villes en Algérie, a suivi une tendance d'urbanisation similaire. Le centre-ville historique se caractérise par un tissu urbain organique avec des rues sinueuses et une densité de construction élevée (Tidjdit, El-Matmar). À proximité, la ville coloniale s'est développée avec un plan en damier, présentant une densité moyenne de 0,5. L'extension récente de la ville s'est développée autour du noyau ancien, conduisant à une urbanisation diffuse et à des tissus discontinus (avec une densité de construction moyenne de 0,2), mettant en évidence les ensembles résidentiels collectifs comme nouvelle forme urbaine. Cette évolution de Mostaganem reflète la dynamique générale de l'urbanisation en Algérie.

Pour analyser cette évolution, une carte de la température de surface (LST) du mois le plus chaud de l'année (juillet) a été utilisée. Quatorze quartiers ont été sélectionnés de manière aléatoire dans les trois classes de température. Le **Tableau IV.3** présente la densité de construction et la hauteur moyenne des bâtiments calculées pour chaque quartier sélectionné.

**Tableau IV. 3 :** la densité surfacique et la hauteur moyenne de quatorze quartiers sélectionnées dans les trois classes de température pour le mois de juillet. **Source :** Auteur.

Classe	Quartier	Densité	Hauteur moyenne
<b>Classe 01</b>	La cité Diar El Hana	0.61	10
	Centre-ville	0.60	16
	Salamandre	0.65	9
	Tidjdit	0.85	4.5
<b>Classe 02</b>	Mon plaisir	0.58	8
	Beymout	0.53	6
	Kharrouba (semi-collectif)	0.52	5
	Kharrouba (promotionnelle)	0.49	33
	Tidjdit (collectif)	0.21	15
	Chemmouma	0.2	17
<b>Classe 03</b>	Cité 5juillet	0.16	13.5
	Kharrouba (348)	0.14	16
	Cité El Houria	0.2	12
	Cimetière (Tidjdit)	0	0

Les résultats de la présente étude montrent que les quartiers de la **classe 1** de la ville de Mostaganem sont caractérisés par des densités élevées, allant de 0,60 à 0,85. De plus, les hauteurs moyennes des bâtiments varient selon les quartiers, étant d'environ 9 mètres pour Salamandre, 10 mètres pour Diar El Hana et 15 mètres pour le centre-ville, sauf pour Tidjdit où la hauteur moyenne des bâtiments est de 4,5 mètres. Ces quartiers sont donc considérés comme des zones à forte densité de construction et avec des hauteurs de bâtiments moyennes.

Les quartiers de la **classe 3**, quant à eux, correspondent aux zones de la ville avec les températures de surface les plus élevées. Ils sont caractérisés par des densités faibles, comme c'est le cas à Kharrouba (0,14), à la cité 5 juillet (0,16) et à la cité El Houria (0,2). Les hauteurs moyennes des bâtiments dans ces quartiers sont comprises entre 12 mètres et 16 mètres, plus élevées à celles de la **classe 1**. Ces quartiers sont donc considérés comme des zones à faible densité de construction et avec des hauteurs de bâtiments élevées.

Enfin, les quartiers de la **classe 2** présentent une densité moyenne. Parmi eux, on retrouve Mon Plaisir (densité de 0,58), Beymout (densité de 0,53) et Kharrouba (semi-collectif) (densité de 0,52), avec des hauteurs moyennes. Cependant, il convient de noter que Kharrouba (promotionnelle), Tidjdit et Chemmouma affichent des densités plus faibles, à savoir 0,49, 0,21 et 0,20 respectivement, bien que leurs hauteurs puissent atteindre des valeurs significatives, pouvant aller jusqu'à 33 mètres à Kharrouba (promotionnelle).

La densité et la hauteur moyenne des bâtiments ont été identifiées comme des paramètres importants qui influencent les températures de surface. Les quartiers caractérisés par une faible densité présentent des températures de surface élevées. Cependant, la hauteur des bâtiments ne peut pas être interprétée isolément, car elle doit être considérée en relation avec la densité. Ainsi, les quartiers de faible hauteur ne présentent pas nécessairement des températures de surface basses, à moins d'avoir une densité élevée, comme c'est le cas à Tidjdit. De même, les quartiers avec une hauteur importante ne garantissent pas nécessairement des températures de surface basses si la densité est faible, comme c'est le cas à Kharrouba. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études qui ont démontré que les paramètres morphologiques tels que la densité et la hauteur moyenne des bâtiments ont un impact sur les caractéristiques thermiques des zones urbaines (Guo et al., 2016; Yang et al., 2021). Il convient de noter que l'effet de ces paramètres morphologiques est étroitement lié à la position des bâtiments par rapport au soleil et à la hauteur solaire. L'apport de chaque paramètre ne peut pas être analysé de manière isolée, et les deux facteurs doivent être interprétés conjointement.

## V. Synthèse

Les images du satellite Landsat 8 permettent de réaliser une analyse spatiale des phénomènes étudiés. Cependant, il convient de noter que le satellite ne fournit qu'une seule image à environ 10h tous les 15 jours, contrairement à d'autres satellites tels que MODIS, qui peuvent fournir plusieurs images par jour. Cette limitation peut avoir un impact sur la précision des analyses temporelles, mais les images Landsat 8 offrent une résolution spatiale plus fine et une plus grande précision spectrale, ce qui peut être avantageux dans les études urbaines. Par conséquent, il est important de sélectionner le satellite approprié en fonction des besoins spécifiques de chaque étude.

L'écart type est un paramètre statistique qui mesure la dispersion des données par rapport à leur moyenne. Dans le cas de la classification de la LST, l'utilisation d'un tel paramètre permet de quantifier l'hétérogénéité spatiale des températures de surface. En classifiant la LST sur la base d'un tel paramètre, il est possible de diviser les valeurs en classes, ce qui facilite l'analyse des modèles de température et la détection des îlots de chaleur urbains. En regroupant les zones avec des valeurs de LST similaires, cette méthode permet de mieux comprendre la répartition spatiale des températures de surface et de fournir des informations précieuses de localisation des zones sollicitées au stress thermique.

La variation saisonnière observée de l'ICUS peut normalement être liée aux conditions climatiques saisonnières, qui dépendent de la situation géographique de chaque ville. Selon Kim et Baik (2002), les variations saisonnières des grandeurs d'ICU sont principalement associées aux différences dans les conditions météorologiques.

Prenant les limites de l'agglomération de Mostaganem, les zones chaudes se situent plus particulièrement dans les nouvelles extensions (Kharrouba, la cité 5 juillet, la cité el Houria) et ça due à la minéralisation des surfaces, la diminution du couvert végétal et le tissu urbain éclaté qui défavorise l'ombrage des espaces extérieurs. Les résultats montrent que les tissus urbains détachés avec une faible densité surfacique (entre 0 et 0.2) correspondent aux températures maximales et l'existence de l'îlot de chaleur urbain. Tandis que les zones à forte densité (entre 0.60 et 0.85) présentent des températures plus faibles.

En comparaison avec la courbe typique d'intensité de l'îlot de chaleur urbain (**Figure I.4**) qui démontre une intensité maximale au centre-ville, les courbes pour la ville de Mostaganem (**Figure IV. 19**) montrent des intensités maximales en périphérie de la ville. Cependant, les températures moyennes et minimales en ville sont plus élevées, confirmant la

présence d'un îlot de chaleur urbain significatif dans cette ville. Ces observations suggèrent que les paramètres liés à la présence du cadre bâti (ville)<sup>7</sup> peuvent influencer la distribution de la chaleur urbaine, ce qui nécessite une analyse plus approfondie pour mieux comprendre les effets de l'urbanisation sur les îlots de chaleur urbains.

Les variations entre le bilan énergétique des villes et de leur environnement non urbain sont dues à la modification des propriétés de surface. Dans les climats tempérés et subtropicaux, ces variations se manifestent par l'effet d'ICU. Cependant, dans les environnements plus arides, les modifications artificielles de l'environnement peuvent provoquer un refroidissement urbain local par rapport aux zones environnantes. D'une part, l'urbanisation peut améliorer le comportement thermique en créant des zones ombragées et en utilisant des matériaux à forte réflectivité (albédo élevé). Les zones ombragées peuvent être créées en plantant des arbres et en concevant des bâtiments de manière à réduire l'exposition directe au soleil. Les matériaux à forte réflectivité peuvent également être utilisés pour réfléchir les rayons solaires et réduire l'absorption de la chaleur. Ces stratégies peuvent réduire la LST et améliorer le confort thermique dans les zones urbaines. D'autre part, l'effet de l'urbanisation peut être négatif dans les zones fortement minéralisées avec une faible densité de bâtiments. Dans ces zones, la chaleur est absorbée et retenue par les surfaces imperméables comme le béton et le bitume, ce qui peut contribuer à une augmentation de la LST. L'absence de zones ombragées et de végétation peut également contribuer à l'intensification de la température de surface.

Renforçant le fait que les environnements construits jouent un rôle crucial dans la potentialisation de l'effet de l'ICU. Cela est justifié par le fait que les zones bâties (surfaces imperméables) ont une faible capacité de stockage de l'eau, ce qui réduit l'humidité. Selon Lu et al. (2009), cette réduction de l'humidité implique une transpiration lente de la surface de la terre et une augmentation conséquente du LST. saeda et Ça (1996) affirment que l'étanchéité du sol dans l'environnement construit influence fortement le comportement thermique de l'environnement, en particulier pour les zones recouvertes d'asphalte, qui absorbe plus de rayonnement solaire.

Les résultats de cette étude indiquent un effet d'îlot de fraîcheur urbain diurne et cette constatation diffère des autres études publiées sur l'ICU dans les régions humides et densément végétalisées (Shahmohamadi et al, 2012, Tran et al, 2006, Dhorde et Dhorde, 2012). Cependant,

---

<sup>7</sup> Dans le chapitre présent les paramètres testés sont : le NDVI, le NDBI, la densité surfacique du bâti et la hauteur moyenne des bâtiments.

ces données confirment les résultats d'études antérieures dans des régions géographiques semblables qui ont mis en évidence la présence d'un effet diurne d'îlot de fraîcheur urbain dans les climats arides ou semi-arides (Frey et al, 2006, Li et al, 2011, Abdullah, 2012, Rasul, 2016). Dans l'analyse de corrélation, les résultats ont montré une influence positive du NDBI sur le LST bien qu'il n'a pas pu représenter les zones bâties.

La corrélation négative entre le LST et le NDVI peut s'expliquer par le processus d'évapotranspiration dans les zones végétalisées, qui absorbe l'énergie thermique et libère de la vapeur d'eau, contribuant ainsi à refroidir l'air à proximité. De plus, le couvert forestier empêche le rayonnement de pénétrer à la surface (Senanayake et al., 2013).

Ce chapitre nous a permis de mener une étude sur la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans la ville de Mostaganem. Cette étude a permis d'identifier les quartiers de la ville où les températures maximales étaient enregistrées. Cependant, à cette échelle et avec une résolution de 30x30 mètres, cette analyse n'a pas pu déterminer précisément les paramètres morphologiques ayant le plus grand impact sur l'ICU, qui est l'objectif principal de cette thèse. Par conséquent, une analyse paramétrique à l'échelle microclimatique est considérée comme nécessaire.

Dans ce contexte, l'un des quatre quartiers sélectionnés dans la classe 01 sera choisi pour une étude de cas approfondie afin d'analyser le comportement temporel de l'ICU à une échelle microclimatique. Cette approche permettra de mieux comprendre les facteurs morphologiques qui influencent l'ICU dans la ville de Mostaganem et pourra fournir des recommandations importantes pour la mise en place de stratégies d'atténuation des îlots de chaleur en termes d'aménagement urbain.

## **VI. Conclusion**

Le présent chapitre s'est consacré à l'examen de l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans la ville de Mostaganem en utilisant des images du satellite Landsat 8 pour mener des analyses à la fois spatiales et saisonnières. Malgré le fait que le satellite ne puisse fournir qu'une image toutes les deux semaines, sa résolution spatiale et spectrale offre des possibilités intéressantes pour les études urbaines. De plus, l'utilisation de l'écart-type a permis de quantifier l'hétérogénéité spatiale des températures de surface, facilitant ainsi la classification de la température de surface.

Les résultats indiquent clairement que la ville de Mostaganem est soumise à un ICUS, avec une proportion significative de zones présentant des températures élevées, susceptibles d'avoir des conséquences néfastes sur le confort thermique des habitants et la consommation d'énergie.

De plus, les résultats ont révélé que les zones les plus chaudes sont localisées dans les nouvelles extensions urbaines, caractérisées par une forte minéralisation des surfaces, une diminution du couvert végétal et un tissu urbain éclaté. Par ailleurs, la courbe de variation de la température de surface pour Mostaganem a été examinée, montrant des intensités maximales en périphérie de la ville et des températures plus basses au centre-ville. L'étude a également mis en évidence l'impact du NDVI (indice de végétation), du NDBI (indice de bâti) ainsi que des paramètres climatiques tels que la densité de surface et la hauteur moyenne des bâtiments sur la distribution spatiale de la température de surface.

Dans le prochain chapitre, une analyse à une échelle plus fine sera effectuée, à savoir l'échelle microclimatique, dans le but d'étudier le comportement quotidien de l'ICU et les mécanismes d'interaction entre la forme urbaine et les paramètres climatiques tels que le rayonnement solaire et l'écoulement d'air. Cette étude approfondie permettra de mieux comprendre l'impact de l'urbanisation sur le climat local et ouvrira la voie au développement de solutions adaptées pour atténuer les effets de l'ICU dans la ville de Mostaganem, en vue d'une gestion plus durable du climat urbain.

# **CHAPITRE V :**

*Analyse de l'ICU à l'échelle  
microclimatique : Evaluation du  
comportement climatique du cas  
d'étude et présentation de la  
simulation paramétrique*

## **I. Introduction**

Le présent chapitre expose en détail la méthodologie adoptée pour mener une investigation sur terrain visant à analyser le comportement quotidien de l'îlot de chaleur urbain en corrélation avec la morphologie urbaine à une échelle fine, spécifiquement à l'échelle microclimatique.

Dans la première section, nous abordons le contexte et les objectifs de l'étude, tout en mettant en évidence les particularités du cas d'étude retenu. Nous fournissons également les détails de la campagne de mesure, incluant les instruments de mesure utilisés et les emplacements des stations de mesure. Les résultats obtenus suite à cette campagne de mesure seront interprétés afin de mieux appréhender les relations entre la morphologie urbaine et le comportement thermique de l'îlot de chaleur.

La deuxième section décrit minutieusement le logiciel de simulation employé pour l'analyse. Chaque étape de la simulation est exposée en détail, de la construction du modèle à la définition des conditions initiales et des paramètres d'entrée, en passant par la résolution numérique. Nous abordons également la validation du modèle en comparant les valeurs mesurées in situ avec les résultats de la simulation du cas réel.

L'approche analytique adoptée à l'échelle microclimatique offre une méthodologie rigoureuse pour étudier le comportement thermique de l'îlot de chaleur urbain, en combinant à la fois des mesures sur le terrain et des simulations numériques.

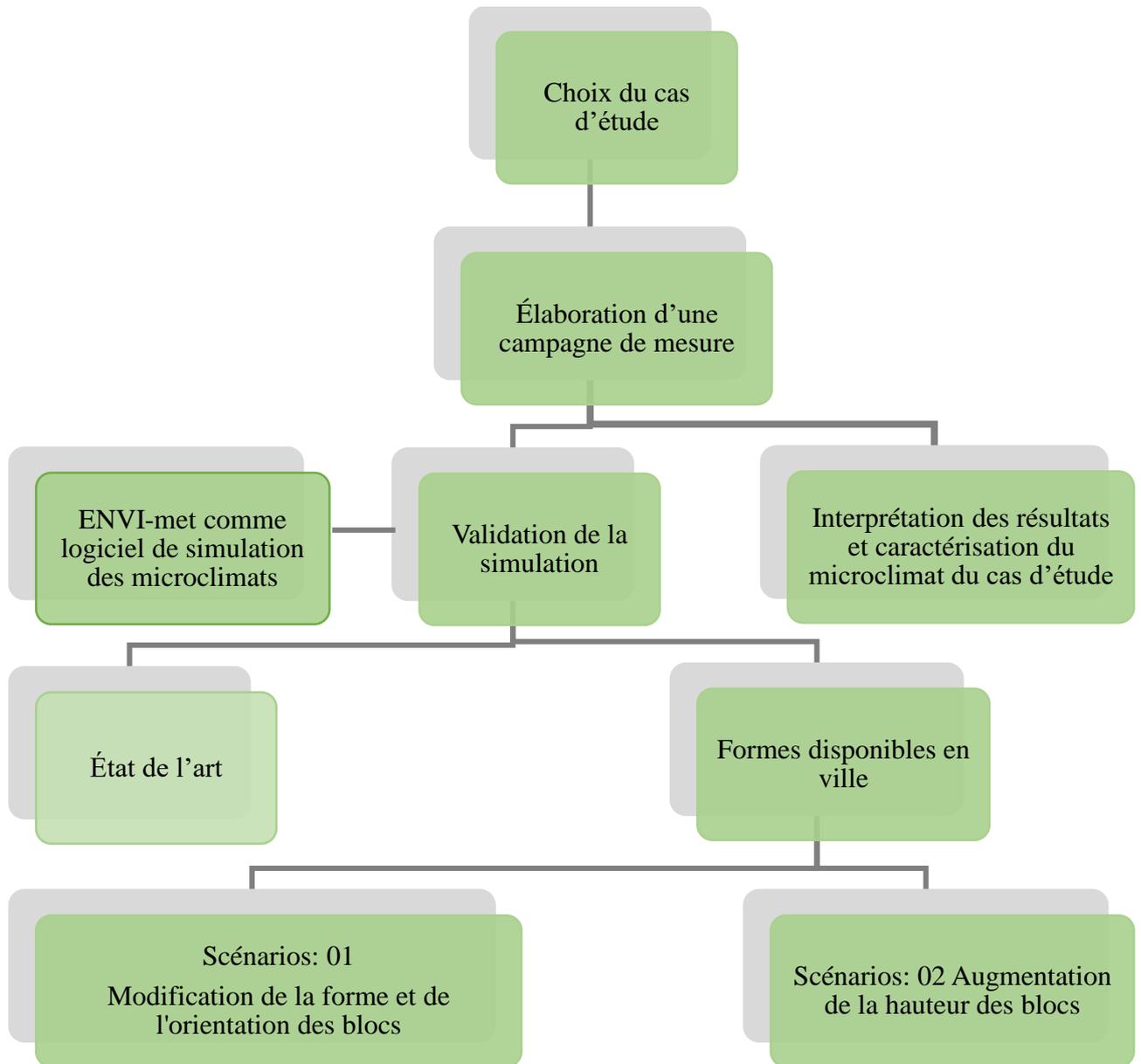


Figure V. 1: Schéma expliquant la structure du 5e chapitre. Source : Auteur.

## II. Cas d'étude

### II.1 Le choix du cas d'étude

Tout d'abord, la thématique abordée dans cette thèse concerne la recherche de solutions pour réduire la température en milieu urbain tout en intervenant sur l'aménagement et la morphologie urbaine. Le choix du quartier d'étude a été effectué en se basant sur deux critères distincts :

D'une part, la politique de production architecturale en Algérie privilégie actuellement l'habitat collectif qui se décline en différentes formes, telles que le logement social, proportionnel, promotionnel aidé ...etc. Cette nouvelle forme architecturales est donc prise en compte dans la sélection du quartier.

Ainsi, le choix s'est porté sur un quartier de classe 3 (correspondant à une classe de températures maximales) situé à Kharrouba dans l'extension nouvelle de la ville (*Figure V.1*).

Cette décision a été prise en vue de répondre aux exigences de la recherche sur la réduction de la température urbaine et de tenir compte de l'évolution de la politique de production de logements en Algérie.



*Figure V. 2:* Localisation du cas d'étude par rapport à la ville. *Source :* Google earth, traité par l'auteur.

### II.2 Présentation du cas d'étude

Le quartier a une forme triangulaire, avec des dimensions de  $386 \times 388 \times 586$  m, situé face au parc de loisirs MOSTALAND et accessible par la RN 11. Limité au sud par la cité

universitaire Benyahia Belkacem 2, et à l'est par d'autres quartiers résidentiels d'habitat collectif.

Le quartier se caractérise par un tissu éclaté avec une densité surfacique de 0.13, un faible taux de végétation (5%) et une forte minéralisation 60%.

**Tableau V. 1:** Caractéristiques morphologiques du quartier 348 à kharrouba (cas d'étude). **Source :** élaboré par l'auteur sur la base des plans cadastraux et des enquêtes sur terrain.

paramètre	valeur
COS (Coefficient d'Occupation du Sol)	2.08
CES (Coefficient d'Emprise au Sol)	0.13
Albédo moyen des surfaces	0.2
Hauteur moyenne des bâtiments	16m
Pourcentage de végétation	5%
Matériaux de construction	Béton armé Maçonnerie en brique

Le choix de ce quartier présente un intérêt particulier du fait de la présence de formes urbaines représentatives de deux politiques urbaines menées à des périodes différentes. En effet, le quartier comprend deux parties distinctes (**Figure V.3**), la première ayant été construite dans le cadre du programme des Zones d'Habitat Urbain nouvelles (ZHUN) dans les années 80, et la deuxième partie ayant été réalisée plus tard dans le cadre d'un programme d'habitat social.

Dans la première partie du quartier, le bloc linéaire que l'on observe illustre de manière caractéristique l'application de la politique de développement urbain à grande échelle mise en œuvre dans le cadre des Zones d'Habitat Urbain Nouvelles (ZHUN) à travers l'ensemble du territoire algérien. En revanche, dans la seconde partie du quartier, les structures architecturales des bâtiments sont conçues de manière à s'adapter à la configuration des parcelles, afin d'exploiter au mieux l'espace disponible. Ainsi, on peut observer l'émergence de blocs en forme de L, de U, et autres formes.

Cette distinction dans les formes urbaines entre les deux parties du quartier offre une opportunité de comparaison et d'analyse intéressante pour étudier les impacts de différentes politiques urbaines sur les ambiances thermiques.

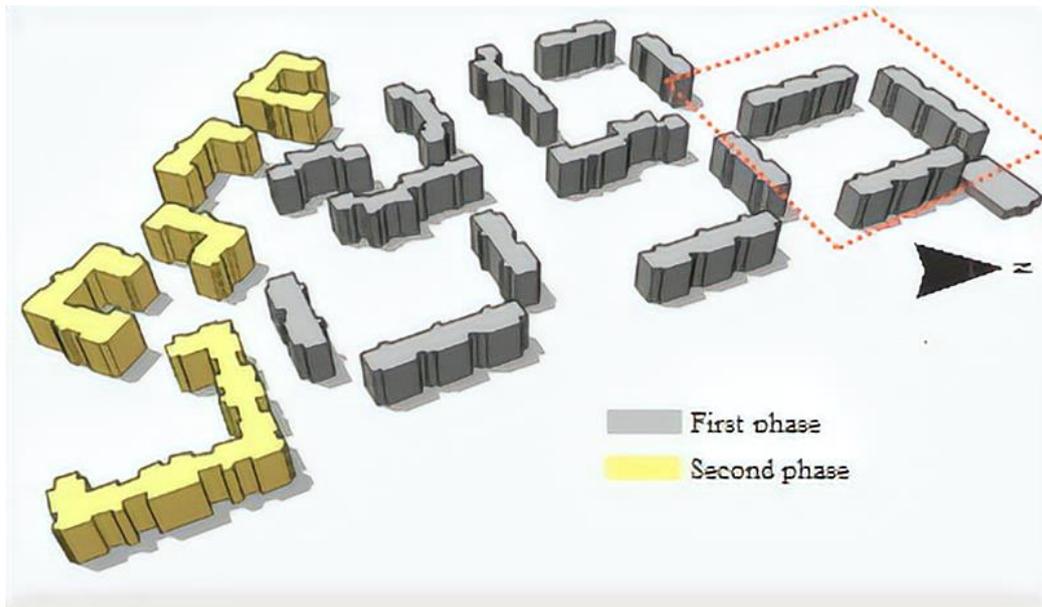


Figure V. 3: 3D du quartier 348. *Source* : élaboré par l'auteur sur la base des plans cadastraux et des investigations in situ.



Figure V. 4: Prise de vue du cas d'étude (coté ZHUN). *Source* : Auteur.



*Figure V. 5:* Prise de vue du cas d'étude (coté habitat social). *Source :* Auteur.

### II.3 Campagne de mesure, protocole, procédure et instruments

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt des campagnes de mesure consiste à examiner le comportement climatique du quartier étudié en fonction de sa morphologie, ainsi qu'à analyser les changements des paramètres climatiques qui peuvent survenir dans différentes géométries. De plus, la réalisation de ces campagnes de mesure permet la création d'une base de données qui sera utilisée pour valider les modèles de simulation.

En d'autres termes, cette approche permet de mieux comprendre les variations climatiques dans un environnement urbain donné et d'affiner le modèle de simulation utilisé pour prédire ces variations.

#### II.3.1 Méthodes adoptées

Dans cette recherche la méthode du parcours urbain est utilisée, c'est une méthode qui repose sur la collecte de données ponctuelles à travers un parcours urbain constitué d'un ensemble de points de mesure comme indiqué dans la *Figure V.6*. Cette approche consiste à sélectionner un nombre représentatif de points de mesure couvrant une typologie variée et exhaustive de l'environnement urbain étudié. La métrologie mise en place permet ensuite de détecter des variations climatiques sur l'ensemble du parcours. Les points de mesure sont choisis en fonction de la géométrie urbaine et l'orientation des rues. Les mesures sont effectuées à l'aide d'instruments portables, ce qui nous a permis de se déplacer facilement d'un point à l'autre du parcours en un temps très court.



**Figure V. 6:** le parcours traversé pour la prise des mesures. *Source* : Traité par l'auteur.

### II.3.2 Choix des stations de mesure

Sept stations ont été stratégiquement installées pour effectuer des mesures sur divers paramètres climatiques, tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température de surface. Les emplacements des stations ont été soigneusement sélectionnés en fonction de géométries spécifiques, telles qu'illustrées dans la **Figure V.7**. Les stations 1, 3 et 5 ont été positionnées au sein de placettes entourées de blocs linéaires, tandis que la station 2 a été située à l'intersection de trois blocs de forme linéaire. Les stations 4 et 7 ont été placées dans des canyons orientés selon les axes nord-sud et est-ouest, avec un rapport hauteur/longueur (H/L) de 1.25. Enfin, la station 6 a été positionnée au centre d'un bloc de forme en L.

Ces positions de station ont été sélectionnées avec soin pour permettre une collecte de données représentative de la variété des géométries urbaines étudiées, et ainsi d'obtenir des informations précises sur les variations climatiques dans ces différentes configurations.

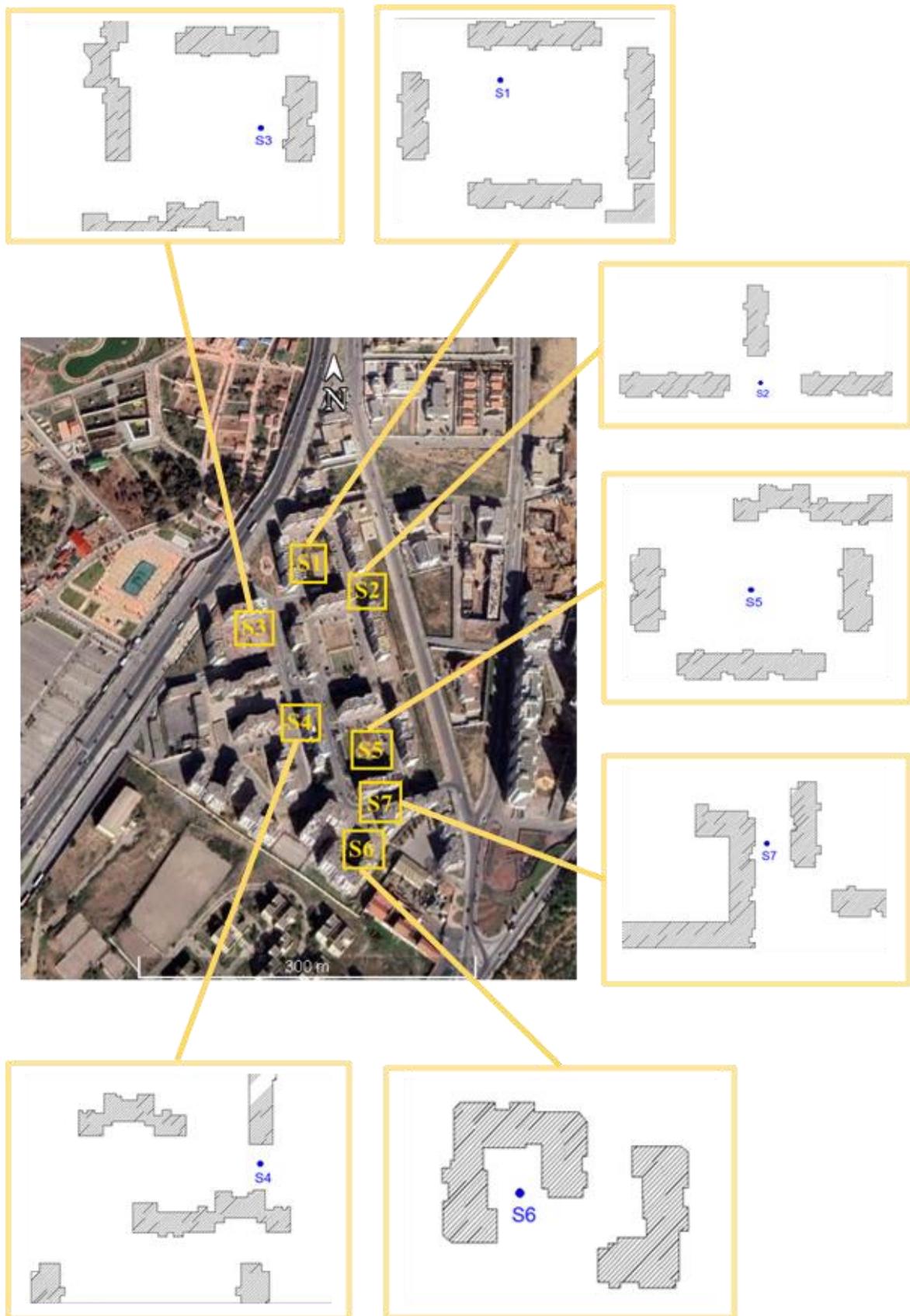


Figure V. 7: répartition des stations de mesure de S1 à S7 sur le quartier 348. *Source* : Traité par l'auteur

### *II.3.3 Déroulement de la campagne de mesure*

Le 06 août 2019 a été sélectionné comme date pour lancer la campagne de mesure visant à collecter des données climatiques dans le quartier étudié. Le choix s'est orienté vers le mois d'août pour initier la campagne de mesure, motivé par plusieurs facteurs scientifiques et logistiques. Premièrement, l'analyse climatique préalable de la ville de Mostaganem, présentée dans le chapitre précédent, a révélé que le mois d'août est le mois le plus chaud de l'année. Par conséquent, cette période offre des conditions climatiques propices pour l'étude des paramètres visés. Deuxièmement, compte tenu de la nature des mesures à effectuer, une autorisation a été requise. Par conséquent, des précautions de sécurité et de protection ont été nécessaires. La date précise de début de la campagne dépendait donc de la disponibilité du service de police pour garantir la sécurité nécessaire lors des opérations de mesure.

Les conditions météorologiques étaient idéales pour la collecte de données, avec un ciel dégagé le matin et partiellement nuageux l'après-midi. Les données météorologiques de cette journée ont été extraites de la station météorologique locale de la ville de Mostaganem située à 7Km du cas d'étude **Figure V.15**.

La campagne de mesure s'est étendue sur une période de douze heures, débutant à 7h00 et se terminant à 19h00, et a été divisée en sept intervalles de deux heures chacun. Au cours de chaque intervalle, les mesures ont été effectuées dans les sept stations de mesure sélectionnées (voir **Figure V.7**). Pour chaque station de mesure, la durée des mesures était de 10 minutes, avec une durée de déplacement de 5 minutes pour passer de la station en cours à la station suivante.



**Figure V. 8:** Prise de vue des stations mesurées. **Source :** Auteur.

#### II.3.4 Les instruments employés

Les stations ont été sélectionnées pour effectuer des mesures de la température de l'air ( $T_a$ ), de l'humidité relative (RH), de la vitesse du vent (V) et de la température de surface du sol ( $T_s$ ). Pour cela, une mini-station météorologique mobile de modèle FROGGIT a été utilisée, placée sur un trépied à une hauteur moyenne de 1,75 mètre. Parallèlement, un thermomètre infrarouge a été utilisé manuellement pour mesurer la température de surface du sol au niveau de chaque station de mesure, comme indiqué sur la **Figure V.9**.



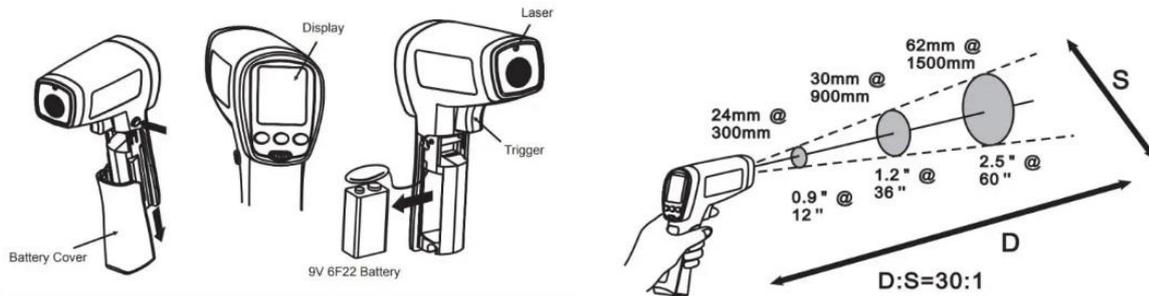
Figure V. 9: les instruments de mesure employés dans la campagne de mesure. À droite la station météorologique FRROGIT modèle WH4000SE WI-FI, à gauche le thermomètre infrarouge modèle UNI-T UT301A. Source : Auteur.

Tableau V. 2: caractéristiques techniques des deux appareils de mesure employés. Source : Adapté des manuelles d'utilisation des deux dispositifs.

Paramètre	Instrument	plage	précision
Température de l'air T <sub>a</sub> (°C)	Station météorologique Froggit modèle WH4000SE WI-FI	-40°C à + 60°C	±1 °C
Humidité Relative RH (%)	Station météorologique Froggit modèle WH4000SE WI-FI	10% à 99%	±5%
Wind speed (m/s) and Wind direction	Station météorologique Froggit modèle WH4000SE WI-FI	0 – 50m/s	±1m/s (pour la vitesse du vent < 5m/s) ±10% (pour la vitesse du vent > 5m/s)
Température de surface (°C)	Thermomètre infrarouge modèle UNI-T UT301A	-18 ° C à + 350 °C	± 1.8 °C

II.3.4.1 Le thermomètre infrarouge

Le thermomètre infrarouge UT301A peut déterminer la température de surface en mesurant la quantité d'énergie infrarouge rayonnée par la surface cible. Alimenté soit par la batterie soit par une source avec USB connecté. Le thermomètre permet d'ajuster l'émissivité de l'unité pour le type de surface avant de mesurer. Au fur et à mesure que la distance (D) de la cible mesurée augmente, la taille du spot (S) de la zone mesurée par l'unité devient plus grande. La taille du spot indique 90 % d'énergie encerclée. La S maximale est obtenue lorsque le thermomètre est à 600 mm de la cible, ce qui donne une taille de spot de 20 mm (Sahib,2022). Voir la **Figure V.10**.



**Figure V. 10:** description du thermomètre infrarouge UT301A. **Source :** UNI-Trend. (2022).

II.3.4.2 La station météorologique Froggit WH4000SE

Composée de :

1. Unité d’affichage (**Figure V.11**) : un écran XL LCD rétroéclairé (17,5 x 15 x 5 cm) avec module WiFi avec :
  - Thermohygromètre intégré
  - Module WiFi intégré
  - Connexion WiFi à un serveur météo
  - Connexion facile
  - Connexion Weathercloud<sup>1</sup>
2. Unité extérieure compacte avec prise en charge solaire (**Figure V.12**).
3. Logiciel d’analyse de PC avec une connexion sans fil via WiFi entre le logiciel PC et l’unité d’affichage

<sup>1</sup> Weathercloud est un réseau mondial de stations météorologiques partageant des données en temps réel.URL : <https://weathercloud.net/en>

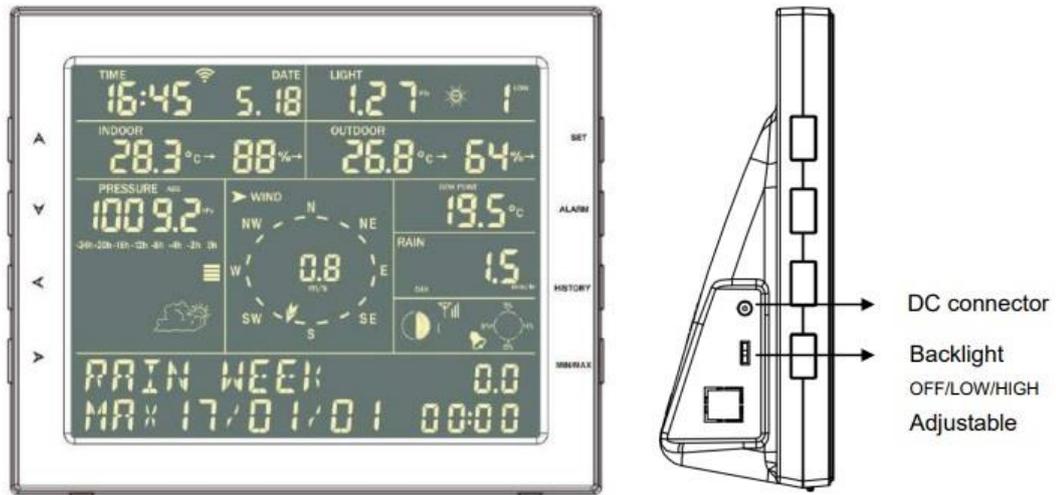


Figure V. 11: l'écran LCD fourni avec la station météorologique utilisée. Source : Froggit.de. (2019).

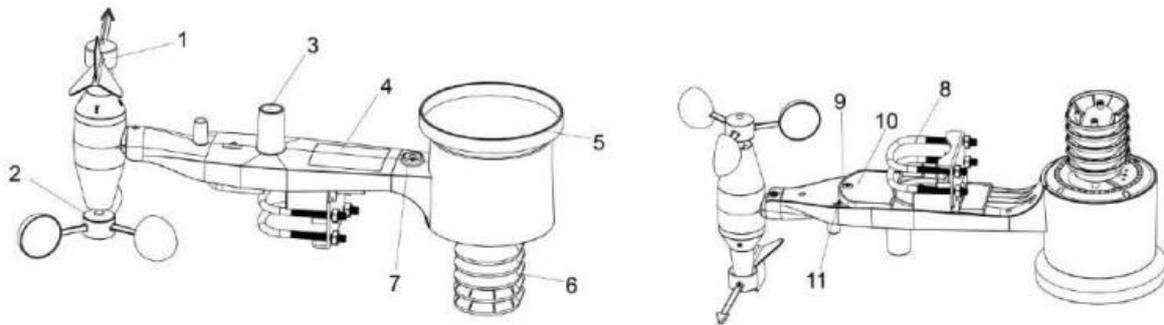


Figure V. 12: description de la station météorologique Froggit WH4000SE. Source : Froggit.de. (2019).

1. Girouette
2. Capteur de vitesse du vent
3. Capteur UV/capteur de lumière
4. Panneau solaire
5. Collecteur de pluie
6. Capteur hygrothermique
7. Niveau à bulles
8. Boulon en U
9. Voyant DEL : s'allume pendant 4 s si l'appareil est sous tension. Le voyant DEL clignote une fois toutes les 16 secondes (période de mise à jour de la transmission du capteur).

10. Porte de la batterie

11. Bouton de réinitialisation

### *II.3.5 Résultats de la campagne de mesure*

L'objectif de cette analyse est de comprendre la variabilité climatique entre les sept stations de mesure et l'interaction entre les quatre paramètres climatiques étudiés : la température de l'air (°C), l'humidité relative (%), la vitesse du vent (m/s) et la température de surface du sol (°C).

Les courbes présentées dans la **Figure V.13** montrent la variation des paramètres climatiques mesurés pour chacune des sept stations de mesure dans le quartier. Cette analyse permettra de déterminer les zones du quartier qui connaissent les températures les plus élevées ou les plus basses. Elle permettra également d'identifier les zones qui ont les vitesses de vent les plus élevées ou les plus faibles. En comprenant comment ces paramètres climatiques varient dans différentes zones du quartier, il sera possible de mieux comprendre comment les différentes géométries du quartier affectent les microclimats locaux.

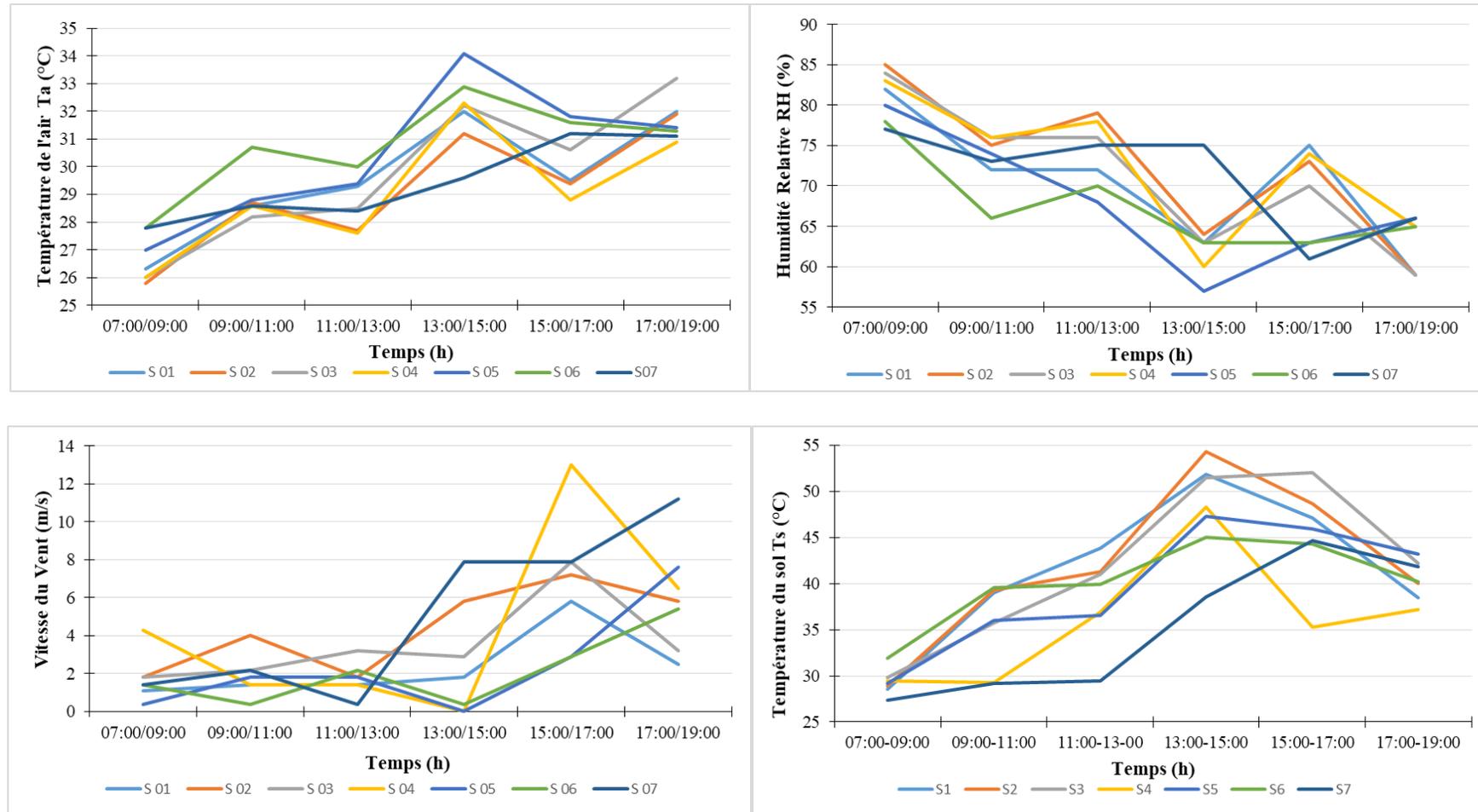


Figure V. 13: Paramètres climatiques à savoir : la température de l'air Ta, l'humidité relative RH, la vitesse du vent V et la température du sol Ts mesurés dans les sept stations choisies. *Source* : Auteur.

### II.3.5.1 La température de l'air

Les courbes des stations S1, S2, S3 et S4 suivent la même tendance, les courbes S6 et S5 ont les mêmes comportements que les stations citées précédemment de 7 :00h jusqu'à (15 :00, 17 :00), par la suite la température décroît jusqu'à 31.4°C et 31.3°C respectivement. La station S7 présente un comportement différent et ça du à son emplacement qui favorise un faible ensoleillement et un fort écoulement d'air. La différence de température entre les stations pour chaque intervalle est environ 2°C et ça peut être dû à l'emplacement des stations dans des géométries différentes (**Figure V.7**) et la proximité des végétations ou à l'intervalle de deux heures des prises de mesure entre la première et la dernière station.

Les valeurs maximales de température sont enregistrées entre 13:00 et 15:00 pour toutes les stations sauf la station S7 (la valeur maximale (31.2°C) est mesurée à (15 :00, 17 :00)). Les températures minimales sont enregistrées au début du jour entre 07 :00 et 09 :00. La station S4 présente les températures les plus basses avec : 26°C entre 07 :00 et 09 :00, 28.6°C entre 09 :00 et 11 :00, 27.6°C entre 11 :00 et 13 :00, 32.3°C entre 13 :00 et 15 :00, 28.8°C entre 15 :00 et 17 :00 et 30.9°C entre 17 :00 et 19 :00. Et ça du a l'effet d'ombrage des deux cotés en plus la proximité de la végétation.

### II.3.5.2 L'Humidité Relative RH

Les courbes d'humidité Relative RH suivent une certaine logique par rapport aux courbes de température de l'air (**Figure V.7**), elles sont en relation inverse. Avec une différence de 10% environ entre la valeur minimale et maximale pour les trois premières mesures, cet écart augmente pendant l'heure la plus chaude pour devenir 18% entre (13:00, 15:00) et puis diminue à 14% entre (15 :00 , 17 :00) et 7% entre (17 :00, 19 :00). La couverture végétale dans le quartier est faible donc l'humidité est influencée par l'humidité locale de la ville vu que Mostaganem est une ville côtière.

### II.3.5.3 La vitesse du vent

À l'échelle micro, le vent est un facteur aléatoire qui est influencé par plusieurs paramètres. De manière générale, les courbes de vent peuvent présenter des comportements différents en fonction de l'influence des obstacles urbains et des conditions météorologiques locales.

#### II.3.5.4 La température de surface du sol

La **Figure V.7** montre la variation journalière de la température de surface du sol pour les stations choisies. Les valeurs augmentent graduellement de (07 :00, 09 :00) jusqu'à (13 :00, 15 :00) pour ensuite décroître, pour les stations S1, S2, S4, S4, S5 et S6. Pour les autres stations S3 et S7 le pic a été observé entre 15 :00 h et 17 :00h.

Les stations S1, S2, S3, S5 et S6 étaient exposées aux rayons solaires de (07 :00 ; 09 :00) jusqu'à (13 :00, 15 :00) ce qui justifie la croissance continue des températures. La station S7 enregistre les valeurs minimales entre (07 :00, 09 :00) et (15 :00, 17 :00), car le soleil était obstrué par le bâtiment au sud. Entre (11 :00, 13 :00) les courbes ont subi une diminution légère, bien que la majorité des stations étaient exposées aux rayons solaires directs.

L'écart entre les stations est irrégulier pendant la période de mesure, ça peut être justifié par le fait que la course du soleil autour des sept stations engendre des zones ombragées et d'autres non ombragées du fait de la géométrie urbaine et que la température de surface est fortement liée au rayonnement solaire directe.

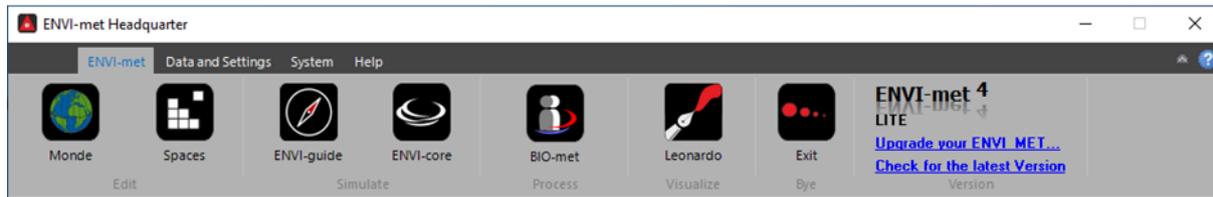
En résumé, le quartier choisi est situé à une distance de 1 km de la mer, ce qui signifie que l'humidité peut être transportée par les vents si l'écoulement se produit depuis la direction de la mer. En revanche, si l'écoulement provient du sud, il peut apporter de l'air chaud, ce qui peut affecter la température de la zone. Par conséquent, la température est influencée par ces facteurs climatiques, ainsi que par l'exposition aux rayons solaires de chaque station. En outre, la chaleur anthropique et l'inertie thermique des bâtiments peuvent également affecter la température de la zone.

## II.4 Simulation du microclimat du quartier 348 avec ENVI met 4.4.6

### II.4.1 Présentation du logiciel ENVI met

ENVI-met est un modèle climatique tridimensionnelle pronostique, qui calcule la dynamique du microclimat dans un cycle diurne (24 à 48 h) en utilisant les fondamentaux physiques qui sont basés sur les principes de la mécanique des fluides, thermodynamique, et les lois de la physique de l'atmosphère à une résolution spatiale typique entre 0.5m et 10m et un pas de temps de 10s. ENVI-met permet la simulation de l'interaction microclimatique entre surface urbaine, végétation et atmosphère, il permet l'analyse des effets à petite échelle de l'aménagement urbain dans un microclimat sous différentes conditions (Bruse, et al. 1998). Un

outil parfait pour les urbanistes, les architectes et les climatologues urbains qui veulent simuler les composantes météorologiques de l'environnement urbain (Huttner, 2012).



**Figure V. 14:** interface du logiciel ENVI-met 4

L'interface du logiciel (**Figure V.14**) présente des sous-logiciels ou chacun est responsable d'une étape de la modélisation et de simulation.

Spaces : pour la construction du modèle, le choix des matériaux et le type de végétation

ENVI-guide : pour introduire les paramètres d'entrée dans lesquels la simulation se déroule

ENVI-core : pour le lancement de la simulation

BIO-met : pour le calcul des indices du confort (PET, PMV, PPD, UTCI)

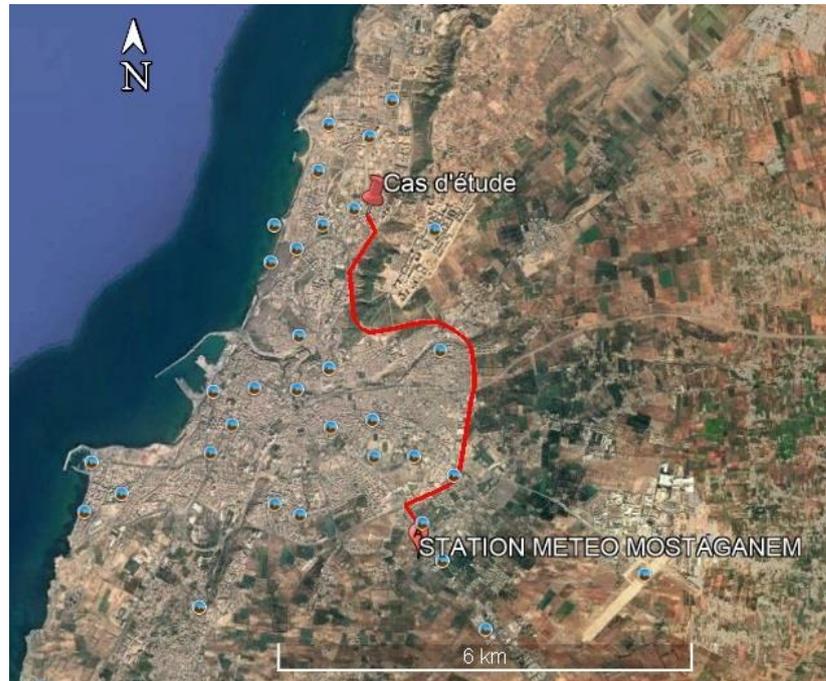
Leonardo : pour la visualisation des résultats

#### II.4.2 Protocole de simulation

La simulation de la zone d'étude a été réalisée en utilisant la version LITE du logiciel. Cependant, en raison de la limitation de sa zone de dessin (50×50×40 pixels) et dans le but de garantir une résolution satisfaisante, seule une partie du quartier a été modélisée. Cette section comprend quatre blocs de forme linéaire entourant une placette mesurant 90×62m, conformément à la **Figure V.17**.

Pour générer le modèle 3D dans le logiciel ENVI, des données provenant des plans cadastraux et des relevés sur site ont été utilisées. Les données météorologiques ont été obtenues à partir de la station météorologique locale de la ville de Mostaganem, située à une distance de 7 kilomètres de la zone d'étude (voir **Figure V.15**). Les simulations ont été effectuées sur une période de 18 heures, de 5 heures du matin à 22 heures, dans le but d'analyser les variations des températures tout au long de la journée, y compris après le coucher du soleil. Ce dernier moment

est particulièrement significatif car il correspond au pic de l'îlot de chaleur urbain, où les écarts de températures entre la ville et sa périphérie atteignent leur maximum.



**Figure V. 15:** Emplacement de la station météorologique par rapport au cas d'étude. *Source* : Google Earth. Traité par l'auteur.

#### II.4.3 Construction du modèle géométrique

Le modèle a été réalisé manuellement en saisissant des pixels (x, y et z) dans le sous-logiciel **Space** (**Figure V.16**). La résolution de chaque pixel correspond à une échelle réduite de 2,5m x 2,5m x 2,5m ( $dx=2,5m$ ,  $dy=2,5m$  et  $dz=2,5m$ ), avec une maille définie de 49x49x40 pixels. Les bibliothèques intégrées sur ENVI met ont permis d'introduire des caractéristiques liées aux matériaux de construction et à l'albédo des surfaces, tandis que la végétation a été simplifiée (les paramètres d'entrée requis pour la simulation sont présentés dans le **Tableau V. 3**).

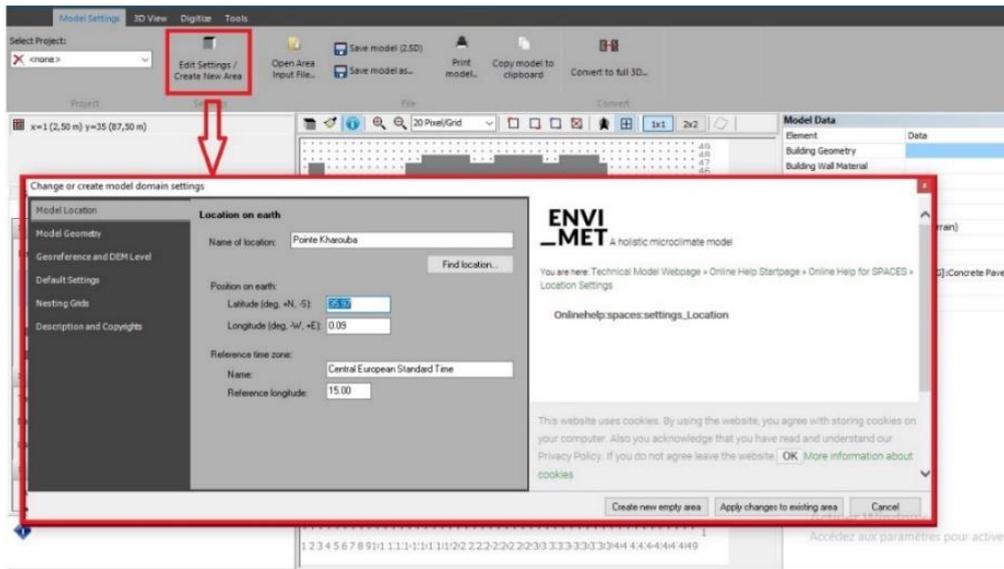


Figure V. 16: construction du modèle géométrique sur le sous-logiciel SPACE. Source : Traité par l'auteur.

Le modèle 2D et 3D ainsi créé à l'aide d'ENVI-met a été représenté dans la **Figure V.17**, avec le récepteur (points rouges) placé à l'emplacement de la station S1 de mesure. Les paramètres d'entrée ont ensuite été introduits dans le sous-logiciel **ENVI-guide**, et la simulation a été lancée dans le sous-logiciel **ENVI-core** en sélectionnant l'emplacement du fichier. La simulation peut être testée et lancée à partir de là. Enfin, la visualisation des résultats a été effectuée à l'aide de **Leonardo**.

Tableau V. 3: les caractéristiques du modèle géométrique et les paramètres d'entrée de la simulation numérique. Source : Auteur.

variable	valeurs
Date	06.08.2019
Durée de simulation	de 05:00 à 22:00
Résolution spatiale	2.5m horizontalement, 2.5m verticalement
Matériaux de construction	Murs : béton (moulé dense)
	Toiture : béton (moulé dense)
Végétation	Végétation simple de type : H2 : haie dense, 2m (0000H2) H4 : haie dense, 4m (0000H4)
Température de l'air initiale	Max: 34 °C, Min 24 °C
Vitesse du vent	5 m/s à 10m de hauteur
Direction du vent	310° (Nord-ouest)
Humidité relative	Max: 85%, Min: 56%

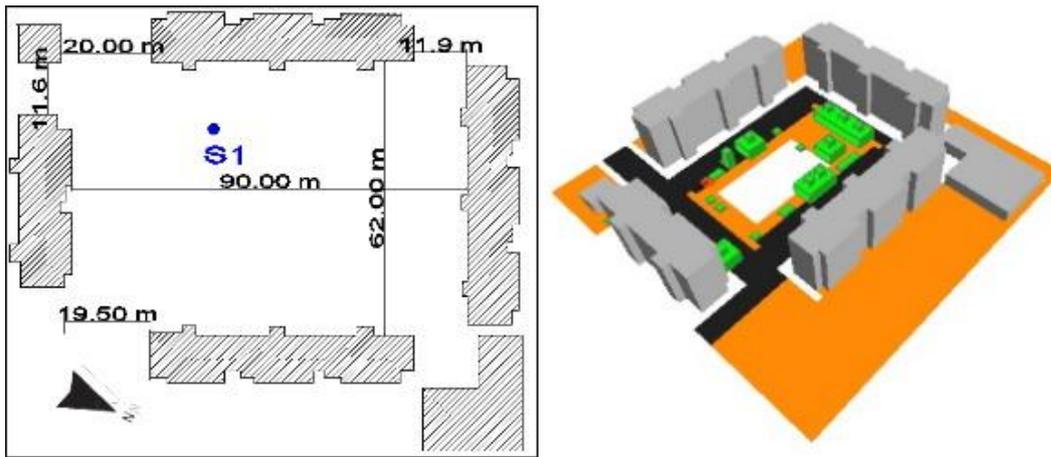


Figure V. 17: la partie simulée du quartier en 2D et 3D avec l'emplacement du récepteur (point bleu S1). Source : Auteur

## II.5 Validation de la simulation

ENVI met est destiné principalement aux climatologues urbains, La fiabilité et la validation des résultats d'ENVI-met ont été vérifiées par plusieurs études numériques en comparant les résultats avec les données mesurées. Citant, entre autres, les études de (Ghaffarianhoseini et al., 2015; Lahme & Bruse, 2003; Monam & Rückert, 2013; Ozkeresteci et al., 2003; Schmidt et al., 2006)(Lahme & Bruse, 2002), (Ozkeresteci, et al., 2003), (Yu & Hien, 2006), (Monam & Ruckert, 2013), (Ghaffarianhoseini, et al., 2015).

Pour évaluer l'exactitude des simulations numériques, une validation a été effectuée au moyen d'une comparaison entre les sorties du récepteur S1 et les données de la station météorologique de la campagne de mesure au site S1 dans le quartier 348. La Figure V.18 montre des tendances similaires dans les variations quotidiennes de la température de l'air simulée et observée et la Figure V.19 représente la corrélation positive entre les deux ensembles de données, qui est assez forte ( $R = 0,862$ ).

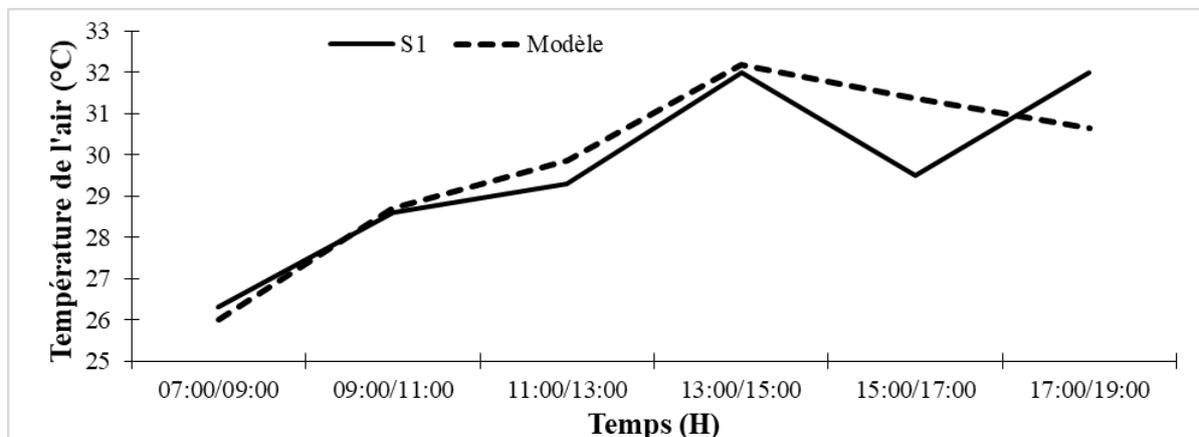
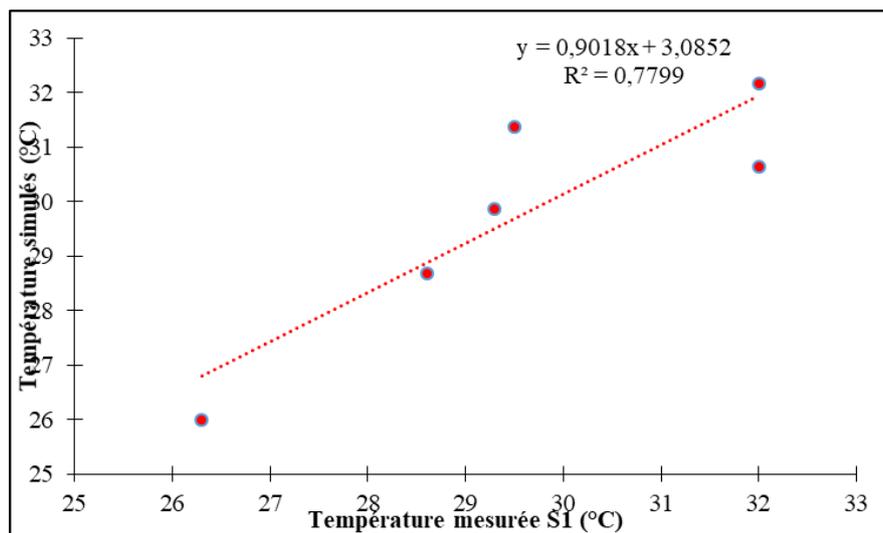


Figure V. 18: variation journalière de la température de l'air mesurée et simulée. Source : Auteur.

L'erreur quadratique moyenne (EQM) est utilisée également pour mesurer les différences entre les valeurs prévues (ici simulées) et les valeurs observées (Ayyad & Sharples, 2019; Crank et al., 2020; Forouzandeh, 2018; Galal et al., 2020). La EQM entre la température de l'air simulée et mesurée est d'environ 2,16 °C avec un coefficient de corrélation de Pearson de 0,87. Ces valeurs sont meilleures que celles présentées dans d'autres études où les résultats de la simulation étaient encore acceptables avec une EQM de 3,7 °C (Galal et al., 2020). D'autre part, le modèle simulé a surestimé la température de l'air entre 15 :00h et 17 :00h de 1.88 °C et l'a sous-estimé entre 17 :0 et 19 :00h de 1.35°C. Le pic des températures est entre 13 :00h et 15 :00h pour le modèle et est entre 17 :00h et 19 :00 pour la température mesurée.

Cet écart entre les valeurs mesurées et simulées peut être expliqué par la différence dans les conditions initiales et aux limites, les données d'entrée de la simulation comme les propriétés des matériaux de construction, les propriétés du sol et de la végétation.



**Figure V. 19:** Nuage de points représentant la relation entre la température mesurée et simulée.

*Source :* Auteur.

## II.6 Diminution de la température par simulation paramétrique

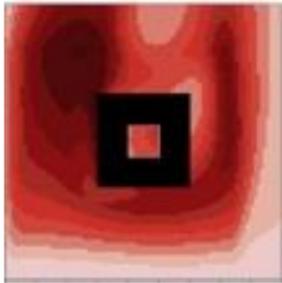
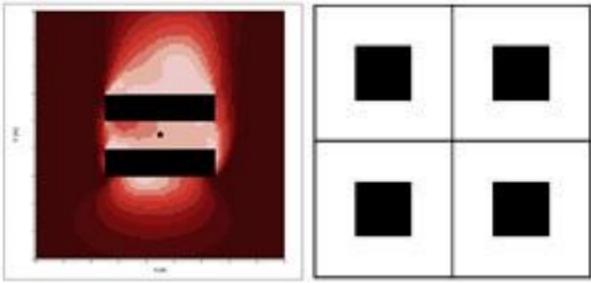
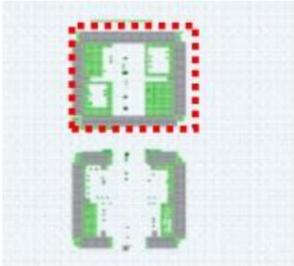
L'objectif de cette recherche est de proposer des solutions visant à réduire les effets de l'îlot de chaleur urbain en modifiant la forme urbaine. Pour atteindre cet objectif, une analyse chronologique des formes d'habitat collectif résultant de différents programmes de construction sera entreprise. Cette recherche s'appuie sur deux justifications :

Premièrement, la forme des bâtiments a une influence directe sur le comportement thermique de ces derniers, ainsi que sur leur impact sur l'environnement. Par conséquent, en

modifiant les formes des bâtiments collectifs, il est possible d'atténuer les effets néfastes de l'îlot de chaleur urbain.

Deuxièmement, il est important de considérer les précédentes recherches effectuées dans ce domaine, afin d'éviter les redondances et d'élargir les perspectives. En gardant cela à l'esprit, les choix de solutions proposées dans ce travail seront évalués en fonction de leur pertinence par rapport aux études antérieures.

Tableau V. 4: Différentes formes d'habitats collectifs issus des programmes projetés dans la ville de Mostaganem et des études consultées (Ratti et al., 2003; Taleghani et al., 2015; Yola, 2020). *Source* : Auteur.

Forme	Forme fermée autour d'un patio	Bloc linéaire/ Bloc singulier	Bloc linéaire formant une cour semi-fermée	Bloc en U	Bloc en L	Forme irrégulière
<p><b>Politique d'habitat collectif en Algérie</b></p>	<p>Une forme représentative de la maison à patio. Cette forme architecturale a été observée dans les nouvelles constructions coloniales lors de la première phase d'urbanisation coloniale en Algérie, bien qu'elle ait été peu présente à Mostaganem</p>	<p>Plans de Constantine (HLM HBM)</p> 	<p>Le premier plan quadriennal 1970/1973 : Les Zones d'Habitat urbain nouvelles (ZHUNs)</p> 	<p>Les programmes de construction récents comprennent notamment ceux de l'OPGI (à partir de 1974) et de l'AADL et du CNL (depuis 1991), qui proposent des formules telles que :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• le Logement Social Participatif <b>LSP</b> (CNL).</li> <li>• le Logement Public Locatif <b>LPL</b> (OPGI).</li> <li>• le Logement Promotionnel Aidé <b>LPA</b> (remplaçant le LSP en 2011)</li> <li>• le Logement Promotionnel Public, ainsi que le Logement Collectif Haut Standing qui est géré par des promoteurs privés et l'ENPI (anciennement EPLF).</li> </ul> 		
<p><b>Revue de littérature</b></p>	<p>(Taleghani et al., 2015) (Yola, 2020) (Stemmers et al., 1997)</p> 	<p>(Taleghani et al., 2015) (Yola, 2020) (Stemmers et al., 1997)</p> 	<p>La forme linéaire a été largement évaluée, mais en formant des canyons.</p>	<p>(Yola, 2020)</p> 	/	/

Durant la période coloniale et les programmes de construction qui ont suivi, il était courant d'observer une utilisation répétitive de formes génériques ou types d'architecture dans différents sites, en vue de standardiser les projets pour faciliter leur construction et leur gestion (citant les HLM et les ZHUN). Les formes architecturales étaient alors simples et épurées, linéaires ou isolées. Toutefois, avec l'arrivée de nouveaux maîtres d'ouvrage et la forte demande en logements, l'utilisation optimale de l'espace est devenue un enjeu majeur. Les concepteurs ont donc commencé à explorer de nouvelles formes architecturales, telles que les formes en L ou en U, voire des formes irrégulières, afin d'optimiser l'utilisation de l'assiette foncière tout en offrant des espaces de vie mieux adaptés aux besoins des habitants. Malgré ces avancées, la qualité thermique et bioclimatique de ces formes architecturales est souvent négligée.

II.6.1 Présentation de la simulation paramétrique pour l'optimisation

Il convient de souligner que l'objectif principal de la présente étude consiste à suggérer des solutions en matière de formes urbaines pour réduire l'intensité des îlots de chaleur urbains. Comme cela a été examiné dans la revue de littérature, divers autres paramètres peuvent influencer la modification des conditions climatiques et, par conséquent, l'intensité des îlots de chaleur urbains. Pour cette raison, certains paramètres ont été maintenus constants pour l'ensemble des scénarios envisagés (voir la **Figure V.20**). Par conséquent, les paramètres qui seront examinés et évalués sont la forme, la disposition et la hauteur des blocs.

<b>Paramètres constants</b>	<b>Paramètres variables</b>
<div style="background-color: #cccccc; width: 100%; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <input type="checkbox"/> paramètres météorologiques Température de l'air Humidité Relative Vitesse du vent <input type="checkbox"/> végétation <input type="checkbox"/> albédo des surfaces	<div style="background-color: #ff0000; width: 100%; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <input type="checkbox"/> forme des bloc <input type="checkbox"/> orientation des blocs <input type="checkbox"/> Facteur de vue de ciel <input type="checkbox"/> Hauteur des blocs

**Figure V. 20:** identification des paramètres stables et constants pendant la simulation. *Source* : Auteur.

Afin de mener à bien notre étude, nous avons proposé 18 scénarios différents (**Figure V.21**), qui ont été divisés en deux séries distinctes. La première série est composée de huit scénarios plus le cas réel, tous développés par le changement de la forme du bloc urbain

existant. Le cas de base est un espace rectangulaire ouvert de 90 mètres sur 62 mètres, entouré de quatre blocs résidentiels linéaires, qui a été simulé pour évaluer les performances thermiques de la forme représentative des ZHUN.

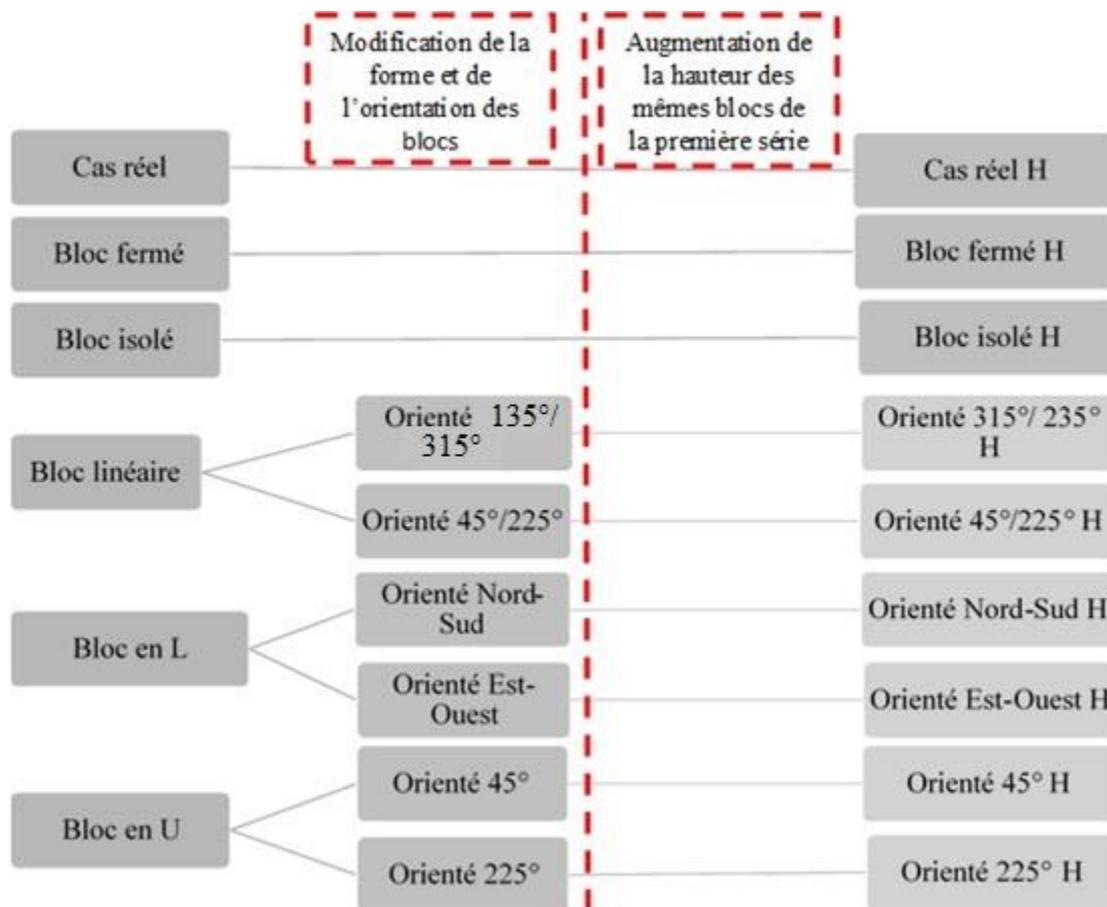


Figure V. 21: préparation des scénarios pour la simulation selon les objectifs de la recherche. Source : Auteur.

Les huit scénarios de cette série ont été conçus en proposant des configurations de blocs différents autour de cet espace. Le premier scénario de cette série a pour objectif de tester la performance thermique d'un bloc **en forme de cour fermée**, semblable aux maisons à patio typiques de la première étape de l'urbanisation coloniale. Cette forme a été utilisée avec succès dans les climats arides et semi-arides et même dans les climats plus froids récemment (Taleghani et al., 2015).

Le deuxième scénario prend la forme de six **blocs de bâtiment isolé**, d'une façon à minimiser la densité et à éclater la forme.

Le troisième scénario de la série propose **une forme linéaire**, qui était courante pendant la période coloniale, notamment dans les HLM, ainsi que dans les ZHUN postcoloniaux.

Deux orientations différentes ont été testées, en formant un canyon avec deux blocs linéaires parallèles orientés au Nord-Ouest/sud-est à  $315^{\circ}/135^{\circ}$  et  $45^{\circ}/225^{\circ}$ <sup>2</sup>.

Le quatrième scénario de la série explore **une forme en L**, qui est de plus en plus utilisée dans les nouveaux programmes, car elle permet de tirer parti de l'assiette du projet. Pour la présente étude, cette forme a été utilisée pour former un rectangle semi-fermé avec une orientation Nord/Sud et Est/ Ouest.

Le cinquième scénario de la série examine les performances thermiques de **la forme en U**, qui a été largement utilisée dans les programmes d'habitat postcoloniaux. Cette forme a également été étudiée par (Yola, 2020). Le huitième et le neuvième scénario de la série proposent ainsi un bloc en U orienté nord-ouest à  $225^{\circ}$  et un autre orienté nord-est à  $45^{\circ}$ .

---

<sup>2</sup> Citant que  $0^{\circ}$  correspond au Nord et le sens positif est le sens contraire des aiguilles d'une montre.

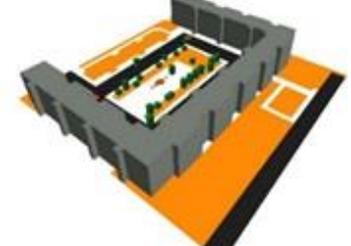
<p>Cas réel FVC<sub>A</sub>= 0.80</p> 	<p>Bloc fermé FVC<sub>A</sub>= 0.76</p> 	<p>Bloc isolé FVC<sub>A</sub>= 0.76</p> 
<p>Bloc Linéaire orienté nord-ouest/sud-est 135°/ 315° FVC<sub>A</sub>= 0.81</p> 	<p>Bloc Linéaire orienté 45°/225° FVC<sub>A</sub>= 0.88</p> 	<p>Cour semi-ouverte avec forme en L N/S FVC<sub>A</sub>= 0.78</p> 
<p>Cour semi-ouverte avec forme en L E/O FVC<sub>A</sub>= 0.79</p> 	<p>Forme en U orienté Ouest (225°) FVC<sub>A</sub>= 0.83</p> 	<p>Forme en U orienté Est (45°) FVC<sub>A</sub>= 0.81</p> 

Figure V. 22: scénarios proposés en modifiant la forme des blocs. *Source* : Auteur.

La deuxième série de scénarios (*Figure V.23*) présente la deuxième technique de réduction, qui consiste à augmenter la hauteur des neuf formes simulées dans la première série. La hauteur des bâtiments a été augmentée de 17m à 30m. L'objectif est d'analyser le comportement thermoaéraulique des nouvelles formes architecturales qui sont en train de s'implanter dans le paysage urbain des villes algériennes sous l'appellation de "**logement promotionnel haut standing**".

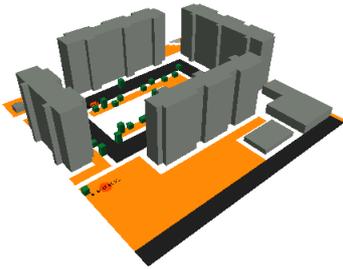
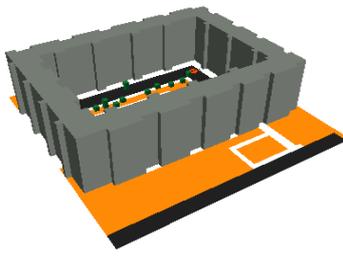
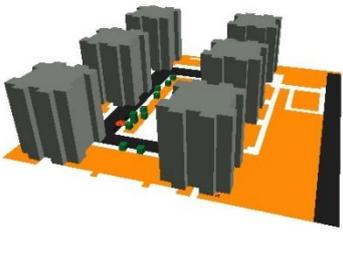
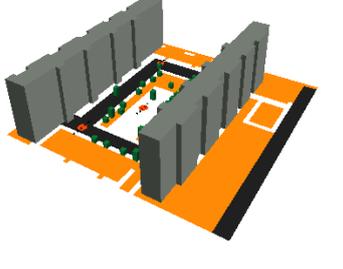
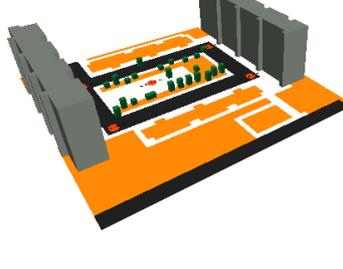
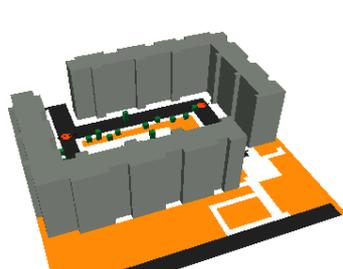
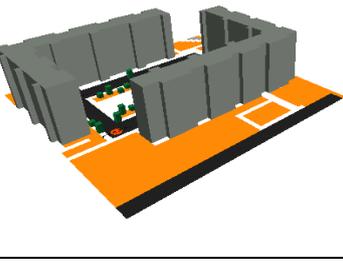
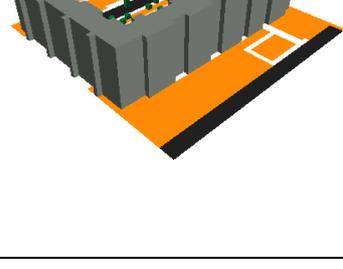
<p>Cas réel FVC<sub>A</sub>= 0.70</p> 	<p>Cour fermée FVC<sub>A</sub>= 0.64</p> 	<p>Bloc isolé FVC<sub>A</sub>= 0.65</p> 
<p>Linéaire parallèle N/S FVC<sub>A</sub>= 0.71</p> 	<p>Linéaire parallèle E/O FVC<sub>A</sub>= 0.84</p> 	<p>Cour semi-ouverte avec forme en L N/S FVC<sub>A</sub>= 0.68</p> 
<p>Cour semi-ouverte avec forme en L E/O FVC<sub>A</sub>= 0.68</p> 	<p>Forme en U Ouest FVC<sub>A</sub>= 0.75</p> 	<p>Forme en U Est FVC<sub>A</sub>= 0.73</p> 

Figure V. 23: scénarios proposés en modifiant la forme et en augmentant la hauteur des blocs. *Source* : Auteur.

Les scénarios proposés dans cette étude visent à examiner plusieurs aspects relatifs à la forme et à la disposition des blocs urbains. En particulier, ils portent sur l'évaluation de l'ouverture, de la fermeture et de l'orientation des espaces urbains. De plus, un paramètre largement étudié et vérifié sera également examiné dans ces scénarios, à savoir le facteur de vue du ciel FVC qui est le résultat des modifications apportées aux géométries des blocs urbains. Ce dernier constitue un paramètre important qui peut influencer le climat urbain.

### **III. Conclusion**

Dans ce chapitre, l'étude s'est concentrée sur une échelle plus fine en se focalisant sur le quartier 348 situé à Kharrouba, où une campagne de mesure a été réalisée le 06/08/2019 pour examiner et discuter les paramètres climatiques tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la température de surface du sol. Cette méthodologie de mesure a permis de collecter des données fiables sur les variations climatiques du quartier étudié, qui ont été ensuite utilisées pour valider de modèle de simulation et évaluer l'impact des configurations urbaines sur les microclimats locaux.

La deuxième partie de ce chapitre présente le logiciel de simulation ENVImet 4.4.6, et en se basant sur les paramètres mesurés, une validation a été effectuée sur la simulation d'une partie du quartier. Les résultats obtenus par le modèle de simulation ont été comparés à des études antérieures et se sont révélés satisfaisants.

Enfin, la dernière partie du chapitre présente les scénarios proposés qui seront soumis à une simulation via ENVImet 4.4.6 pour évaluer différentes techniques de réduction de la température. Cette étape permettra de proposer des solutions en termes de forme, orientation et hauteur des blocs d'habitat collectif pour réduire l'impact des îlots de chaleur urbains dans le quartier étudié en évaluant les performances des scénarios envisagés.

# **CHAPITRE VI :**

*Analyse de l'ICU à l'échelle  
microclimatique : Quantification de  
l'impact de la morphologie urbaine sur  
la température de l'air et de surface.*

## **I. Introduction**

Ce chapitre présente la section la plus pertinente de cette recherche, dans laquelle les résultats de la simulation numérique seront interprétés. L'objectif de cette étude est d'évaluer la validité des techniques de réduction proposées à travers une série d'étapes méthodiques.

La première partie de cette étude consiste à présenter les cartes générées par le logiciel ENVI-met pour trois paramètres climatiques spécifiques : la vitesse du vent, la température de surface du sol et la température de l'air à deux moments distincts, à savoir 14h00 et 22h00. Ces cartes sont utilisées pour évaluer le comportement thermique spatial des formes architecturales proposées. Ensuite, l'évolution quotidienne de la température de surface et de l'air est examinée en intégrant ces données avec l'évolution des rayons solaires de courte longueur d'onde reçus par un point de référence situé au centre des blocs (point A).

Par la suite, une comparaison est réalisée entre les différentes techniques proposées afin d'identifier celle qui est la plus appropriée pour réduire la température de l'air et la température de surface.

La deuxième partie de ce chapitre se concentre sur une étude statistique visant à analyser l'impact d'un paramètre morphologique largement étudié dans la littérature, à savoir le facteur de vue du ciel (FVC). Cette analyse est réalisée en appliquant une régression linéaire à l'ensemble des scénarios simulés afin de quantifier son influence sur la température de l'air ( $T_a$ ) et la température de surface ( $T_s$ ).

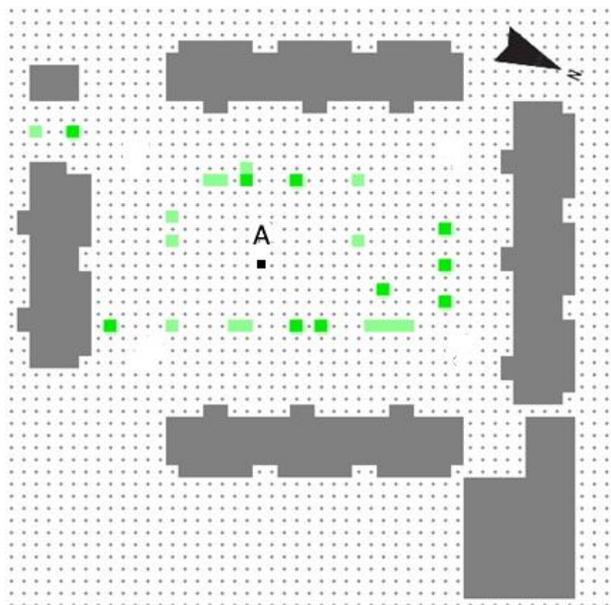
## **II. Méthode de présentation des résultats**

La méthodologie adoptée pour la présentation des résultats et l'évaluation de la performance microclimatique des scénarios simulés repose sur les sorties du logiciel de simulation ENVI. Ces sorties sont utilisées pour générer des cartes représentant la vitesse du vent, la température de l'air et la température de surface à une hauteur de 1,25 mètre, ainsi que des courbes de l'évolution journalière des paramètres climatiques. Les dix-huit scénarios simulés sont divisés en deux séries telles qu'elles ont été décrites dans le chapitre précédent, et les résultats sont analysés en fonction de ces deux catégories.

Les cartes des paramètres climatiques (vitesse du vent, température de l'air et température de surface) pour les dix-huit scénarios seront discutées à deux moments précis, soit à 14h et à 22h.

Ensuite, une comparaison entre les deux catégories est réalisée en analysant l'évolution quotidienne des paramètres microclimatiques en un point central de la placette, telle que décrite dans la **Figure VI. 1**. Pour cette analyse, des courbes sont présentées pour six scénarios choisis dans chaque catégorie, à savoir le cas réel, le bloc fermé, le bloc isolé, le bloc linéaire orienté 135°/ 315°, le bloc en L orienté Nord- Sud et le bloc en U orienté vers l'est. Les courbes relatives à la vitesse du vent pour les hauteurs de 17 mètres et 30 mètres sont regroupées dans un même graphique, tandis que les courbes relatives à la température de l'air et de surface sont présentées séparément, avec deux graphiques pour chaque forme (hauteurs de 17 mètres et 30 mètres), accompagnées de la courbe du rayonnement solaire.

Enfin, une analyse statistique est effectuée à partir des données recueillies au point A, où un modèle statistique est établi à l'aide d'une régression linéaire afin d'évaluer l'impact du facteur de vue du ciel (FVC) sur la température de l'air et de surface à 10 heures, 14 heures et 22 heures.



**Figure VI. 1:** Repérage du point A au milieu de la placette. *Source* : Auteur.

### III. Variation journalière des paramètres climatiques

#### III.1 Variation de la vélocité du vent

L'intensité de l'écoulement d'air joue un rôle important dans la régulation des échanges convectifs qui se produisent à l'échelle de la canopée urbaine, et la chaleur échangée entre l'air, la végétation, les bâtiments et les personnes. La forme urbaine peut changer considérablement le régime aérodynamique en milieu urbain, l'existence d'une barrière augmente la rugosité superficielle et, par conséquent, la hauteur de la couche limite anémométrique, la disposition

spécifique des rues et des bâtiments peuvent créer une direction préférentielle de l'air avec des gradients anémométriques élevés dans les régions resserrées. Cette partie de ce chapitre nous permet d'examiner le comportement aéraulique journalier des formes proposées.

### III.1.1 Impact de la modification de la forme

Il convient de souligner que pour la présente étude, les simulations ont été menées pour des vents en provenance du Nord-Ouest ( $250^\circ$ ) à une vitesse de 5 m/s. Les cartes de vitesse du vent de la première série de scénarios, qui ont exploré la première technique de réduction de la chaleur impliquant des modifications de la forme et de l'orientation des blocs, sont présentées dans les **Figures VI. 2** et **VI. 3**.

Les simulations ont révélé que le comportement du vent est relativement stable tout au long de la journée pour chaque scénario, avec des variations légères. Les scénarios ayant des formes fermées, tels que les blocs fermés ou ceux fermés par rapport à un angle de  $250^\circ$  (l'orientation des vents dominants) tels que le bloc en U orienté Nord-Ouest et le bloc en L orienté Nord/Sud, génèrent des vitesses du vent relativement faibles, allant de 0,5 m/s à 2 m/s. Cette faible vitesse est due à l'effet de la rugosité urbaine, qui est amplifié par les bâtiments à forme fermée, qui peuvent causer des blocages de vent et des turbulences au milieu de la placette (l'effet turbulent est remarquable pour le bloc fermé et le bloc en L orienté N/S avec une vitesse atteignant 2.5m/s).

En revanche, les blocs ouverts vers le sens d'incidence des vents citant : les blocs en forme de L orientés est/Ouest et les blocs en forme de U orientés sud-ouest, ainsi que le cas réel, ont généré des zones de fortes vitesses du vent, atteignant jusqu'à 6 m/s au niveau des angles d'incidence. Cette augmentation de vitesse est due à l'effet Venturi<sup>1</sup>.

Les blocs linéaires ayant une orientation nord-ouest/sud-est, étant parallèles à l'écoulement de l'air, génèrent un effet de canalisation<sup>2</sup> qui conduit à des valeurs maximales allant de 3 m/s à 3,5 m/s. Il est à noter que pour ce type de bloc, une zone de forte vélocité du vent a été observée, créée par l'obstruction entre les vents venant du Nord-Ouest et le bloc linéaire orienté face à cette direction (car le canyon urbain n'est pas totalement parallèle aux vents dominants).

Le bloc isolé se distingue nettement des autres. Sa forme éclatée permet une pénétration du vent entre les blocs, créant ainsi les vitesses de vent les plus élevées, dépassant

<sup>1</sup> Cf. Chapitre III.

<sup>2</sup> Cf. Chapitre III.

4,5 m/s. Cette configuration génère des turbulences et une augmentation significative des vitesses entre les blocs, créant des conditions favorables pour la ventilation naturelle.

Selon les études menées par le chercheur Oke, (1990), la présence d'un bâtiment isolé face à un flux d'air entraîne plusieurs phénomènes :

- Une pression relativement élevée est créée en raison de la force exercée par le vent contre la face de l'îlot où se trouve le bâtiment. Cette pression résulte de l'interaction entre le vent incident et la surface du bâtiment.
- Une zone de pression maximale se forme au niveau de la face centrale supérieure de l'îlot. Cela est dû à l'accumulation de l'air qui est dévié par la forme et la configuration du bâtiment, conduisant à une augmentation de la pression dans cette région précise.
- Des zones de basse pression se forment le long des bords de la façade du bâtiment, qui est exposée directement au vent incident. Ces zones de basse pression résultent de l'effet de déviation du vent autour du bâtiment et de la création d'un flux d'air turbulent.

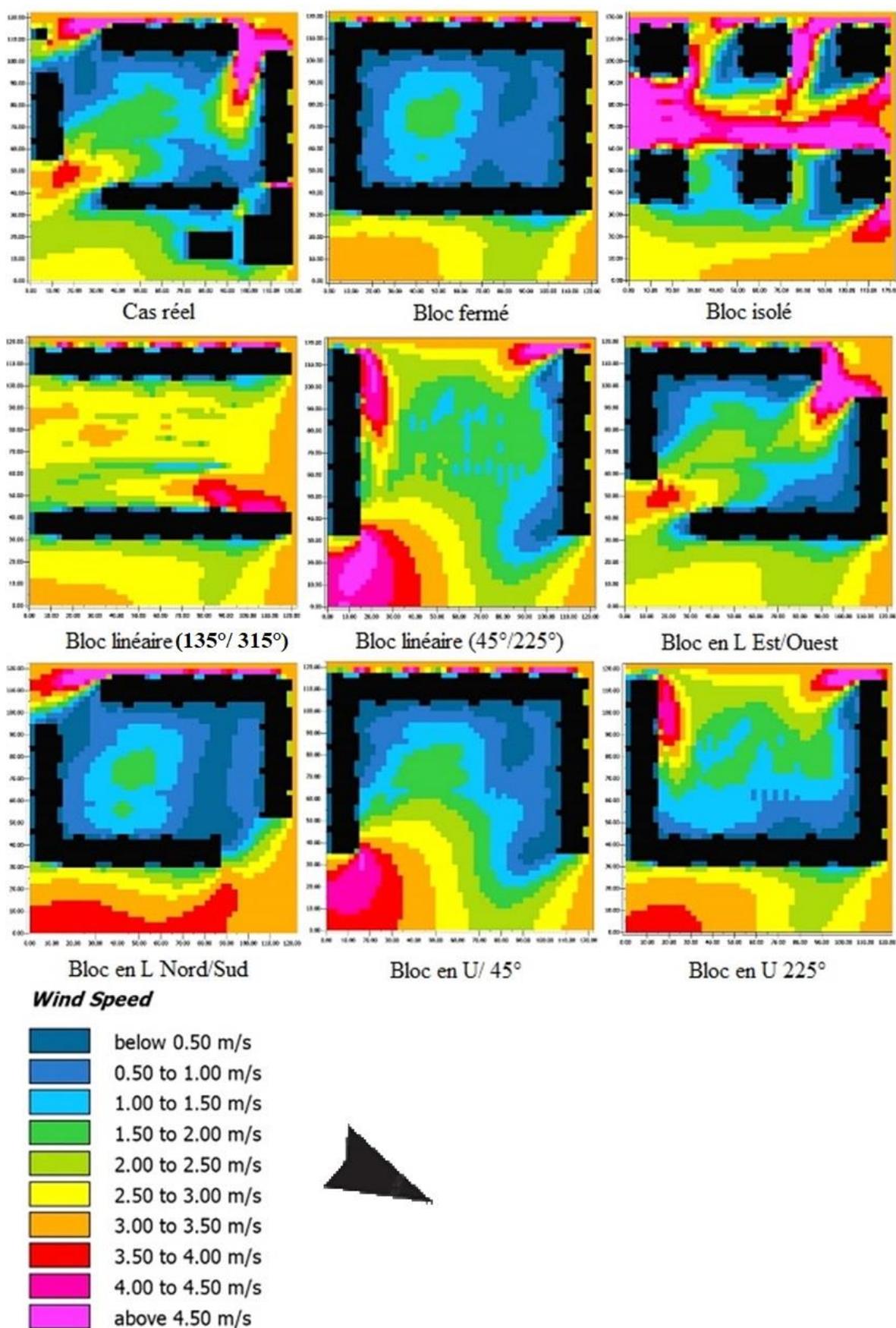


Figure VI. 2: Variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 14:00h. Source : Auteur.

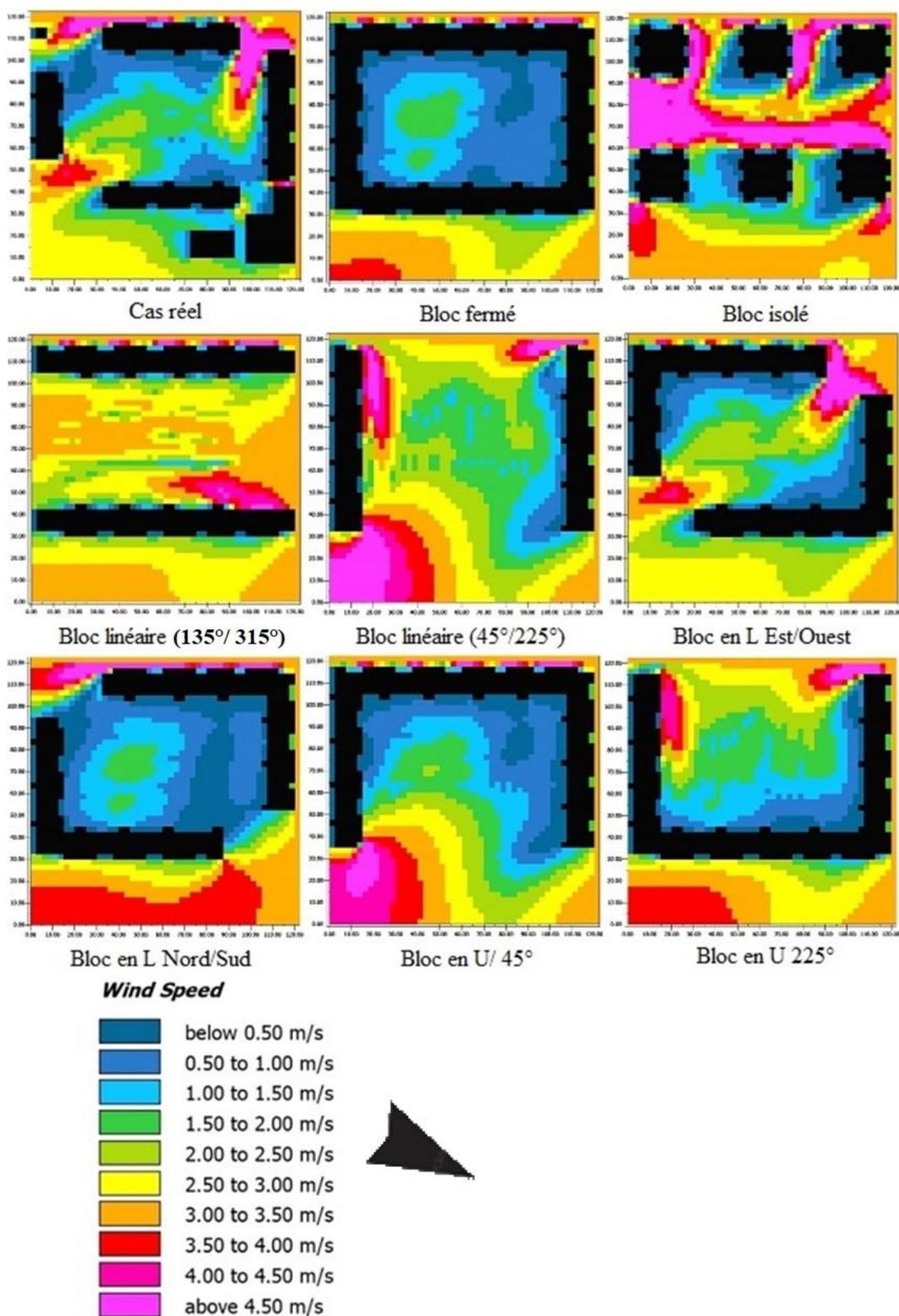


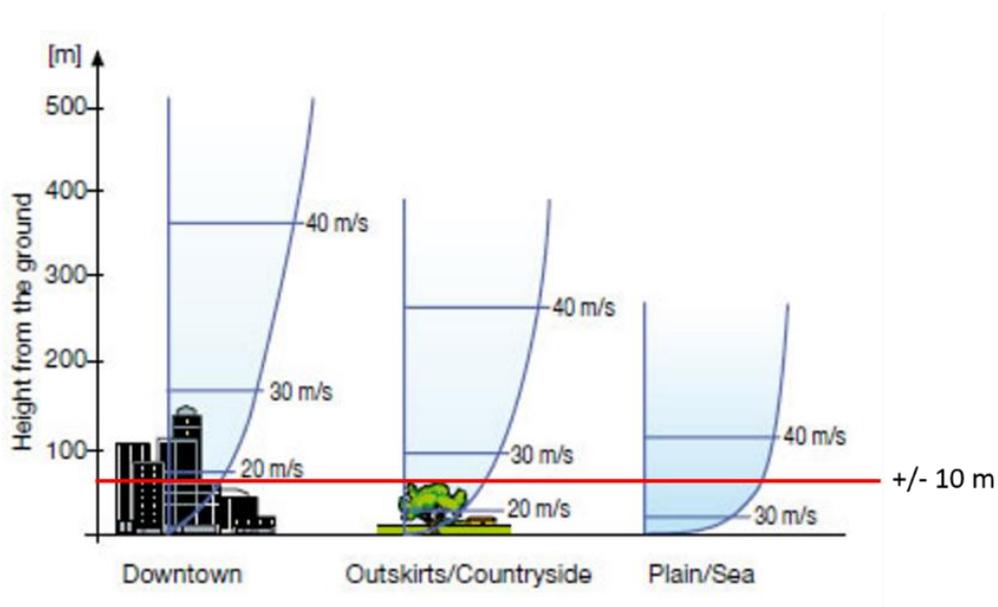
Figure VI. 3: variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 22:00h. *Source* : Auteur.

### III.1.2 Impact de l'augmentation de la hauteur

Les cartes de la vitesse du vent issues du logiciel ENVI-met pour la deuxième série des scénarios qui mettent en évidence l'impact de l'augmentation de la hauteur des bâtiments sur le régime aéroulque à 14h et 22h sont présentées dans les **Figures VI. 3** et **VI. 5**.

Les résultats montrent une diminution significative de la vitesse du vent pour la majorité des configurations testées. L'effet turbulent est modérément prononcé pour les blocs fermés et le bloc en L orienté Nord/Sud (-1m/s). Cependant, l'augmentation de la hauteur des bâtiments a également provoqué une augmentation de l'effet venturi au niveau des angles d'incidence associée à une augmentation de la vitesse dans ces zones à l'ordre de 1m/s. Les formes fermées du sens de l'écoulement d'air ont été associées à des vitesses relativement faibles, comprises entre 0,5 m/s et 1 m/s. En revanche, le scénario du bloc isolé avec une hauteur de 30 m a montré des valeurs de vitesse du vent supérieures, atteignant plus de 7 m/s.

Il est important de souligner que la densification des espaces diminue considérablement la vitesse à des hauteurs inférieures. Aussi, La forme des blocs ainsi que leur orientation par rapport à la direction de l'écoulement d'air sont également des facteurs déterminants. En revanche, les formes dispersées accélèrent cet écoulement dans la canopée urbaine. Les deux techniques proposées à savoir la modification de la forme et l'augmentation de la hauteur des bâtiments, ne présentent pas les mêmes valeurs de vitesse de vent à une hauteur de 1,25 m en raison de la différence de rugosité à des hauteurs différentes comme décrites sur la **Figure VI. 4**.



**Figure VI. 4:** Profil vertical du vent dans des rugosités différentes. *Source* : (Nelen & Schuurmans., 2023).

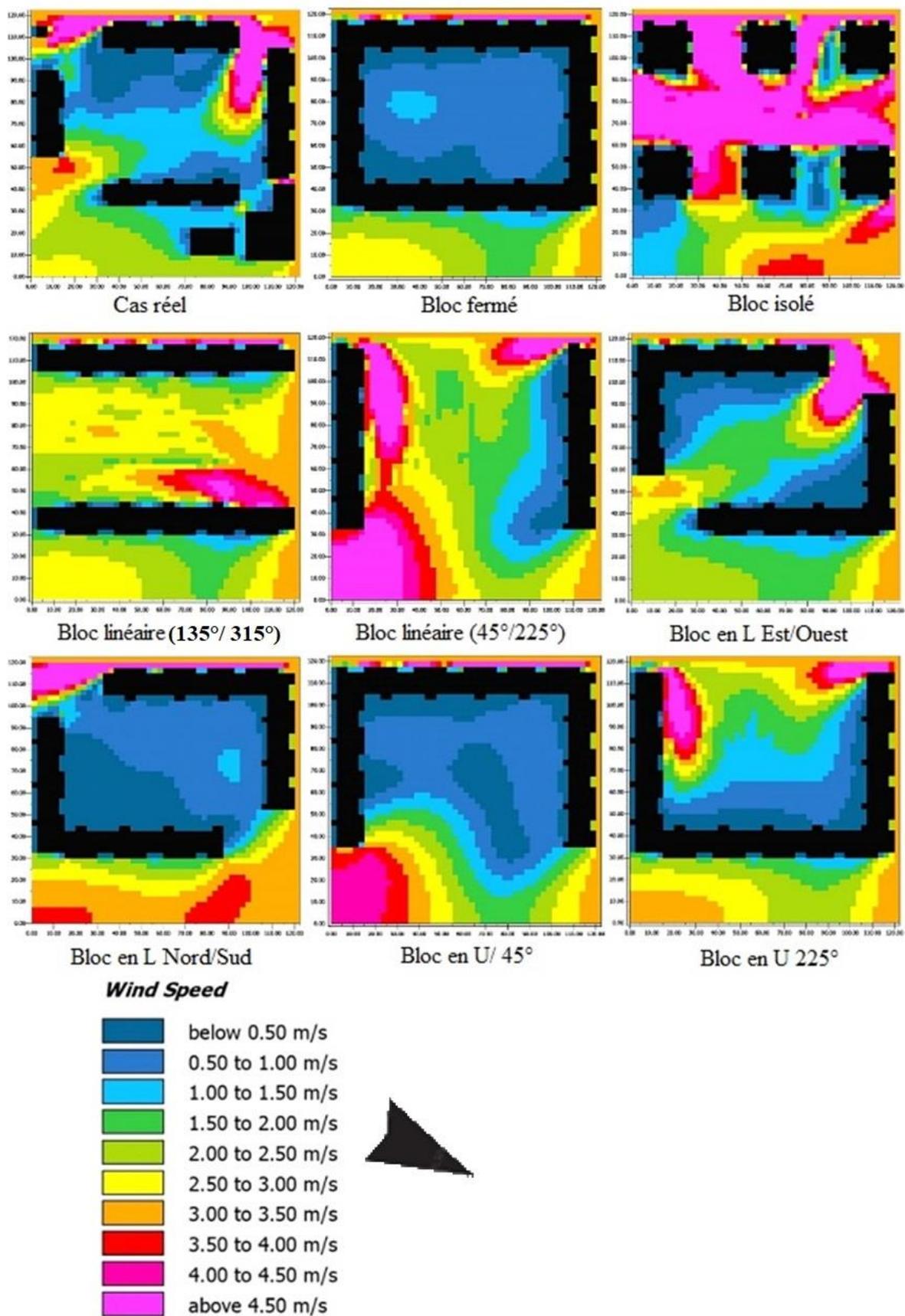


Figure VI. 5: Variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 14:00h. Source : Auteur.

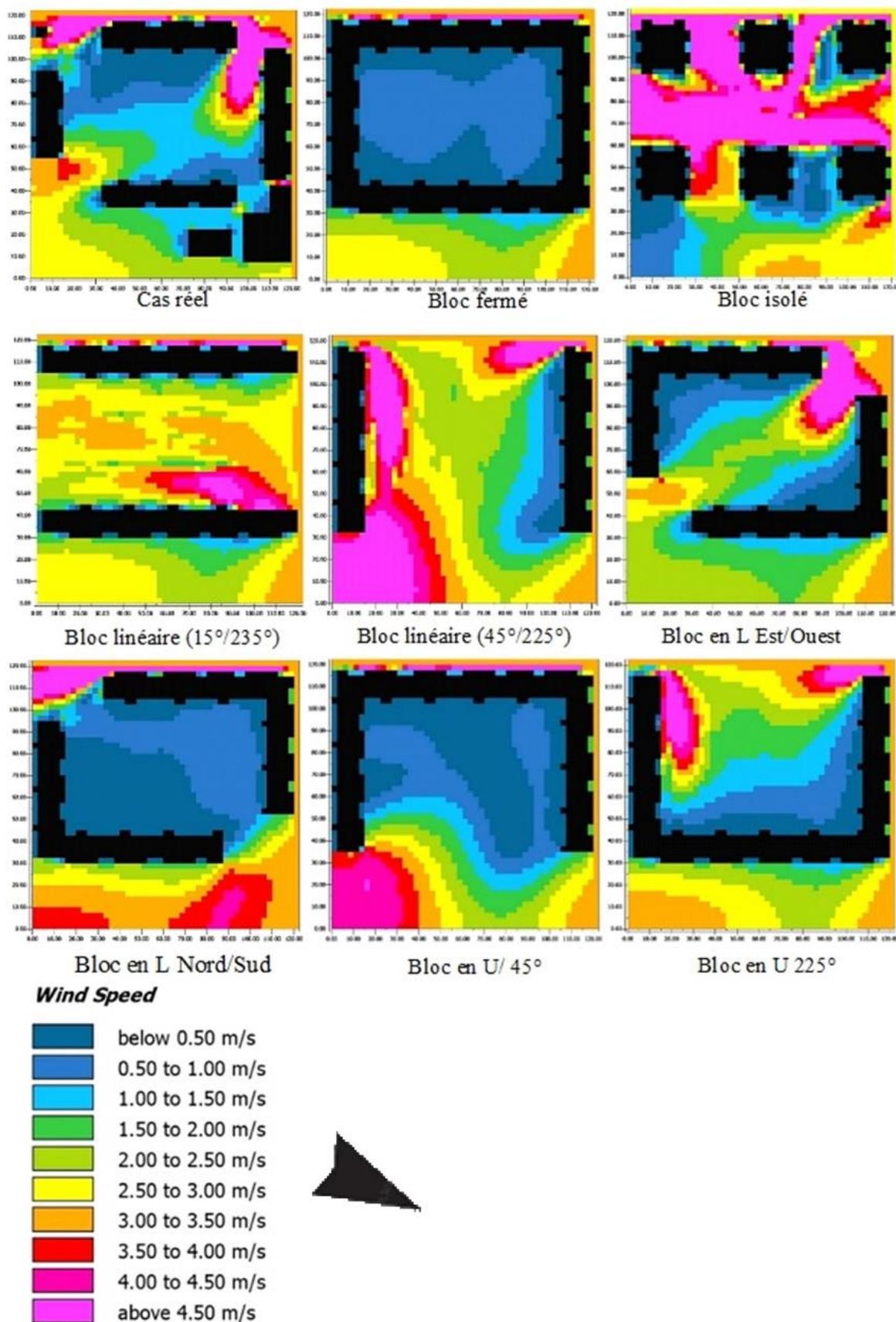


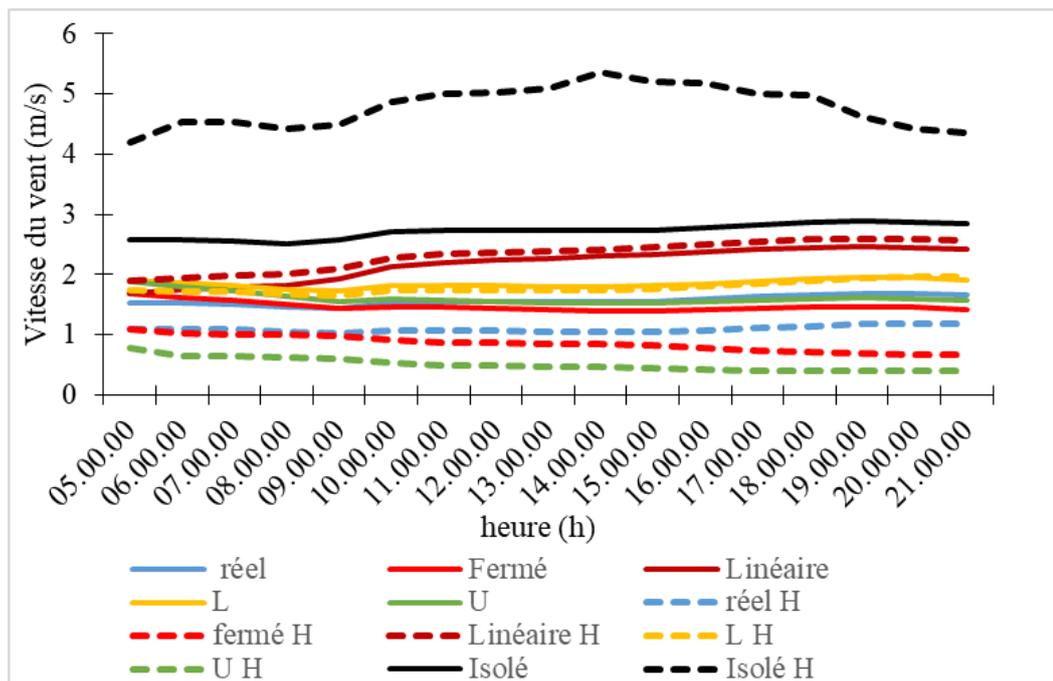
Figure VI. 6: Variation de la vitesse du vent à une hauteur de 1.25m pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 22:00h. Source : Auteur.

### III.2 Variation journalière de la vitesse du vent au point A et comparaison entre les deux modes de réduction de la température étudiés

Cette section de l'étude examine le comportement aéraulique quotidien de six scénarios spécifiques, en tenant compte de deux modes de réduction proposés. Les scénarios sélectionnés sont les suivants :

- Cas réel
- Bloc fermé
- Bloc isolé
- Bloc linéaire orienté (135°/315°)
- Bloc en L orienté Nord/Sud
- Bloc en U orienté (45°)

La **Figure VI. 7** représente la variation journalière de la vitesse du vent au point A pour les blocs choisis



**Figure VI. 7:** Courbe de variation de vitesse du vent captée au point A pour les deux séries de simulation. **Source :** Auteur.

Les courbes montrent que pour le point A les vitesses du vent diminuent significativement en augmentant la hauteur des bâtiments pour les scénarios suivants : le bloc fermé, le cas réel et le bloc en U. Cette tendance est présente pour chaque forme de bloc, même si l'écart diffère entre les deux modes de réduction de la température examinés.

Pour les « blocs linéaires » et « les blocs en L », ainsi que pour le « cas réel » et le « bloc fermé », l'écart entre les blocs de 17 mètres et de 30 mètres est relativement faible, avec des variations de vitesse entre 0,2 et 0,5 m/s. En revanche, pour le « bloc en U », l'écart est plus important (1,5 m/s). Le bloc isolé présente une réponse différente, où le bloc d'une hauteur de 30 m génère des vitesses de vent plus élevées par rapport au bloc d'une hauteur de 17 mètres (l'écart est d'environ 2 m/s).

En examinant les résultats et en comparant les scénarios, la vitesse du vent est faible dans les formes fermées. En d'autres termes, plus la forme est ouverte, plus elle est exposée au vent. De plus, l'orientation des formes joue également un rôle important. À titre d'illustration, bien que la forme en L soit une forme ouverte, le point A est protégé du vent du Nord-Ouest.

En faisant une lecture du facteur de vu du ciel entre les scénarios, on constate que le FVC n'est pas déterminant pour la caractérisation du milieu aéraulique, le « bloc isolé », présentant un FVC de 0,76, génère des vitesses de vent plus élevées (entre 2,5 et 3 m/s) que le « bloc fermé » ayant le même FVC, qui présente des vitesses plus faibles (entre 1 et 1,5 m/s). Cette tendance est également observée entre le « bloc linéaire » et le « cas réel ».

Selon les recherches de Gouizi (2003), dans les couches basses de l'atmosphère, c'est-à-dire de 0 à 300 mètres, la présence de divers éléments sur le sol tels que la végétation et les constructions crée une rugosité qui engendre des forces de frottement. Ces forces de frottement ont pour effet de diminuer la vitesse moyenne du vent et de générer une agitation importante connue sous le nom de turbulence. En contraste avec l'écoulement laminaire qui se produit au-dessus de la hauteur de rugosité, où le mouvement de l'air se déplace de manière rectiligne, la turbulence se caractérise par un mouvement irrégulier et chaotique de l'air.

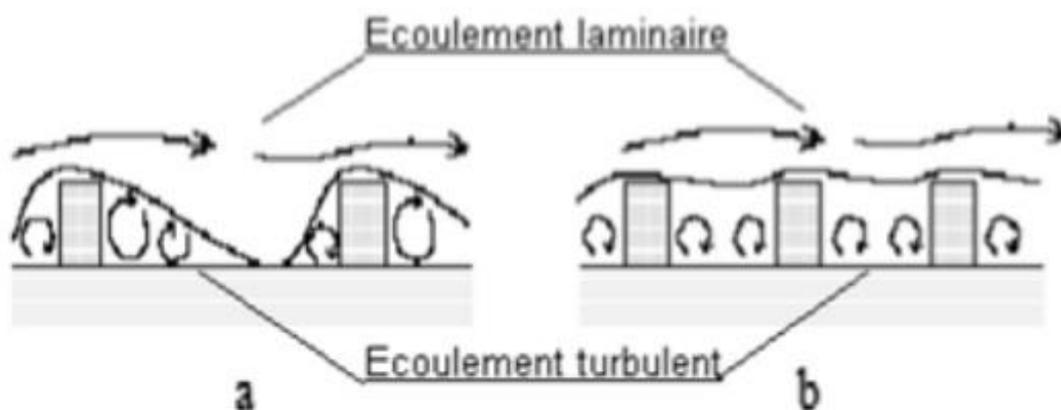


Figure VI. 8: Comportement du vent en fonction de l'espace entre les constructions. Source : (Gouizi, 2003).

### III.3 Variation de la température de surface Ts

#### III.3.1 Impact de la modification de la forme

Les cartes de température de surface pour la première série des scénarios sont présentées sur les *Figure VI. 9* et *Figure VI. 40*. L'analyse de ces cartes révèle que la température de surface (Ts) est influencée de manière significative par le type de matériau utilisé.

À 14h, il est observé que les routes en asphalte, ayant un albédo d'environ 0,15, entraînent des températures de surface élevées, variant entre 46°C et 48°C. En revanche, les surfaces en pavé de béton gris, avec un albédo compris entre 0,2 et 0,25, présentent des températures de surface plus basses, entre 38°C et 40°C. La température de surface est également influencée par l'exposition aux rayons solaires. L'ombre projetée sur le sol par les bâtiments peut réduire considérablement la température de surface, jusqu'à 4°C. Cette réduction est particulièrement remarquable dans le cas du bloc isolé et du bloc linéaire orienté nord-ouest/sud-est, où l'ombre des bâtiments crée des températures minimales avec un écart pouvant atteindre 4°C.

À 22h, les scénarios présentent un comportement différent. L'impact des matériaux utilisés est moins prononcé, et les formes ouvertes et aérées, comme le bloc isolé et le bloc linéaire, affichent les températures de surface les plus basses. Dans ces scénarios, l'effet du matériau utilisé est faible, avec une différence de température de surface de seulement 2°C entre l'asphalte et le pavé en béton. Les formes semi-ouvertes, telles que le cas réel, les deux blocs en U génèrent des températures légèrement plus élevées (+2°C) en raison de la faible ventilation urbaine.

Une forte corrélation est remarquée entre les cartes de températures de surface et celles de la vitesse du vent. Les zones de température de surface relativement basse se trouvent non seulement dans les zones ombragées, mais aussi dans les espaces caractérisés par de faibles vitesses de vent à 14h et de fortes vitesses à 22h.

Nos résultats sont cohérents avec ceux d'autres chercheurs. (Athamena, 2012) a démontré, pour trois quartiers différents dans le contexte européen, que la température de surface est étroitement liée à l'albédo des matériaux et à l'exposition au rayonnement solaire. Des similarités ont été aussi trouvées dans la même étude entre les cartes de températures de surface et les cartes de vitesse du vent.

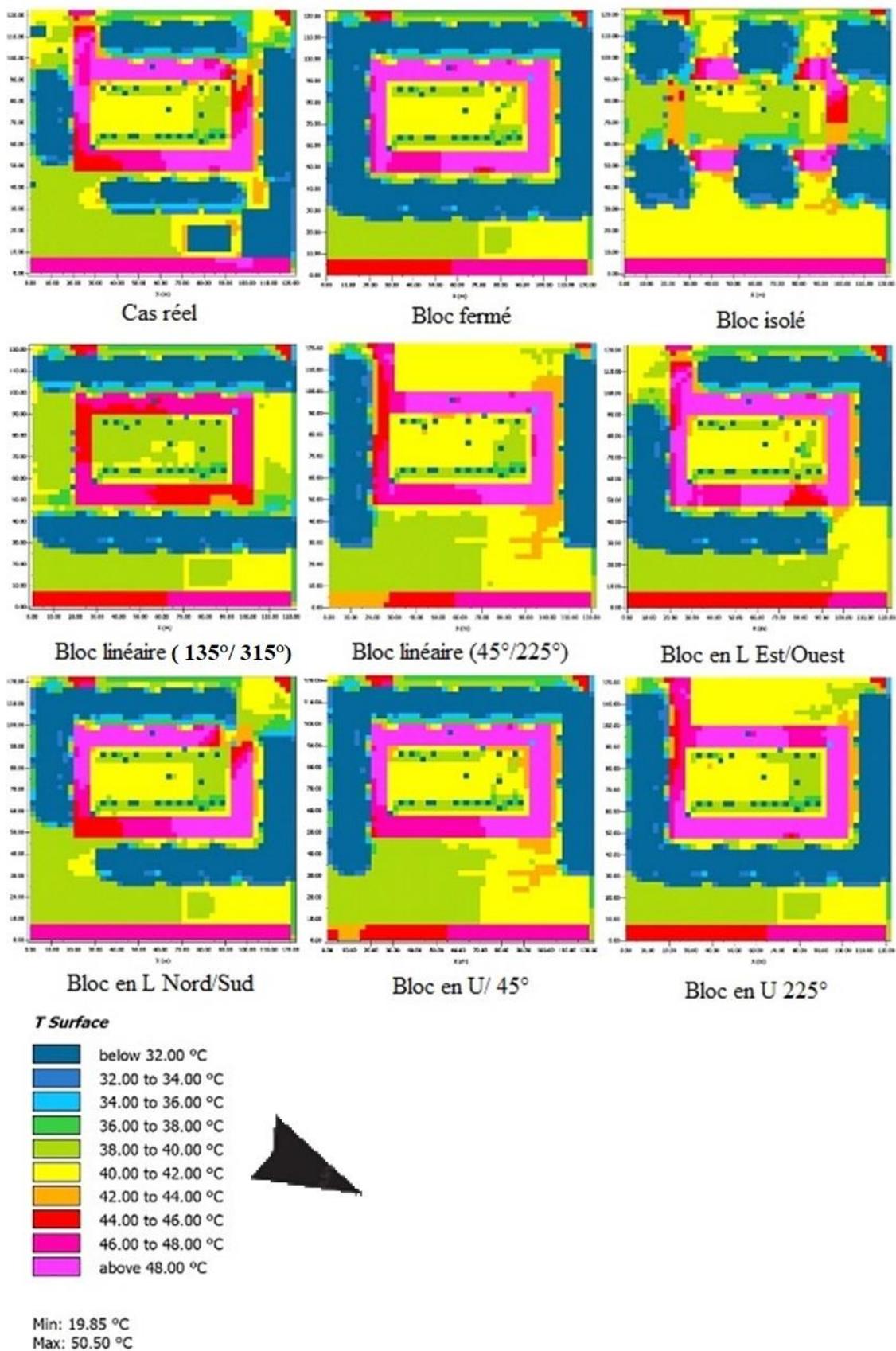


Figure VI. 9: Variation de la température de surface du sol  $T_s$  pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 14:00h. *Source* : Auteur.

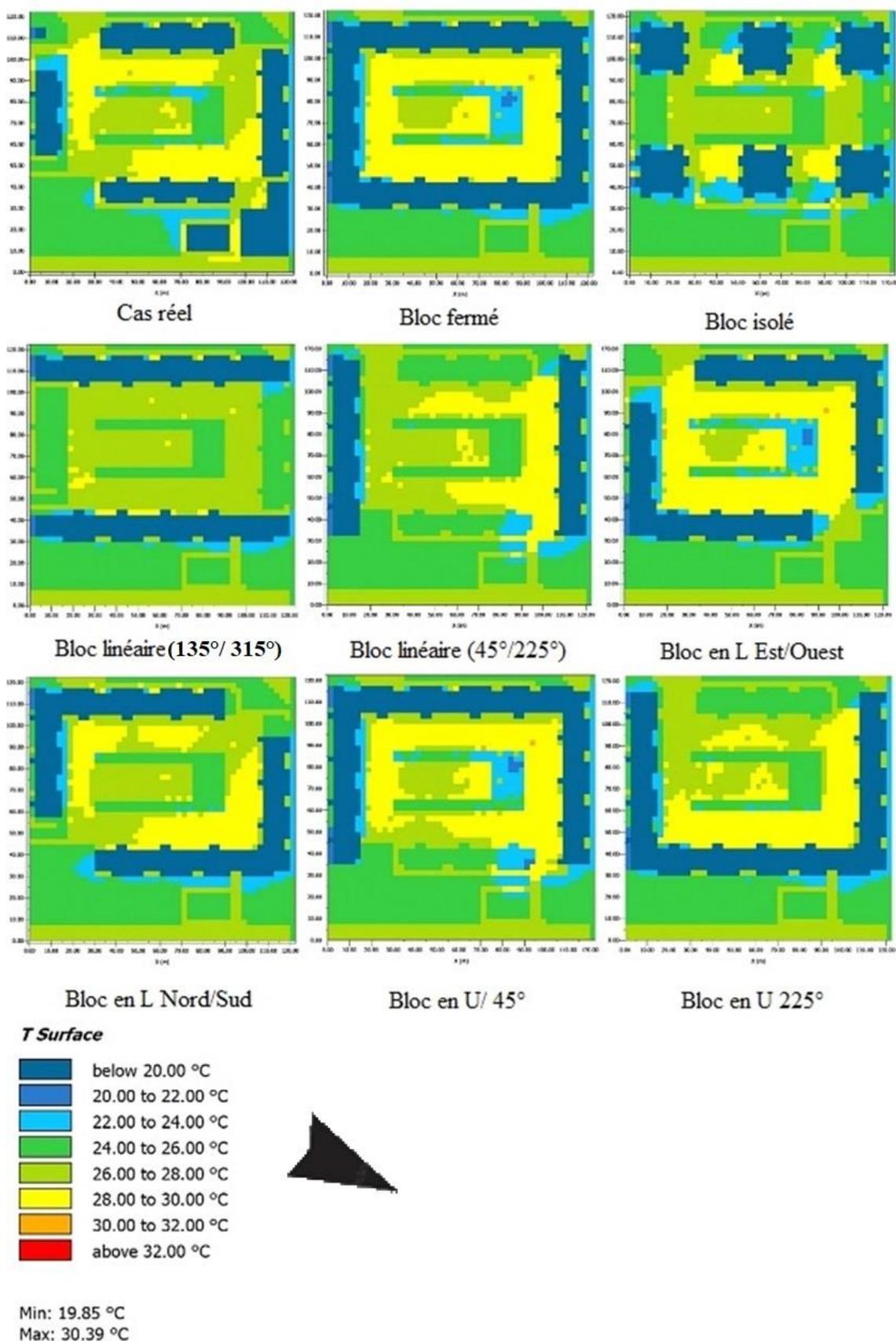


Figure VI. 10: Variation de la température de surface du sol  $T_s$  pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 22:00h. Source : Auteur.

### III.3.2 Impact de l'augmentation de la hauteur

Les *Figure VI. 11* et *Figure VI. 52* présentent la température du sol pour la deuxième technique de réduction de la chaleur, qui consiste à augmenter la hauteur des bâtiments. L'observation de ces cartes permet de constater que l'augmentation de la hauteur des bâtiments entraîne la création de zones ombragées supplémentaires, ce qui se traduit par une diminution de la température de surface de plus de 2°C. Les surfaces en matériaux à faible albédo, telles que l'asphalte, atteignent des températures de surface maximales de plus de 46°C. Pendant la journée, les surfaces exposées directement aux rayons solaires présentent des températures de surface plus élevées.

Après le coucher du soleil, les surfaces à fort albédo génèrent des températures de surface plus basses en absence du rayonnement solaire direct, tandis que les surfaces en pavé de béton gris et en asphalte présentent des températures similaires. En particulier, le scénario du bloc isolé se distingue par des températures de surface plus basses, avec une réduction de près de 4°C par rapport aux autres scénarios simulés.

Il convient de souligner que l'influence des propriétés des matériaux sur la température de surface présente une variation plus marquée après le coucher du soleil par rapport à celle observée dans la première série de scénarios, en raison d'un phénomène de ventilation urbaine réduite. En effet, les caractéristiques thermiques des matériaux et la ventilation urbaine ont un impact significatif sur la manière dont la chaleur est dissipée après une journée ensoleillée.

Le facteur de vue du ciel joue un rôle crucial dans l'exposition aux rayons solaires. En augmentant la hauteur des bâtiments, le facteur de vue du ciel diminue, limitant ainsi la pénétration du rayonnement solaire et créant davantage de zones ombragées. En conséquence, cela entraîne une diminution de la température de surface pendant la journée, car une partie du rayonnement solaire est bloquée.

Cependant, après le coucher du soleil, dans cette deuxième série de scénarios, la ventilation urbaine diminue, ce qui entrave la dissipation rapide de la chaleur emmagasinée pendant la journée. En conséquence, les températures de surface demeurent relativement élevées même après le coucher du soleil. Les matériaux à forte capacité thermique utilisés dans cette configuration urbaine peuvent également contribuer à maintenir les températures de surface à des niveaux moyennement élevés pendant cette période.

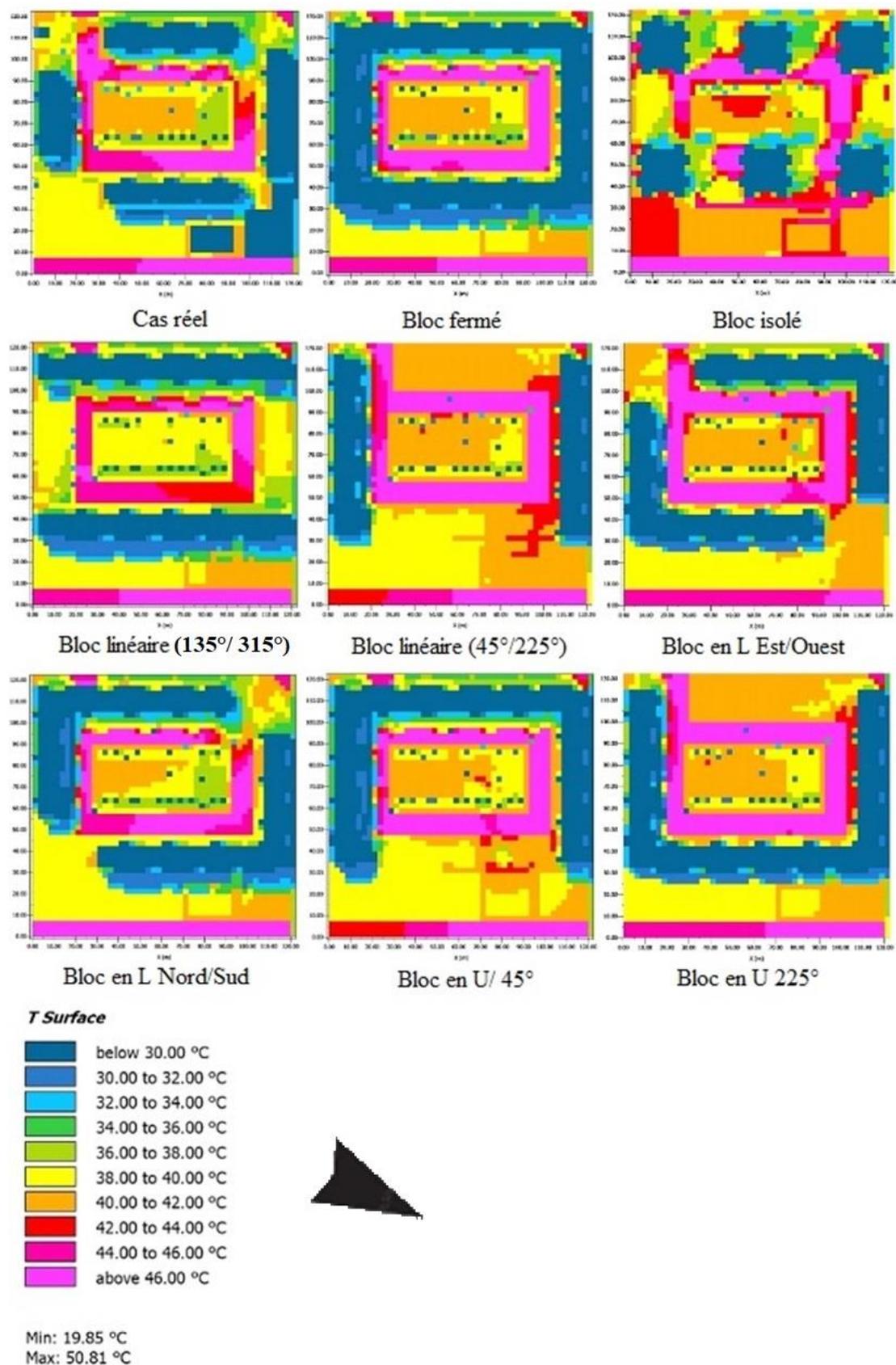


Figure VI. 11: Variation de la température de surface du sol  $T_s$  pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 14:00h. *Source* : Auteur.

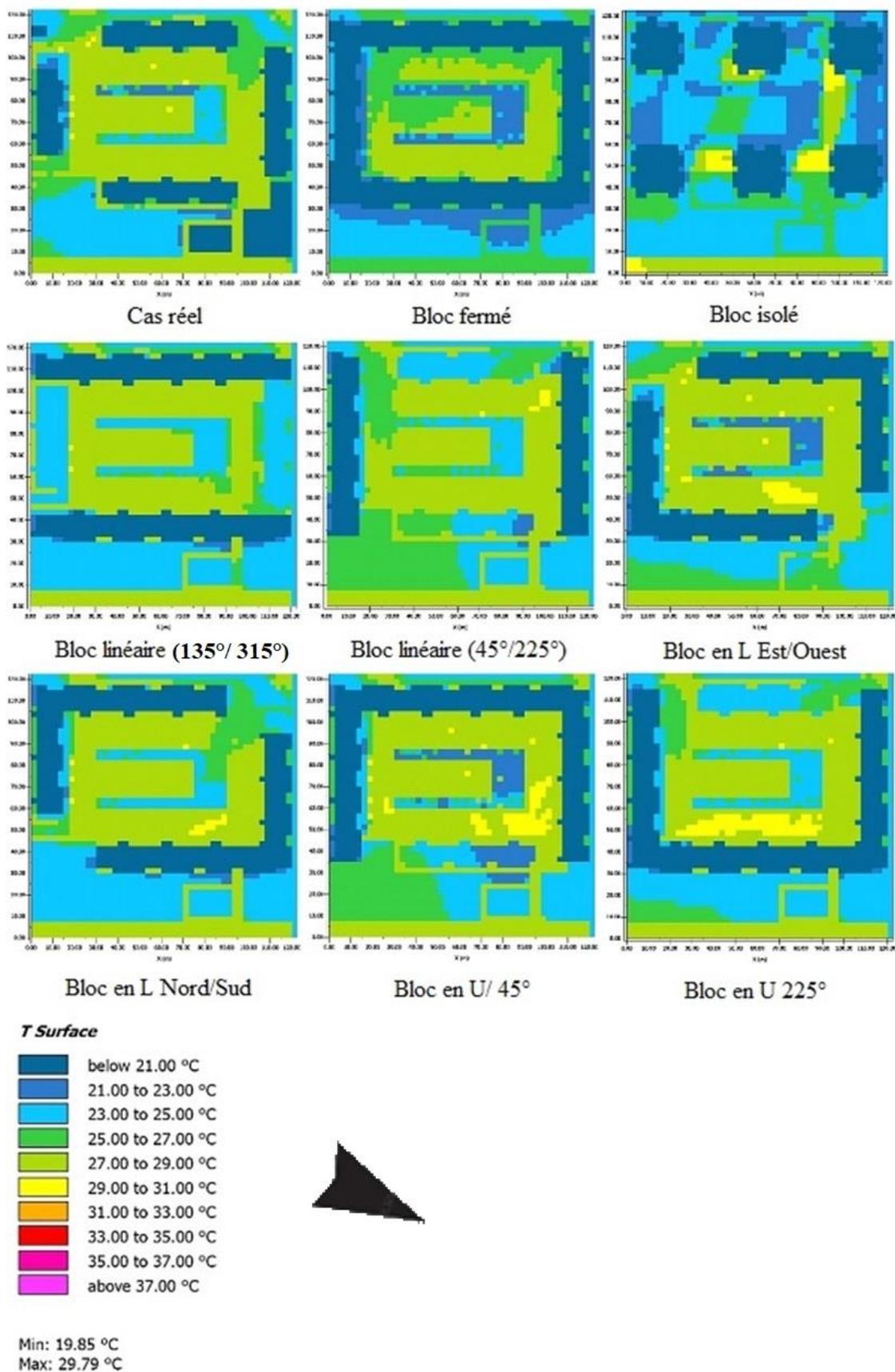


Figure VI. 12: Variation de la température de surface du sol  $T_s$  pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 22:00h. Source : Auteur.

### III.4 Variation journalière de la température de surface $T_s$ au point A et comparaison entre les deux modes de réduction de la température étudiés

La *Figure VI. 63* présente les variations quotidiennes de la température de surface pour différents scénarios sélectionnés, en relation avec les graphiques représentant les fluctuations du rayonnement solaire à courtes longueurs d'onde capté au point A. Les courbes du rayonnement solaire augmentent progressivement jusqu'à atteindre un pic de  $700 \text{ W/m}^2$  à 13h, correspondant à l'altitude maximale du soleil pendant la journée.

Le cas réel, le bloc fermé, les blocs linéaires et les blocs en L d'une hauteur de 17 m, bénéficient de plus d'heures d'ensoleillement que les mêmes scénarios avec une hauteur de 30 m. Cette différence s'explique par la diminution du facteur de vue du ciel à mesure que la hauteur des blocs augmente. En revanche, le bloc en U d'une hauteur de 17 m reçoit les rayons solaires au même moment que le bloc d'une hauteur de 30 m en raison de sa forme ouverte vers l'est. Cependant, le soir, le bloc d'une hauteur de 30 m bloque les rayons solaires et empêche leur pénétration au point A.

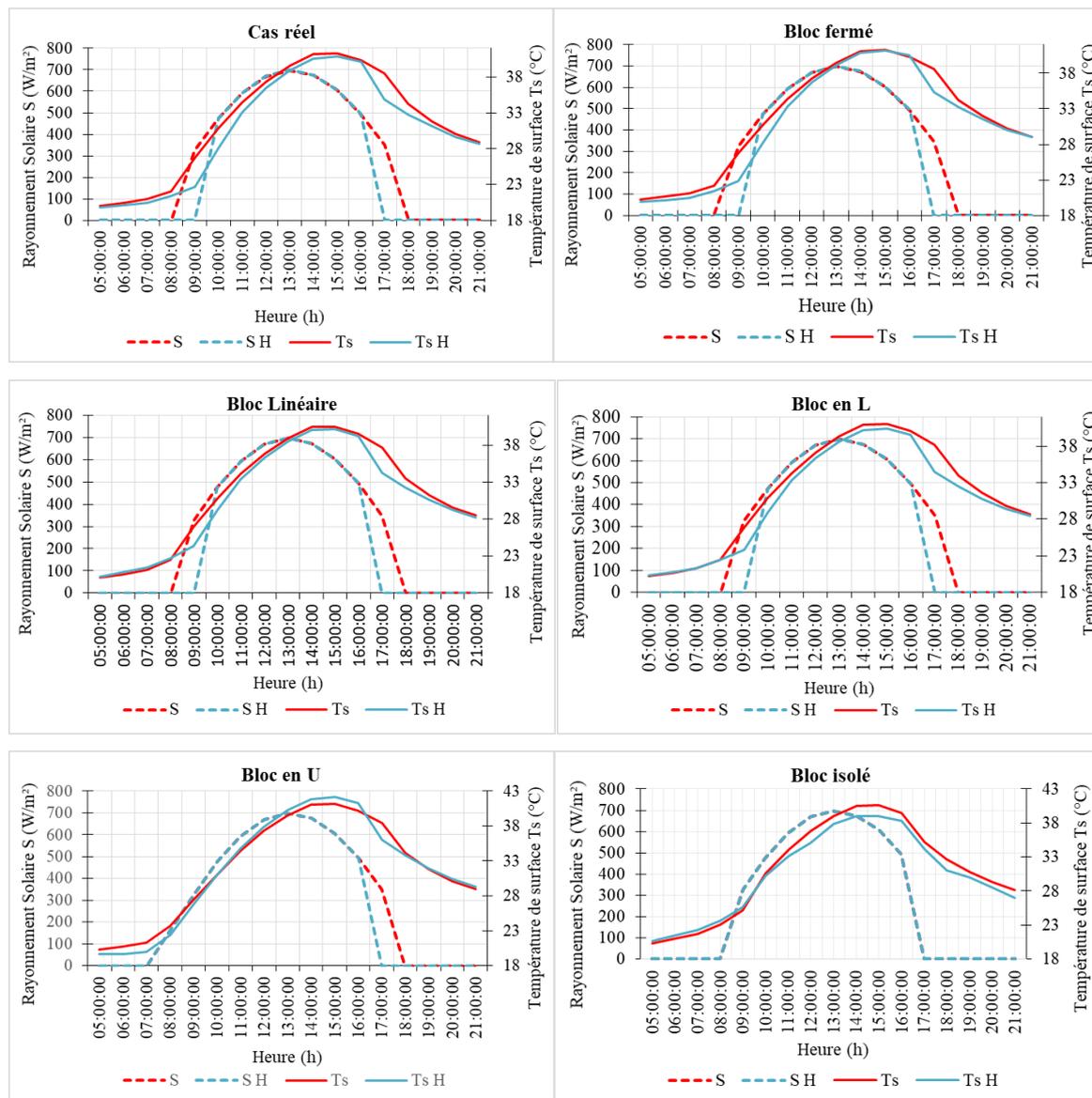
Le point A, situé au sein du bloc singulier, est exposé au même niveau de rayonnement solaire pour les deux séries de blocs étudiées. Cependant, il est observé que la température de surface du bloc ayant une hauteur de 17 m est plus élevée que celle du bloc d'une hauteur de 30 m. Cette disparité peut être expliquée par l'influence bénéfique de la ventilation, qui est plus significative pour le bloc isolé d'une hauteur de 30 m.

La différence de température de surface entre les deux blocs est attribuée aux caractéristiques de ventilation présentes dans leur environnement. Le bloc d'une hauteur de 30 m bénéficie d'une vitesse du vent plus élevée, ce qui favorise une meilleure dispersion de la chaleur accumulée. En conséquence, la température de surface du bloc de 30 m de hauteur est maintenue à des niveaux plus bas grâce à ce phénomène de refroidissement provoqué par la ventilation plus active.

Les courbes de températures de surface augmentent progressivement pour atteindre leurs valeurs maximales. On observe un écart de température entre les deux modes de réduction de la température pour chaque forme urbaine entre 8h et 9h, ainsi qu'entre 17h et 18h. Cela est dû au fait qu'à ces heures, le point A des blocs d'une hauteur de 17 m est exposé au soleil, tandis que le point A des blocs d'une hauteur de 30 m est ombragé.

Contrairement aux courbes du rayonnement solaire, les courbes de la température de surface ne sont pas symétriques en raison de la chaleur emmagasinée par la surface urbaine, qui

est amplifiée par l'albédo et l'inertie thermique des matériaux, ainsi que par l'exposition aux rayons solaires et à la vitesse d'écoulement de l'air.



**Figure VI. 13 :** Variation journalière de la température de surface et du rayonnement solaire mesurés à 1.25m au point A pour les Blocs : Cas réel, fermé, linéaire, en L, en U et isolé pour des hauteurs de 17m et 30m. S : rayonnement solaire pour une hauteur de 17m, SH : rayonnement solaire pour une hauteur de 30m, Ts : température de surface pour une hauteur de 17m, TsH : température de surface pour une hauteur de 30m. **Source :** Auteur.

### **III.5 Variation de la température de l'air $T_a$**

Dans cette section, il s'agit d'analyser l'effet des interventions proposées en termes de modification de la forme des blocs et d'augmentation de la hauteur, sur le comportement de la température de l'air  $T_a$ .

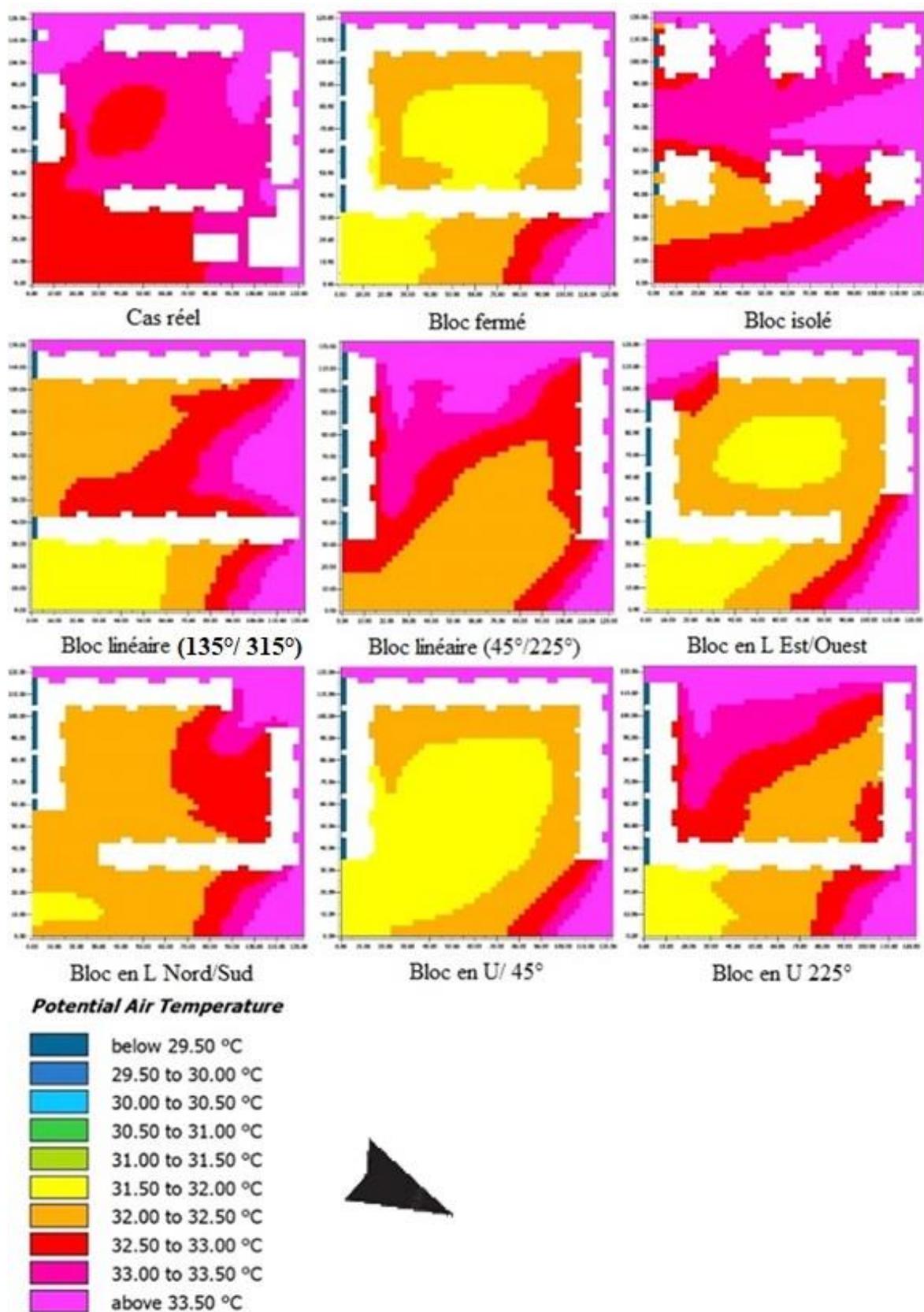
#### *III.5.1 Impact de la modification de la forme des blocs*

Dans cette série d'études, des modifications ont été apportées aux bâtiments afin d'analyser l'impact de l'ouverture, de la fermeture et de l'orientation de l'espace sur les températures de l'air ( $T_a$ ). Les résultats ont été évalués à l'aide de cartes de température de l'air ( $T_a$ ) mesurée à une hauteur de 1,25 mètre. Les variations des températures de l'air ont été observées à 14h00 et à 22h00 pour neuf configurations de blocs simulées.

À 14h00, les températures de l'air augmentent et atteignent des niveaux critiques pour certaines configurations, notamment le bloc isolé, le scénario réel et les deux blocs linéaires, avec des températures dépassant 33,5°C. À cette heure, l'écart de température entre les différentes configurations est le plus important, dépassant 2°C. Le bloc fermé, le bloc en forme de L orienté nord-sud et le bloc en forme de U orienté est affichent les valeurs les plus basses, situées entre 31,5°C et 32,5°C. Les températures les plus basses sont observées au centre de la placette des formes fermées et semi fermées, expliquées par un refroidissement dû à l'effet turbulent.

Après le coucher du soleil (à 22h00), les températures de l'air dans la canopée urbaine sont légèrement plus élevées pour les configurations fermées ou celles avec une fermeture du côté de l'écoulement d'air, avec une différence de 0,5°C par rapport aux autres scénarios. Le bloc isolé se révèle être la configuration la plus performante à ce moment, en raison de son potentiel de ventilation lié à sa forme éclatée. Les configurations ouvertes dans le sens de l'écoulement d'air présentent des températures plus basses le long des couloirs de ventilation.

Les cartes de température montrent un comportement similaire aux cartes de vitesse du vent, avec des valeurs maximales de température correspondant aux zones présentant des valeurs élevées le soir. En revanche, le matin, la pénétration de l'air à l'intérieur de la configuration augmente la température et entraîne un effet de surchauffe.



**Figure VI. 14:** Variation de la température de l'air  $T_a$  pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 14:00h. *Source* : Auteur.

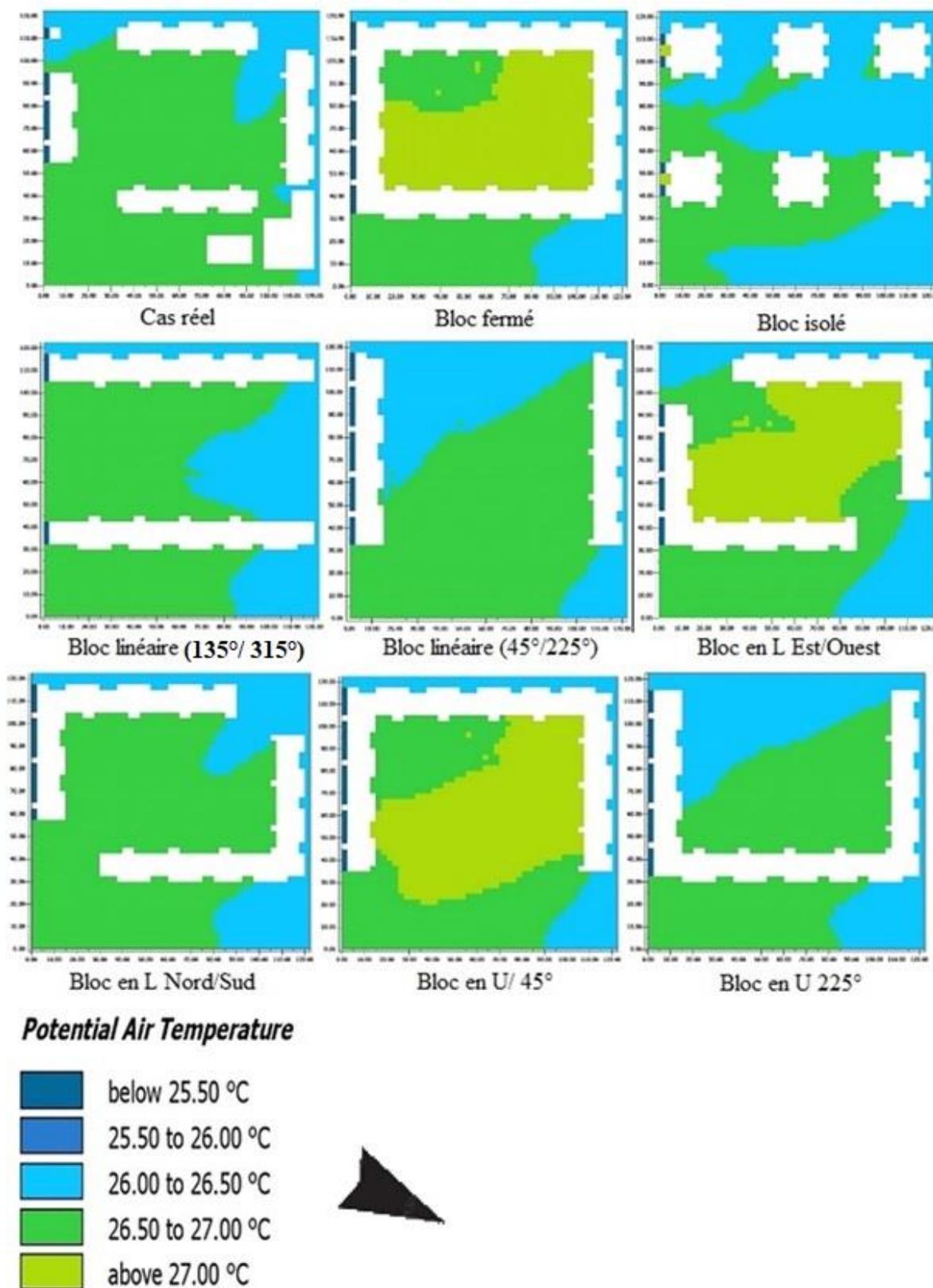


Figure VI. 15: Variation de la température de l'air  $T_a$  pour les neuf scénarios simulés pour la première technique de réduction de la chaleur (modification de la forme et de l'orientation des blocs urbains) à 22:00h. Source : Auteur.

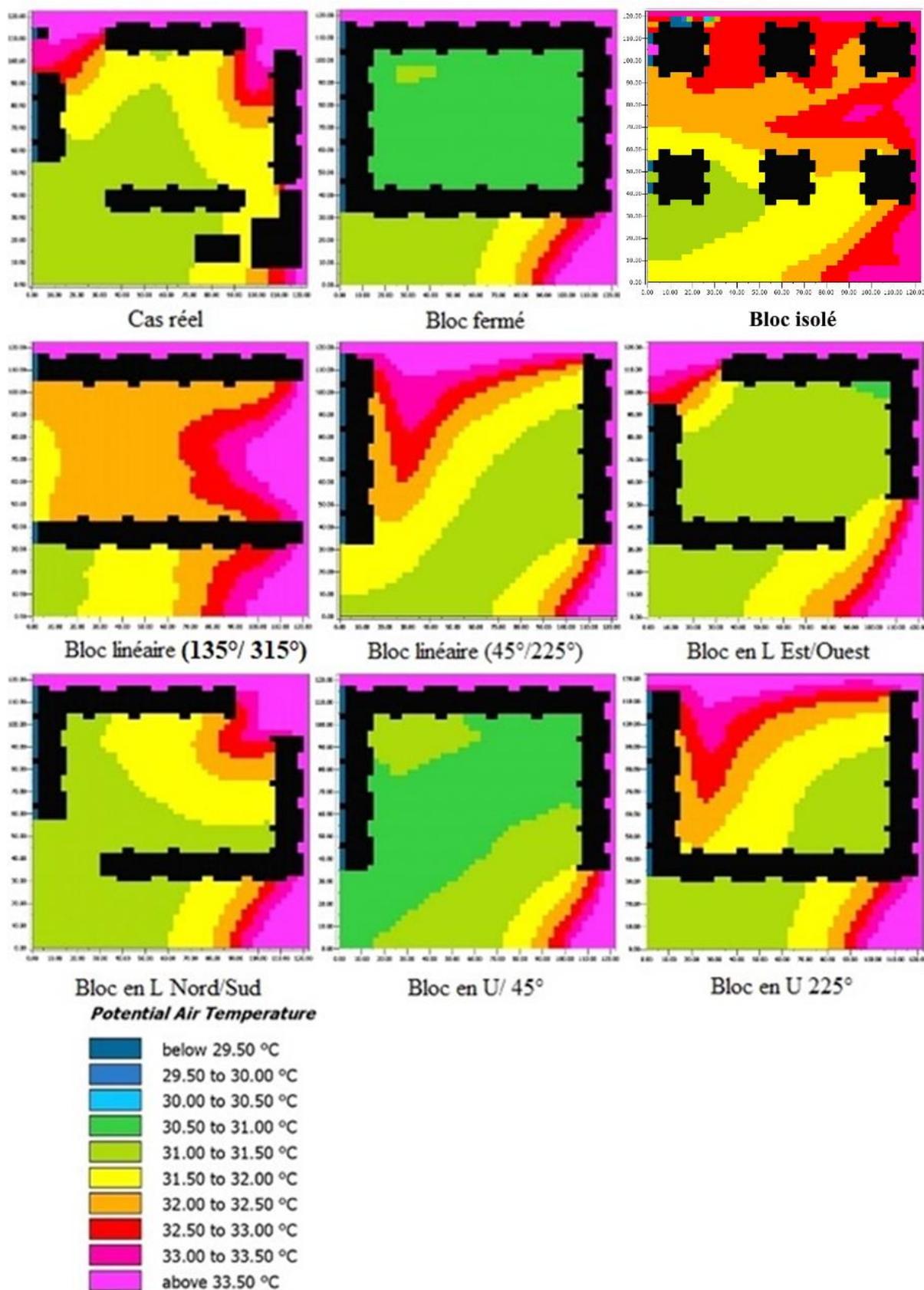
### *III.5.2 Impact de l'augmentation de la hauteur*

En augmentant la hauteur des bâtiments pour les neuf formes étudiées, des variations significatives de la température de l'air ont été observées à différentes heures de la journée. Les résultats indiquent qu'à 14h00, les températures de l'air mesurées à une hauteur de 1,25 mètre ont été réduites d'environ 1°C pour les blocs fermés et semi-fermés. Dans la deuxième série, la partie centrale de la placette a bénéficié de températures moins élevées, résultant de deux facteurs principaux. Tout d'abord, les bâtiments plus élevés ont créé un effet d'ombrage qui a réduit l'impact direct des rayons solaires. Deuxièmement, l'absence de formes fermées a évité la formation d'une turbulence, contribuant ainsi à un rafraîchissement supplémentaire par rapport à la première série.

Les scénarios linéaires ont également présenté un comportement thermique similaire à celui de la première série, mais avec des températures plus modérées. Les différences de température entre les différents scénarios étaient plus marquées, atteignant parfois jusqu'à 3°C.

Cependant, après le coucher du soleil, les blocs isolés et les blocs linéaires orientés à 135°/315° ont enregistré les températures les plus basses. Conformément aux attentes, les formes fermées ont présenté les valeurs les plus élevées, tandis que les blocs semi-fermés ont démontré un rafraîchissement partiel.

L'effet d'ombrage induit par les bâtiments de grande hauteur se révèle être le principal facteur explicatif des variations observées dans le comportement spatial des températures dans cette deuxième série. Ces résultats soulignent l'importance de l'effet d'ombrage dans la modification du microclimat urbain et peuvent apporter des éclairages précieux pour la planification urbaine et la conception de bâtiments visant à créer des espaces plus frais et confortables dans les zones urbaines.



**Figure VI. 16:** Variation de la température de l'air  $T_a$  pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 14:00h. *Source* : Auteur.

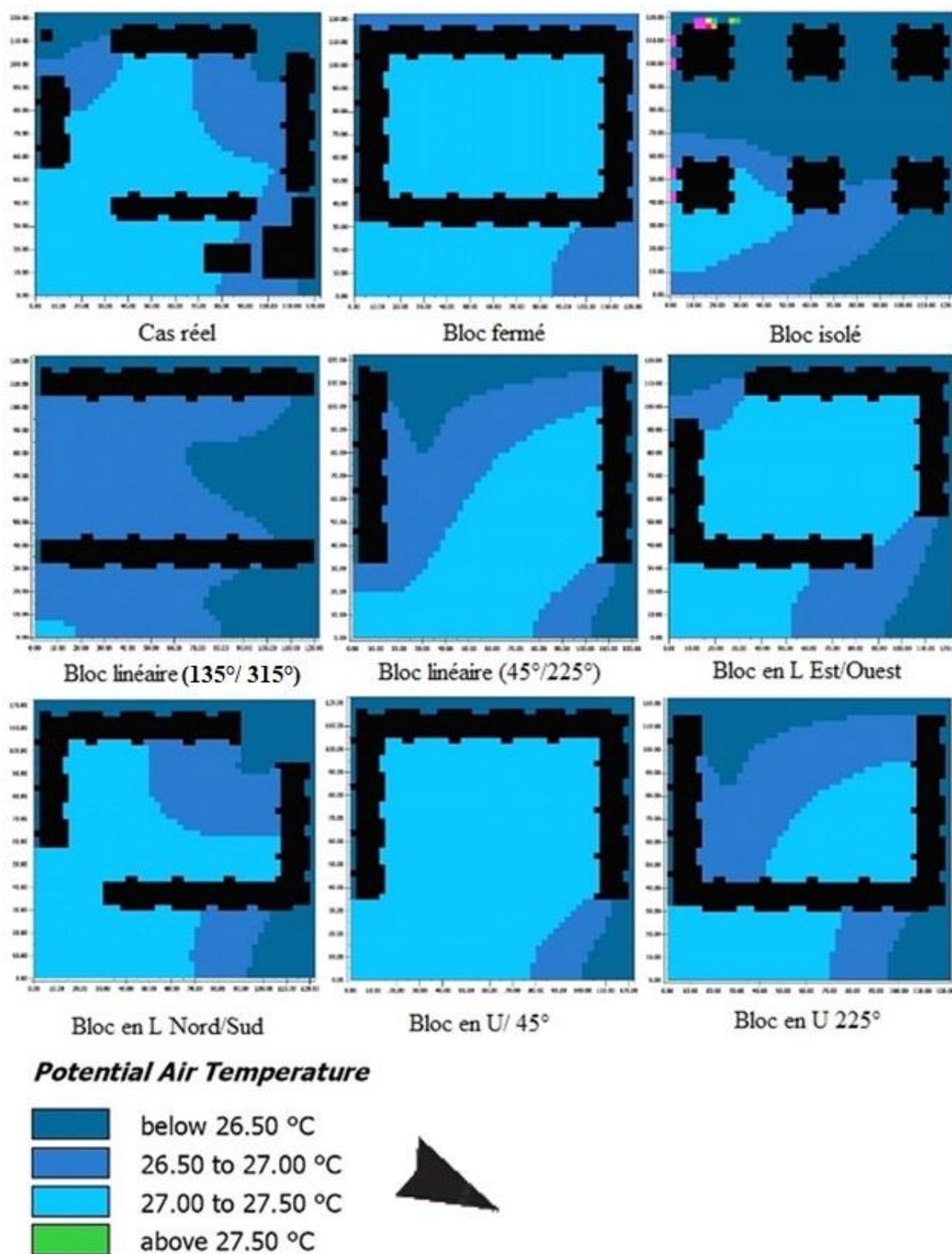
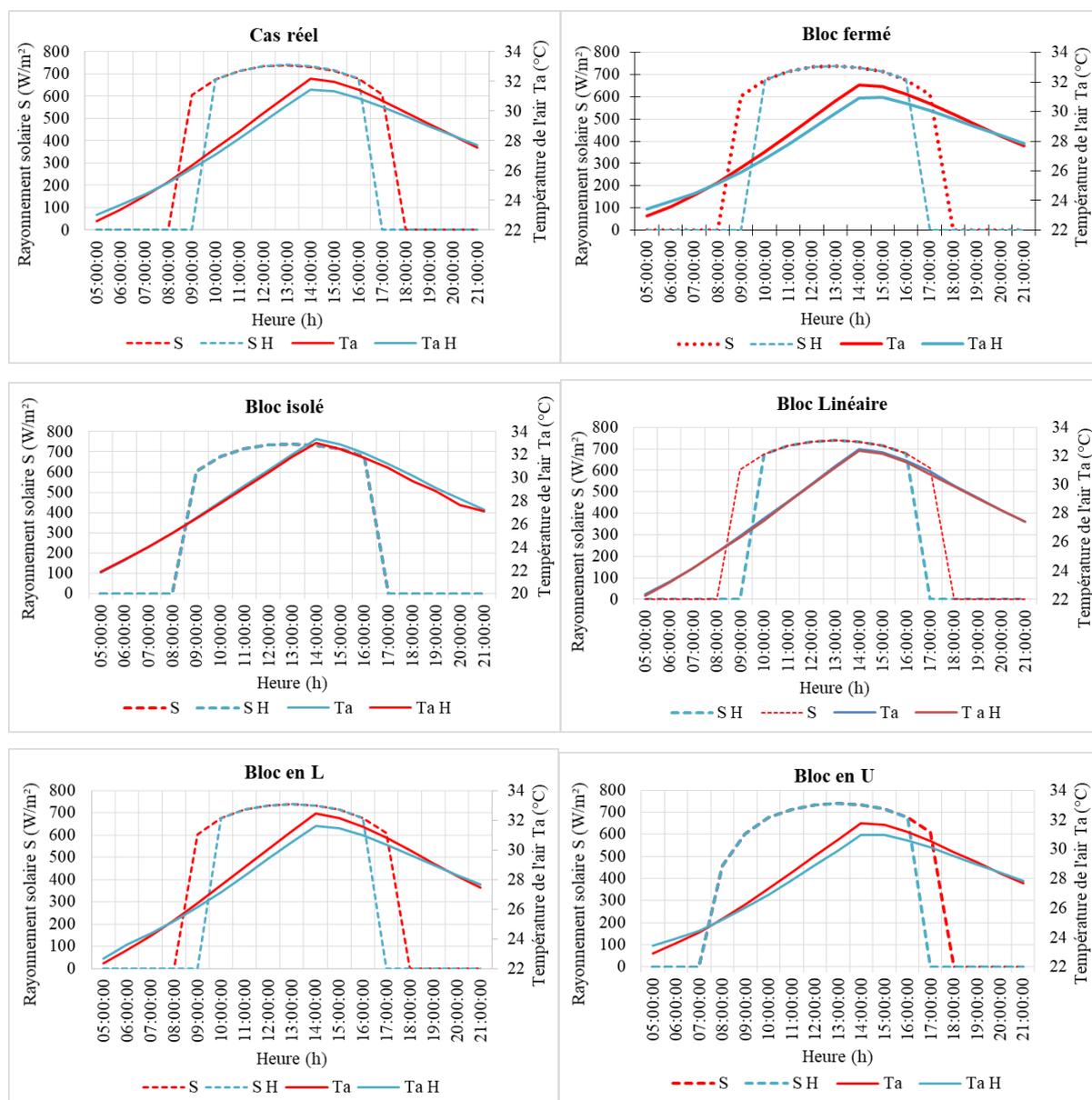


Figure VI. 17: Variation de la température de l'air  $T_a$  pour les neuf scénarios simulés pour la deuxième technique de réduction de la chaleur (augmentation de la hauteur des blocs urbains) à 22:00h. Source : Auteur.

### III.6 Variation journalière de la température de l'air $T_a$ au point A et comparaison entre les deux modes de réduction de la température étudiés



**Figure VI. 18 :** Variation journalière de la température de l'air et du rayonnement solaire mesurés à 1.25m au point A pour les Blocs : Cas réel, fermé, linéaire, en L, en U et isolé pour des hauteurs de 17m et 30m. S : rayonnement solaire pour une hauteur de 17m, S H : rayonnement solaire pour ne hauteur de 30m, Ta : température de l'air pour une hauteur de 17m, Ta H : température de l'air pour une hauteur de 30m. *Source :* Auteur.

La **Figure VI. 18** affiche les profils quotidiens de la température de l'air et du rayonnement solaire direct, mesurés à une hauteur de 1,25 mètre au point A, pour différentes configurations de bâtiments dans deux modes de réduction simulés. Les scénarios examinés

dans cette étude sont les mêmes que ceux utilisés pour analyser la température de surface et la vitesse du vent.

Les courbes de rayonnement solaire présentent une augmentation progressive jusqu'à atteindre une valeur de  $700 \text{ W/m}^2$ , puis elles restent constantes pendant les heures ensoleillées de la journée puis elles décroissent suite à l'obstruction des rayons solaires. Ces courbes sont symétriques pour les scénarios : cas réel, bloc fermé, bloc en L et bloc linéaire dans les deux modes de réduction. Cependant, la durée d'ensoleillement est plus longue pour les blocs de faible hauteur que pour les blocs de 30 mètres de hauteur. En ce qui concerne le bloc en U, le point A reçoit le même rayonnement solaire le matin pour les deux modes de réduction en raison de l'ouverture de la forme vers l'est.

La modification de la hauteur, passant de 17 mètres à 30 mètres, a entraîné une diminution du facteur de vu du ciel pour le point central A. Cette modification a également réduit la période d'exposition au rayonnement solaire pour les blocs fermés, réels, linéaires et en forme de L de la deuxième série. En revanche, le bloc en forme de U est ouvert du côté où le soleil se lève, ce qui permet au point A de recevoir le même rayonnement dans les deux scénarios le matin. Cependant, pendant le soir, les rayons solaires sont obstrués par le bord du bloc de grande hauteur avant le premier scénario.

Les résultats mettent en évidence que les blocs de 17 mètres de hauteur enregistrent des températures plus basses au point A que les blocs de 30 mètres de hauteur pendant les heures critiques de la journée (entre 11h00 et 17h00), avec des écarts variables. Cependant, au début et à la fin de la période simulée, les blocs de 30 mètres de hauteur révèlent des températures légèrement plus élevées, avec une différence de  $0,5^\circ\text{C}$  pour l'ensemble des scénarios.

Les courbes représentant l'évolution de la température de l'air au fil de la journée montrent une augmentation progressive jusqu'à 14 heures, suivie d'une diminution progressive, mais asymétrique par rapport à l'axe vertical. Cette tendance diffère de celle observée pour les courbes de rayonnement solaire, qui sont symétriques par rapport à l'axe zénithal. Cette observation peut être expliquée par plusieurs facteurs :

- Tout d'abord, les rayons solaires entraînent une augmentation de la température de l'air en début de journée. Ce phénomène contribue également à une accumulation de chaleur dans les structures urbaines (bâtiments et surfaces), en raison de l'inertie thermique des bâtiments et de la capacité de stockage élevée des environnements urbains. Cela ralentit le processus de dissipation de la

chaleur, ce qui explique la diminution progressive, mais asymétrique des courbes de température de l'air après 14h.

- De plus, l'orientation et l'ouverture des bâtiments par rapport à l'angle d'incidence des vents dominants favorisent la vitesse de dissipation de la chaleur par convection. Les bâtiments ayant une orientation appropriée facilitent la circulation de l'air, permettant ainsi une dissipation plus rapide de la chaleur. En revanche, les bâtiments mal orientés ou peu ouverts entravent cette circulation, ce qui ralentit la dissipation de la chaleur.

#### IV. Analyse statistique

En se fondant sur l'analyse des données relatives aux cartes de température et de vitesse du vent, il a été rendu possible de caractériser le comportement climatique quotidien pour divers scénarios. Cette section se consacre à la quantification de l'impact des modifications variées, en examinant plus spécifiquement l'influence du facteur de vue du ciel (FVC) sur les variations de température de l'air et de surface. Afin d'atteindre cet objectif, une approche basée sur la régression linéaire sera développée, permettant ainsi d'estimer de manière quantitative l'effet de ce paramètre sur les variables climatiques.

La régression linéaire est une méthode statistique largement employée dans de nombreuses études portant sur le climat urbain (Baghaeipoor & Nasrollahi, 2019; Chang & Goh, 1999; Chen et al., 2020; Nur Edayu & Syerrina, 2018), offre la possibilité de modéliser la relation entre une variable dépendante (ou à expliquer) et une ou plusieurs variables indépendantes (ou explicatives). Au moyen de cette méthode, il devient envisageable d'évaluer l'influence des variables indépendantes sur une variable dépendante de façon précise et rigoureuse.

##### IV.1 Régression linéaire

La régression linéaire est un type d'analyse prédictive fondamental et couramment utilisé. L'idée générale de la régression est d'examiner deux choses :

(1) est-ce qu'un ensemble de variables (indépendantes) permet de bien prédire une variable de résultat (dépendante) ?

(2) Quelles variables en particulier sont des prédicteurs significatifs de la variable de résultat, et de quelle manière, indiquée par l'ampleur et le signe des estimations bêta, influencent-elles la variable de résultat ?

Ces estimations de régression sont utilisées pour expliquer la relation entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes. La forme la plus simple de l'équation de régression avec une variable dépendante et une variable indépendante est définie par la formule

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (\text{VI.1})$$

Où :

Y : la variable à expliquer

$\beta_0$ : une constante

$\beta_1$  : le coefficient de la variable explicative

$\varepsilon$ : l'erreur aléatoire (cette erreur résume les erreurs des mesures et le fait que ça pouvait être des variables explicatives non incluses dans le modèle).

Les trois principales utilisations de l'analyse de régression sont (1) déterminer la force des prédicteurs (2) prévoir un effet, et (3) prévoir une tendance.

Dans le cas de la présente étude, le test de régression sera établi pour les données du point A

- Les valeurs dépendantes ou à expliquer sont la température de l'air  $T_a$  et la température de surface du sol  $T_s$ .
- La valeur indépendante ou explicative est le facteur de vue du ciel FVC

Pour effectuer le test de régression, le logiciel spécialisé SPSS est utilisé pour la création de la base de données et le traitement statistique.

#### IV.1.1 Codification des données sur SPSS

Dix-huit scénarios ont été analysés en utilisant le logiciel SPSS. Ces scénarios ont été catégorisés au moyen d'une variable qualitative nominale représentant le nom de chaque scénario, tandis que les paramètres tels que le facteur de vue du ciel ainsi que les températures de l'air et du sol ont été exprimés sous forme de valeurs numériques pour les plages horaires de 10h00, 14h00 et 22h00.

Grâce à cette méthodologie de codification, les données ont été organisées de manière à faciliter une analyse statistique rigoureuse des relations existantes entre les différents scénarios et les paramètres météorologiques correspondants. L'usage conjoint de variables qualitatives et numériques dans cette étude permet une exploration plus approfondie des données, ainsi qu'une meilleure compréhension des interrelations entre les différents facteurs.

#### IV.1.2 Démarche à suivre pour effectuer une régression linéaire multiple

Pour élaborer une régression linéaire, des étapes doivent être suivies :

- Estimation des coefficients de régression : le critère pour estimer les coefficients de régression dans le contexte d'une RLS, est toujours le même que celui dans le cas d'une régression linéaire multiple.
- Examiner la significativité de la variable explicative.
- Examiner la validité du modèle par le coefficient  $R^2$  : Les valeurs de  $R^2$  sont comprises entre 0 et 1, si le  $R^2$  est proche de zéro le modèle n'explique pas la valeur à prédire Y et s'il est proche de 1 le modèle explique bien cette valeur.

## IV.2 Résultats de la régression linéaire

L'interprétation d'une régression linéaire se fait selon les étapes citées précédemment, on s'intéresse à la validité du modèle et à la significativité des valeurs explicatives. Les résultats de la modélisation statique pour la température de l'air et de surface sont illustrés dans le **Tableau VI. 1**.

**Tableau VI. 1:** les résultats de la régression linéaire pour Ta et Ts à 10:00, 14:00 et 22:00.

Heure	Variables dépendantes	Variable indépendante	Coefficients	Sig	R <sup>2</sup>	Corrélation de Pearson <sup>3</sup>
10 :00	Température de l'air T <sub>a</sub>	Constante	24.75	0.000	0.62	0.79
		SVF	3.33	0.000		
	Température de surface du sol T <sub>s</sub>	constante	18.26	0.000	0.68	0.82
		SVF	15.43	0.000		
14 :00	Température de l'air T <sub>a</sub>	Constante	26.89	0.000	0.55	0.74
		SVF	6.55	0.001		
	Température de surface du sol T <sub>s</sub>	constante	39.49	0.000	0.06	0.24
		SVF	1.86	0.364		
22 :00	Température de l'air T <sub>a</sub>	Constante	28.53	0.000	0.36	-0.60
		SVF	-2.11	0.014		
	Température de surface du sol T <sub>s</sub>	constante	28.07	0.000	0.002	-0.04
		SVF	-0.12	0.865		

<sup>3</sup> Dans cette étude, la corrélation de Pearson a été préférée à la corrélation de Spearman, car la normalité des données a été soigneusement vérifiée et confirmée.

Le **Tableau VI. 2** présente les résultats de l'analyse de régression pour les variables dépendantes : la température de l'air  $T_a$  et la température de surface du sol  $T_s$  et le facteur de vue du ciel (SVF) en tant que variable indépendante, à trois moments de la journée (10h00, 14h00, 22h00). Les coefficients des variables indépendantes mesurent leur effet sur les variables dépendantes, tandis que la significativité (**Sig**) indique leur significativité statistique, c'est-à-dire la probabilité que le coefficient soit différent de zéro. Le coefficient de détermination  $R^2$  évalue la validité du modèle de régression.

Pour la température de l'air à 10h00, le coefficient de la constante est de  $24,75^\circ\text{C}$ , indiquant que la température de l'air serait d'environ  $24,75^\circ\text{C}$  lorsque le FVC est nul. Le coefficient pour le FVC est de  $3,33^\circ\text{C}$ , ce qui indique que chaque unité d'augmentation de la température de l'air augmente le FVC d'environ  $3,33^\circ\text{C}$ . La p-value<sup>4</sup> pour le SVF est de 0,000, ce qui indique une relation significative entre le SVF et la température de l'air. Le  $R^2$  de 0,62 signifie que 62% de la variation de la température de l'air peut être expliquée par le modèle de régression.

Pour la température de surface du sol à 10h00, le coefficient de la constante est de  $18,26^\circ\text{C}$ , indiquant que la température de surface du sol serait d'environ  $18,26^\circ\text{C}$  lorsque le SVF est nul. Le coefficient pour le SVF est de  $15,43^\circ\text{C}$ , ce qui indique qu'une augmentation d'une unité de la température de surface du sol augmente le SVF d'environ  $15,43^\circ\text{C}$ . La p-value pour le SVF est de 0,000, indiquant une relation significative entre le SVF et la température de surface du sol. Le  $R^2$  de 0,68 indique que 68% de la variation de la température de surface du sol peut être expliquée par le modèle de régression.

Pour la température de l'air à 14h00, le coefficient de la constante est de  $26,89^\circ\text{C}$ , indiquant que la température de l'air serait d'environ  $26,89^\circ\text{C}$  lorsque le FVC est nul. Le coefficient pour le FVC est de  $6,55^\circ\text{C}$ , indiquant qu'une augmentation d'une unité de la température de l'air augmente le SVF d'environ  $6,55^\circ\text{C}$ . La p-value pour le FVC est de 0,001, ce qui indique une relation significative entre le FVC et la température de l'air. Le  $R^2$  de 0,55 indique que 55% de la variation de la température de l'air peut être expliquée par le modèle de régression.

Pour la température de surface du sol à 14h00, la régression linéaire indique que le coefficient de la constante est de 39,49, ce qui implique que lorsque le facteur de vue du ciel (FVC) est nul, la température de surface du sol serait d'environ  $39,49^\circ\text{C}$ . Le coefficient pour le

---

<sup>4</sup> La significativité statistique

FVC est de 1,86, ce qui signifie que pour chaque unité de la température de surface du sol, le FVC augmenterait de 1,86°C. À 14h00, la température de l'air  $T_a$  était de 26,89°C et le FVC était de 6,55. La température de surface du sol  $T_s$  était de 39,49°C avec une FVC de 1,86. Cependant, la significativité statistique du coefficient de la FVC pour  $T_s$  était seulement de 0,364, ce qui indique qu'il n'y avait pas suffisamment de preuves pour conclure que la FVC avait un effet significatif sur la température de surface du sol à 14h00.

Il convient de noter que le coefficient de détermination  $R^2$  était faible pour  $T_s$  à 14h00 (0,06), ce qui indique que le modèle de régression ne pouvait expliquer que 6% de la variation de la température de surface du sol à ce moment de la journée.

À 22h00, la régression montre que le FVC n'a pas une forte influence sur la température de l'air et de surface. En effet, le coefficient pour la FVC est négatif, ce qui implique que plus le FVC est élevé, moins les températures de l'air et de surface sont élevées. Cependant, la valeur de p-value associée au coefficient est supérieure à 0,05, ce qui indique que le coefficient n'est pas statistiquement significatif. De plus, le  $R^2$  de 0,36 indique que le modèle de régression ne peut expliquer que 36% de la variation de la température de l'air à cette heure de la journée, ce qui est relativement faible. En somme, les résultats de la régression suggèrent qu'il n'existe pas de forte relation entre le FVC et la température de l'air et de surface à 22h00.

Les résultats obtenus à partir de ces tests montrent que pendant les heures fraîches, notamment à 22h, la corrélation entre le SVF et la température était négative. En d'autres termes, à mesure que le SVF diminuait, la température augmentait par la suite. Cependant, la température augmente parce que la valeur du SVF est faible dans les espaces fermés et que la chaleur est piégée entre les bâtiments, ne pouvant pas être émise sous forme de longueur d'onde longue vers les espaces extérieurs. Il y avait une corrélation positive entre le SVF et la température pendant les heures chaudes de la journée (à 14h). En d'autres termes, à mesure que le SVF augmentait, la température augmentait également. On peut en conclure que dans les espaces ouverts où le SVF est élevé, la température observée est plus élevée, tandis que dans les espaces fermés avec un faible SVF, l'ombre diminue la température. Ainsi, dans l'ensemble, pour une température de l'air bien équilibrée pendant le jour et la nuit, il est essentiel d'optimiser la température de l'air par rapport au SVF. Ces résultats concordent avec les travaux de (Baghaeipoor & Nasrollahi, 2019) dans un climat aride.

## **V. Discussion**

Conformément aux attentes, la deuxième série de scénarios présente la température de l'air la plus basse, avec une différence moyenne de  $0,75^{\circ}\text{C}$  à 14h00. Cependant, il a été observé que cette densification de l'espace a un effet négatif après le coucher du soleil. La chaleur accumulée pendant la journée se dissipe beaucoup plus lentement par rapport aux scénarios avec une hauteur réduite. Entre 11h00 et 14h00, l'incidence solaire atteint son maximum, ce qui entraîne une augmentation des flux énergétiques reçus par les structures urbaines, entraînant une augmentation simultanée des températures de l'air ambiant ( $T_a$ ) et de surface ( $T_s$ ). Cette augmentation de température peut être attribuée à la position du soleil au zénith, qui réduit l'ombre disponible et donc la zone de confort associée à ces zones, ainsi qu'à la forme des blocs qui bloque ou permet la pénétration des rayons solaires. À ce moment-là, les formes fermées empêchent l'écoulement de l'air, ce qui permet de maintenir des températures plus douces. En revanche, les formes fragmentées sont exposées à de l'air chaud, accentué par l'augmentation de la vélocité du vent, en plus de leur exposition aux rayons solaires.

Après le coucher du soleil, l'inertie thermique des bâtiments favorise le stockage de chaleur. Par conséquent, la chaleur sensible et la chaleur de stockage sont importantes à ce moment, et avec la densification de l'espace, cette chaleur se dissipe lentement, créant des environnements inconfortables dans les formes urbaines denses et augmentant ainsi l'intensité des îlots de chaleur urbains. En revanche, les formes fragmentées se refroidissent plus rapidement, entraînant une diminution des températures.

Il est important de noter que l'orientation des formes par rapport aux vents dominants est déterminante pour la caractérisation de l'environnement thermo aéraulique. Ces observations suggèrent que la conception de l'environnement bâti doit prendre en compte plusieurs facteurs, tels que l'ensoleillement, la direction des vents dominants, et l'inertie thermique des bâtiments. Les recherches futures pourraient se concentrer sur la mesure de ces facteurs et leur impact sur la conception architecturale afin d'améliorer l'environnement de vie. Des études antérieures ont également confirmé que la ventilation des espaces urbains est l'un des moyens les plus efficaces pour atténuer l'effet des îlots de chaleur urbains, comme l'ont démontré les travaux de Givoni en 1998. Par conséquent, la compréhension de ces conditions aérauliques revêt une importance cruciale pour la recherche scientifique en climatologie urbaine.

Le test de régression linéaire est une méthode d'analyse statistique qui a été utilisée dans cette étude pour évaluer et quantifier l'impact du facteur de vue du ciel (FVC) sur le

comportement thermique des formes urbaines. Les résultats obtenus indiquent que pendant la journée, le FVC exerce une influence significative sur la température de l'air et de surface. Un FVC élevé permet une exposition accrue de l'espace au ciel et, par conséquent, aux rayons solaires, qui constituent la principale source de chaleur. Cela confirme les résultats de la première partie de l'étude. Cependant, cet effet devient négligeable après le coucher du soleil, ce qui suggère que d'autres variables interviennent dans le comportement thermique des formes urbaines. Comme mentionné précédemment, le régime aéraulique et les caractéristiques réfléchissantes des surfaces urbaines (albédo) ainsi que les caractéristiques thermiques des matériaux (inertie thermique), la présence de végétation urbaine et la chaleur anthropique jouent un rôle significatif dans cette dynamique.

Il est important de souligner que le FVC fournit des informations sur l'ouverture vers le ciel, mais pas sur l'orientation de la forme urbaine, ce qui explique sa capacité moyenne à définir la température dans les modèles de régression établis. Il convient de noter que d'autres variables n'ont pas été incluses dans les modèles de régression, mais selon la littérature, elles contribuent de manière significative à la modification du microclimat. Ces variables comprennent les caractéristiques réfléchissantes des surfaces urbaines (albédo), les caractéristiques thermiques des matériaux (inertie thermique), la présence de végétation urbaine, la chaleur anthropique et le climat local.

Pour la ville de Mostaganem, il a été constaté que les configurations urbaines denses ont affiché des performances thermiques favorables. Toutefois, il est primordial de concevoir ces configurations de manière à promouvoir une ventilation naturelle efficace, particulièrement après le coucher du soleil, lorsque la chaleur de stockage et la chaleur sensible jouent un rôle plus prépondérant. Ces résultats corroborent les conclusions antérieures de (Golany, 1996) sur les caractéristiques morphologiques urbaines adaptées au climat méditerranéen.

## **VI. Conclusion**

Durant ce chapitre dix-neuf scénarios ont été évalués dans le but de réduire la température de l'air et de surface, en se basant sur les résultats de la simulation. Les cartes et les courbes de vitesse de vent, de température de surface et de température de l'air la première partie du chapitre examine le comportement spatiotemporel des formes proposées. La deuxième partie du chapitre a quantifié l'impact du facteur de vu du ciel sur le comportement de la température de l'air et de surface.

Ces résultats indiquent que la hauteur des bâtiments peut avoir un impact significatif sur les températures dans la canopée urbaine. Augmenter la hauteur des bâtiments réduit significativement le facteur de vu de ciel, cela peut également abaisser la température, en particulier pendant les heures les plus chaudes de la journée, et l'effet d'ombrage produit par les blocs à hauteur élevée peut également avoir un impact significatif sur les températures.

La fermeture du côté nord-ouest dans les scénarios suivants : le bloc fermé, le semi-fermé en L orienté nord-sud et le bloc en U orienté vers l'est, entrave le flux d'air, ce qui a un effet rafraîchissant pendant la journée. Cependant, après le coucher du soleil, l'air n'est pas en mesure de pénétrer et de refroidir la zone située entre les blocs, ce qui rend ces trois formes particulièrement critiques, bien que légèrement différentes avec un écart de 0,5°C. En revanche, le bloc isolé, le bloc linéaire et le cas réel sont plus exposés à la surchauffe pendant le pic de chaleur estivale (à 14h00). Après le coucher du soleil, ces formes se refroidissent plus rapidement grâce à l'effet de convection.

Dans cette étude, il a été démontré que les vents dominants ont également un impact significatif sur la température de l'air et de surface. En effet, les formes ouvertes orientées dans le sens du flux d'air ont un effet rafraîchissant plus marqué, comme l'indiquent les cartes de température de la vitesse du vent.

En conclusion, il convient de souligner que le facteur de vue du ciel (FVC) joue un rôle crucial dans la réduction des îlots de chaleur urbains, conformément aux attentes. Ainsi, les résultats de cette étude confirment l'importance de l'orientation des formes urbaines par rapport aux vents dominants pour réduire les îlots de chaleur urbains. Les grands vents améliorent le mélange de l'air et tendent à homogénéiser différentes zones de température, limitant ainsi des phénomènes tels que le point de stagnation de la chaleur causé par l'absence de vent. Les villes sont responsables de ce phénomène en raison de la grande résistance qu'elles opposent à la circulation de la masse d'air dans la région. En raison de cette considération, ce paramètre a été choisi pour caractériser le microclimat de la zone sélectionnée.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

En guise de conclusion et de perspective, nous suggérons d'effectuer une relecture transversale de notre travail. Tout d'abord, nous mettrons en lumière les principales conclusions de notre étude, qui visait à évaluer et quantifier l'impact de la morphologie urbaine sur l'augmentation de la température en milieu urbain en utilisant un ensemble d'outils méthodologiques. Ensuite, nous examinerons les perspectives les plus importantes qui pourraient découler de notre recherche.

Il convient de rappeler que l'objectif principal de notre travail de recherche était de vérifier l'existence du phénomène d'îlot de chaleur urbain sur la ville de Mostaganem et de déterminer comment la morphologie urbaine influence l'augmentation de la température de l'air et de surface en milieu urbain. Pour atteindre cet objectif, nous avons mis en place une méthodologie rigoureuse qui nous a permis de collecter et d'analyser des données pertinentes et fiables. Ce travail de thèse a permis de contribuer avec un ensemble d'outils méthodologiques à :

- Détecter les îlots de chaleur urbains de surface dans l'agglomération de Mostaganem en utilisant la télédétection.
- Examiner le comportement climatique de deux politiques d'habitat adoptées après l'indépendance lors de la saison estivale, en menant une campagne de mesure.
- Évaluer deux stratégies de réduction de la température en agissant sur la forme, l'orientation et la hauteur des blocs d'habitat collectif, par le biais d'une simulation paramétrique via le logiciel spécialisé ENVI met de dix-huit variantes.
- Quantifier l'impact de ces stratégies d'atténuation sur la température de l'air et de surface en élaborant un test de régression linéaire.

Le premier chapitre de cette étude propose une analyse détaillée des échanges d'air et de masse entre la ville et son environnement, ainsi qu'une évaluation du bilan énergétique urbain prenant en compte les flux de chaleur échangés avec l'environnement, étroitement liés à la présence de la ville. Cette présentation des fondements et de la théorie de la climatologie urbaine permet d'introduire le phénomène de l'îlot de chaleur urbain dans la deuxième section du premier chapitre, en exposant ses types, ses échelles de formation et d'évolution.

Le deuxième chapitre met en évidence l'utilisation de la télédétection comme technique de détection des îlots de chaleur urbains, en utilisant des images satellitaires et des algorithmes spécifiques pour extraire des informations liées à la couche terrestre. Ce chapitre souligne l'importance de comprendre les principes physiques régissant la télédétection.

Le troisième chapitre aborde l'effet de la morphologie urbaine sur le microclimat. Une revue de littérature est réalisée pour établir une liste de paramètres morphologiques classifiés selon deux échelles climatiques, à savoir l'échelle microclimatique et l'échelle méso climatique, qui peuvent interagir avec les paramètres climatiques tels que la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, etc.

Le quatrième chapitre de cette thèse présente l'application de la technique de télédétection pour extraire la température de surface (LST) et cartographier les îlots de chaleur urbains de surface dans l'agglomération de Mostaganem. La méthodologie adoptée consiste à évaluer les performances thermiques de la ville en utilisant les systèmes d'information géographique (SIG) pour quatre dates représentatives des quatre saisons de l'année 2019. L'analyse et la spatialisation du phénomène à l'échelle méso climatique permet de vérifier la première hypothèse et de tirer les conclusions suivantes :

- L'îlot de chaleur urbain est significatif dans l'agglomération étudiée, les zones chaudes sur la ville peuvent atteindre un pic de 3.5°C en termes d'écart de température de surface
- Une coupe longitudinale élaborée sur la carte de température de surface pour les quatre dates, montre que les températures minimales et moyennes dans à l'intérieur de la ville sont plus élevées par rapport à celles à l'extérieur. En revanche, les températures maximales présentent un comportement inverse (les valeurs en ville sont inférieures par rapport aux valeurs à l'extérieur de la ville.
- Comme dans d'autres cas étudiés dans des climats arides et semi-arides, la ville présente des zones avec des températures plus basses, communément appelées îlots de fraîcheur urbains. Ces zones se trouvent dans des fragments urbains avec des densités et des hauteurs de bâtiments moyennes. En revanche, les espaces ouverts et les zones à faible densité révèlent les températures les plus élevées.
- L'indice de végétation NDVI a permis de détecter la végétation, tandis que les cartes de l'indice des bâtiments NDBI ne permettent pas de représenter la distribution spatiale précise des bâtiments en raison de la similarité des

caractéristiques de réflectivité et d'émissivité des surfaces nues et des bâtiments. Cependant, le NDBI reste corrélé positivement avec la température. Enfin, les zones ombragées présentent généralement un environnement thermique plus favorable.

Cette première partie de l'analyse fournit des orientations importantes pour un aménagement urbain durable. Cependant, à l'échelle mésoclimatique, il s'avère difficile de comprendre les mécanismes d'interaction entre le cadre bâti des villes et l'atmosphère, ainsi que de quantifier la contribution de chaque paramètre à l'amplification du stress thermique vu la faible résolution des cartes de température de surface LST

Le cinquième chapitre de notre étude justifie la sélection du cas d'étude en se basant sur les résultats du chapitre précédent et en tenant compte de la production architecturale en termes de politique d'habitat. Ce quartier se trouve dans la nouvelle extension urbaine, dans une zone caractérisée par des températures de surface élevées selon les cartes de température de surface LST.

Pour évaluer les paramètres climatiques à cette échelle de transition (échelle du quartier), une campagne de mesure a été réalisée le 06/08/2019. Une mini-station météorologique modèle FROGGIT a été utilisée, ainsi qu'un thermomètre infrarouge pour mesurer la température de l'air, l'humidité relative, la température de surface du sol et la vitesse du vent.

En plus de la validation de la simulation réalisée sur une partie du quartier à l'aide du logiciel spécialisé ENVI-met, es résultats de cette campagne ont montré une variabilité microclimatique dans le quartier, liée à la géométrie urbaine et à l'orientation des blocs et des espaces qu'ils créent.

Le dernier chapitre de notre étude se concentre sur l'analyse des résultats des simulations et l'évaluation de l'impact de différentes techniques de réduction de la température sur le microclimat urbain. La première partie de ce chapitre analyse les cartes de température et de vitesse du vent pour les dix-huit scénarios simulés, répartis en deux séries en modifiant la forme des blocs et en augmentant la hauteur des mêmes blocs.

Les résultats obtenus indiquent que les blocs fermés et semi-fermés présentent des températures plus basses pendant les heures les plus chaudes de la journée (14h00), avec une réduction d'environ 2°C. Cependant, après le coucher du soleil, ces mêmes blocs affichent des

températures légèrement plus élevées par rapport aux blocs ouverts (0,5°C). En ce qui concerne l'augmentation de la hauteur des bâtiments, cela entraîne un ombrage des espaces extérieurs et une diminution de la vitesse du vent et donc une réduction de la température pendant la journée et une légère augmentation après le coucher du soleil.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, une régression linéaire est réalisée en se basant sur les résultats obtenus à un point central de l'espace étudié. Cette régression permet d'évaluer l'impact du facteur de vue sur le ciel (SVF) sur l'intensité de la température de l'air et de surface.

Les résultats de cette régression ont permis de vérifier la deuxième hypothèse et de montrer que le facteur de vue sur le ciel est responsable de 55% à l'augmentation de la température de l'air à 14h et 62% à 10h et pour la température de surface il est responsable de 68% à 10h et 6% à 14h. En revanche, après le coucher du soleil, le modèle statistique devient moins significatif et la dépendance de la température de l'air et de surface au facteur de vue sur le ciel devient négligeable.

En conclusion, cette thèse de doctorat a apporté des connaissances importantes sur l'impact de la morphologie urbaine sur l'augmentation de la température en milieu urbain, en identifiant les îlots de chaleur urbains à Mostaganem et en évaluant différentes stratégies d'atténuation. Ces résultats fournissent une base solide pour orienter les futures recherches en matière de planification urbaine durable et de lutte contre les effets néfastes de l'îlot de chaleur urbain.

### **Limite de la recherche**

Cette étude approfondie présente certaines limites, mettant en évidence la nécessité d'explorer de nouvelles pistes de recherche pour compléter et améliorer les résultats obtenus :

- Il est recommandé de mener des campagnes de mesure à l'échelle mésoclimatique afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à la formation des îlots de chaleur urbains. La littérature existante présente diverses études qui ont réalisé des campagnes de mesure à l'échelle d'une ville ou d'un fragment urbain, ce qui permet de fournir des informations détaillées sur le comportement climatique à une échelle plus fine.
- Une étude comparative entre le confort thermique et l'intensité des îlots de chaleur pourrait apporter des informations précieuses pour améliorer la qualité de vie dans les environnements urbains.

- Il est essentiel de prendre en compte les aspects psychologiques et sociaux lors de l'évaluation des performances thermiques des tissus urbains, en particulier en termes de perception et d'expériences des résidents.
- Il est recommandé de développer des simulations pour d'autres directions de vent dominant, car la ville de Mostaganem est soumise à deux régimes de vent différents en fonction des saisons (hiver/été).
- Il serait souhaitable d'évaluer la contribution de la végétation urbaine à la régulation du microclimat, car elle a démontré sa capacité à réduire la température.
- L'intégration de variables explicatives supplémentaires dans le modèle de régression linéaire pourrait améliorer la validité du modèle de prédiction, ce qui en ferait un outil décisionnel puissant et important.
- De plus, d'autres problèmes tels que le manque de matériel ou l'impossibilité de réaliser un travail sur le terrain approprié ont empêché d'obtenir les résultats souhaités. Ces problèmes sont liés à des facteurs tels que la version incomplète du logiciel, qui n'a pas permis de simuler un fragment plus grand avec une résolution plus élevée, la disponibilité limitée de stations météorologiques pour réaliser des mesures instantanées dans le milieu urbain et à l'extérieur de la ville, ainsi que pour élaborer des mesures dans d'autres tissus urbains représentant différentes politiques urbaines.

L'exploration de ces différentes pistes de recherche contribuera à enrichir les résultats de cette étude et à une meilleure compréhension des défis liés à la réduction des îlots de chaleur urbains.

### **Recommandation**

Lors de la conception ou de la réhabilitation d'un espace extérieur, il est recommandé de prendre en compte la dimension environnementale afin de créer des conditions thermiques extérieures améliorées et contribuer à la réduction de l'intensité des îlots de chaleur urbains. Toutefois, pour être efficaces, les solutions proposées doivent être adaptées à la morphologie urbaine locale, à l'environnement environnant et au climat local. Les résultats de cette étude fournissent des recommandations destinées aux concepteurs afin de créer un environnement extérieur attrayant et confortable. Ces recommandations reposent à la fois sur les résultats de cette étude et sur les suggestions de la littérature scientifique.

**Conception de formes urbaines favorisant la ventilation et l'ombrage :** Les résultats de l'étude ont démontré que la forme et l'orientation des bâtiments ont un impact significatif sur la température de l'air et de surface. Lorsqu'un obstacle est exposé au vent, il crée une surpression sur sa face exposée et une dépression sur sa face opposée. Par conséquent, en plus de fournir une protection, les écrans peuvent également entraîner des effets secondaires tels que des courants d'air et des turbulences. La zone d'influence d'un bâtiment est environ quatre fois plus longue à l'arrière du bâtiment qu'à l'avant. Deux catégories d'obstacles doivent être étudiées en fonction de leur impact sur la vitesse locale du vent : les éléments étanches à l'air tels que les bâtiments, et les éléments poreux tels que les arbres. Il convient de noter que les constructions créent des écrans permanents, tandis que la végétation peut présenter des variations de porosité en fonction de la saison. Lorsque le vent rencontre une canopée urbaine, le flux d'air se fait entre les espaces ouverts, tels que les rues (canyons urbains) et les espaces entre les bâtiments. La rugosité est liée à la hauteur de ces éléments et dépend également du volume des espaces ouverts, autrement dit de la densité de la rugosité.

L'impact de l'urbanisation sur les vents est complexe, car la ville modifie la vitesse et la direction des vents en raison de sa rugosité, de la canalisation des vents dans les rues, ainsi que de l'influence de l'îlot de chaleur urbain qui génère des vents thermiques. Les brises thermiques, résultant de la convection de l'air, se manifestent dans toute la ville ou un quartier, surtout lorsque les vents sont faibles. Ce phénomène s'intensifie avec l'augmentation de l'îlot de chaleur.

Il est donc recommandé de concevoir des formes de bâtiments qui favorisent l'ombrage des espaces et permettent une bonne ventilation. Les corridors de ventilation d'air (wind ventilation corridors) peuvent être utilisés pour améliorer la circulation de l'air dans les espaces urbains, contribuant ainsi au refroidissement de la chaleur emmagasinée dans les structures urbaines.

**Promotion de la végétation urbaine :** les premiers résultats de l'étude ont démontré que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a un effet significatif sur la température de surface. Par conséquent, il est recommandé de favoriser la végétation urbaine en créant des parcs et des zones végétalisées en milieu urbain. Cela peut contribuer à réduire la température de l'air et de surface en absorbant l'énergie solaire.

**Choix des matériaux de surface :** Il est recommandé d'optimiser le choix des matériaux de surface (albédo) afin de minimiser l'absorption de chaleur et de réduire la chaleur stockée et

la chaleur sensible. Les matériaux réfléchissants peuvent être utilisés pour réduire l'absorption de la chaleur solaire, tandis que les matériaux de couleur foncée peuvent être utilisés pour stocker la chaleur.

En conclusion, cette étude a démontré que la température de l'air et de surface dans les espaces urbains est influencée par plusieurs facteurs tels que la forme et l'orientation des bâtiments, la végétation urbaine et les matériaux de surface. Les recommandations susmentionnées peuvent contribuer à la réduction des îlots de chaleur urbains et à l'amélioration du confort thermique des habitants des zones urbaines. Il est important de souligner que ces recommandations nécessitent une adaptation à chaque situation spécifique, en prenant en considération les caractéristiques locales de la morphologie urbaine et du climat. L'intégration de la dimension environnementale dans la conception des espaces extérieurs est un aspect crucial pour promouvoir la création d'un environnement urbain durable et agréable pour les citoyens.

# ***Bibliographie***

**Bibliographie****Livre**

- Belhamissi m., histoire de mostaganem, alger, ed. Sned, 1982, 178 pages
- Chuvieco, e. (2009). Fundamentals of satellite remote sensing (a. Huete, ed.; 1st edition). Crc press.
- Dezobry et bachelet, "dictionnaire de biographie, d'histoire et de géographie", tome 2, p.1963 di meo g., "l'homme, la société, l'espace", paris, ed. Economica, 1991.
- Fernandez, P & Lavigne, P. (2009). Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements et méthodes, Ed Le moniteur, Paris. P 294.
- Gartland, I. M. (2010). Heat islands: understanding and mitigating heat in urban areas (1st edition). Routledge.
- Givoni, b. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Editions du moniteur.
- Koen steemers & mary ann steane. (2004). Environmental diversity in architecture: steane, mary ann, steemers, koen: 9780415314787: amazon.com: books. <https://www.amazon.com/environmental-diversity-architecture-mary-steane/dp/041531478x>.
- LE PAIGE, M., GRATIA, E., et DE HERDE, A. Architecture et Climat. Guide d'aide à la conception bioclimatique, Services de Programmation de la Politique Scientifique.Bruxelles.1986. 132p
- Merlin, pierre & choay, françoise. (1988). Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement—pierre merlin ,... - librairie eyrolles. <https://www.eyrolles.com/btp/livre/dictionnaire-de-l-urbanisme-et-de-l-amenagement-9782130547730/>
- Monam, a., & rückert, k. (2013). The dependence of outdoor thermal comfort on urban layouts. Universitätsverlag der tu berlin.
- Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates. Londres, 2 édition.
- Oke, T. R. 1990. Boundary Layer Climates Second edition, London
- Oke, t. R. (2009). Boundary layer climates.

Oke, t. R., mills, g., christen, a., & voogt, j. A. (2017). *Urban climates* (1st ed.). Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

Nikolopoulou, m. (2004). *Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach*. Centre for renewable energy sources, eesd, fp5.

Robinson, p. J., & henderson-sellers, a. (2014). *Contemporary climatology*. Routledge.

Tinthoin, r., "le mostaganémois, création d'une région géographique ", actes du 79ème congrès des sociétés savantes, alger, 1954. Bulletin de la section de géographie, comité des travaux historiques et scientifiques, tome lxxvii, paris, imprimerie nationale, 1955, puf, p.174.

### *Thèse et mémoire*

Abdullah, H. (2012) *The Use of Landsat 5 TM Imagery to Detect Urban Expansion and Its Impact on Land Surface Temperatures in The City of Erbil, Iraqi Kurdistan*. Msc. University of Leicester.

Athamena, k. (2012). *Modelling and simulation of urban microclimates: study of the impact of urban morphology on comfort in outside spaces. Cases of eco-districts* [phdthesis, ecole centrale de nantes (ecn)]. <https://theses.hal.science/tel-00811583>

Bouyer, j. (2009). *Modélisation et simulation des microclimats urbains—étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*.

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.

Colombert, m. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville* [phdthesis, université paris-est]. <https://theses.hal.science/tel-00470536>

Djaghrouri, d. (2021). *Fluctuation des ambiances thermiques extérieures sous l'effet du végétal dans les zones arides. « cas d'une placette à biskra ville »*. [thèse de doctorat].

Dupont, S. (2001). *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Fahed, j. (2018). *Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (icu) sous climat méditerranéen*.

Ghaffour, w. (2020). Etude de l'effet de la morphologie urbaine sur le confort thermique des espaces extérieurs ». Cas d'étude: la ville de tlemcen. 289.

GOUIZI, YAMINA. Effet d'un groupe de bâtiments sur l'écoulement de l'air (vent) et le confort des piétons dans les espaces extérieurs Cas d'étude: Ensembles de bâtiments collectifs des ZHUN à Biskra. 2003. Mémoire de magister. Université Mohamed Khider-Biskra.

Hamoodi, m. N. (2018). An evaluation of surface urban heat islands in two contrasting cities [thesis, curtin university]. <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/70733>

Kitous samia. (2013). Le rapport entre morphologie et climat urbain dans le ksar de ghardaïa: le cas de la ventilation naturelle — laboratoire de recherche en architecture [document]. [https://ira.toulouse.archi.fr/ira/productions/theses-et-hdr-soutenues/theses-soutenues/samia\\_kitous](https://ira.toulouse.archi.fr/ira/productions/theses-et-hdr-soutenues/theses-soutenues/samia_kitous)

Leconte, f. (2014). Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles: cas de nancy. [université de lorraine]. <https://theses.hal.science/tel-01751281>

Merlier, l. (2015). On the interactions between urban structures and air flows: a numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related building energy loads [these de doctorat, lyon, insa]. <https://www.theses.fr/2015isal0070>

Mouffok, m. (2018). Impact de la morphologie sur le microclimat urbain- cas de l'ilot traditionnel complexe de ghardaia. Université mohamed khider – biskra.

Offerle, b. (2003). The energy balance of an urban area: examining temporal and spatial variability through measurements, remote sensing and modeling. Indiana university.

Ornelas, m. F. L. (2016). The mexican water forest: benefits of using remote sensing techniques to assess changes in land use and land cover. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.11855.43685>

Pigeon, g. (2007). Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine—projets clu-escompte et capitoul [these de doctorat, toulouse 3]. <https://www.theses.fr/2007tou30243>

Rasul, a. O. (2016). Remote sensing of surface urban cool and heat island dynamics in erbil, iraq, between 1992 and 2013.

Ringenbach, n. (2004). Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine: mesures, modélisation et validation sur strasbourg [these de doctorat, strasbourg 1]. [Http://www.theses.fr/2004str13085](http://www.theses.fr/2004str13085)

Robitu, m., & nantes, é. Polytechnique de l'université de. (2005). Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain: influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs.

Yamani, I. (2014). Logiques d'acteurs, processus et formes d'urbanisation : le cas de la ville de mostaganem. 344.

### Articles scientifiques

Adolphe, I. (2001). A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and planning b: planning and design*, 28(2), 183–200. [Https://doi.org/10.1068/b2631](https://doi.org/10.1068/b2631)

Aida, m. (1977). Reflection of solar radiation from an array of cumuli. *Journal of the meteorological society of japan. Ser. Ii*, 55(2), 174–181. [Https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.2\\_174](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.2_174)

Aida, m. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure—a model experiment. *Boundary-layer meteorology*, 23, 405–413. [Https://doi.org/10.1007/bf00116269](https://doi.org/10.1007/bf00116269)

Akbari, h. (2002). Shade trees reduce building energy use and co2 emissions from power plants. *Environmental pollution*, 116, s119–s126. [Https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00264-0](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00264-0)

Akbari, h., rose, I., & taha, h. (2003). Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape and urban planning*, 63, 1–14. [Https://doi.org/10.1016/s0169-2046\(02\)00165-2](https://doi.org/10.1016/s0169-2046(02)00165-2)

Almeida, c. R. De, teodoro, a. C., & gonçaves, a. (2021). Study of the urban heat island (uhi) using remote sensing data/techniques: a systematic review. *Environments*, 8(10), 105. [Https://doi.org/10.3390/environments8100105](https://doi.org/10.3390/environments8100105)

Arnfield, a. J. (1982). An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. *Physical geography*, 3(2), 97–122. [Https://doi.org/10.1080/02723646.1982.10642221](https://doi.org/10.1080/02723646.1982.10642221)

Arnfield, a. J. (1998). Micro- and mesoclimatology. *Progress in physical geography: earth and environment*, 22(1), 103–113. <https://doi.org/10.1177/030913339802200106>

Arnfield, a. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International journal of climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

Asawa, t., hoyano, a., & nakaohkubo, k. (2008). Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3d-cad system. *Building and environment*, 43, 2112–2123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.12.007>

Ayyad, Y. N., & Sharples, S. (2019). Envi-MET validation and sensitivity analysis using field measurements in a hot arid climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 329(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/329/1/012040>

Baghaeipoor, G., & Nasrollahi, N. (2019). The Effect of Sky View Factor on Air temperature in High-rise Urban Residential Environments. *Journal of Daylighting*, 6(2), 42–51. <https://doi.org/10.15627/jd.2019.6>

Bala, R., Prasad, R., Yadav, V. P., & Sharma, J. (2018). A COMPARATIVE STUDY OF LAND SURFACE TEMPERATURE WITH DIFFERENT INDICES ON HETEROGENEOUS LAND COVER USING LANDSAT 8 DATA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII–5, 389–394. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-389-2018>

Becker, f., & li, z.-l. (1990). Becker f, li z. Towards a local split window method over land surfaces. *International journal of remote sensing*. *International journal of remote sensing - int j remote sens*, 11, 369–393. <https://doi.org/10.1080/01431169008955028>

Benzerzour, m., masson, v., groleau, d., & lemonsu, a. (2011). Simulation of the urban climate variations in connection with the transformations of the city of nantes since the 17th century. *Building and environment*, 46(8), 1545–1557. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.014>

Beranek, W., 1984b. Wind environment around single buildings of rectangular shape. *Heron* 29, 1–31.

Berdahl, p., & bretz, s. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and buildings*, 25(2), 149–158. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(96\)01004-3](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(96)01004-3)

Blocken, b., roels, s., & carmeliet, j. (2004). Modification of pedestrian wind comfort in the silvertop tower passages by an automatic control system. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92(10), 849–873. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.04.004>

Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., Shepherd, M., Quattrochi, D., Santanello, J., Silva, J., Wolfe, R., & Toure, A. M. (2015). Impact of urbanization on US surface climate. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010>

Brandsma, T. Et Wolters, D. (2012). Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of Utrecht (the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51:1046–1060.

Buttstädt, M., Sachsen, T., Ketzler, G., Merbitz, H. Et Schneider, C. (2010). Urban temperature distribution and detection of influencing factors in urban structure. In *Proceedings of the 17th conference international seminar on urban form*.

Caïd, n., chachoua, m., & berrichi, f. (2019). Analyse spatiale diachronique de l'occupation du vignoble algérien depuis 60 ans: cas de la wilaya de mostaganem. *Physio-géo. Géographie physique et environnement*, volume 13, article volume 13. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.7675>

Calastrenc, c., baleux, f., poirier, n., & rendu, c. (2020). Thermographie aéroportée par drone. Nouvelle procédure pour la détection archéologique en haute montagne. *Archéosciences*, 44, 81–96. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.7426>

Chander, g., & markham, b. (2003). Revised landsat-5 tm radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *Ieee transactions on geoscience and remote sensing*, 41(11), 2674–2677. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.818464>

Chander, g., markham, b. L., & helder, d. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for landsat mss, tm, etm+, and eo-1 ali sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Chang, c. H., & goh, k. C. (1999). The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22:00 h for singapore. <https://repository.nie.edu.sg/handle/10497/4795>

Chen, H.-C., Han, Q., & De Vries, B. (2020). Modeling the spatial relation between urban morphology, land surface temperature and urban energy demand. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102246. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102246>

Colby, j. (1991). Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 57, 531–537.

Coll, c., galve, j.m., sanchez, j.m. And caselles, v. (2010) 'validation of landsat7/etm thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements', *iee transactions on geoscience and remote sensing*, 48(1), pp. 547-555.

Corbella, O. D., & Magalhães, M. A. A. A. (2008). Conceptual differences between the bioclimatic urbanism for Europe and for the tropical humid climate. *Renewable Energy*, 33, 1019–1023. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.004>

Crank, P. J., Middel, A., Wagner, M., Hoots, D., Smith, M., & Brazel, A. (2020). Validation of seasonal mean radiant temperature simulations in hot arid urban climates. *Science of The Total Environment*, 749, 141392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141392>

Czajkowski, k. P., goward, s. N., stadler, s. J., & walz, a. (2000). Thermal remote sensing of near surface environmental variables: application over the oklahoma mesonet. *The professional geographer*, 52(2), 345–357. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00230>

Denniss, a. (1995). T. M. Lillesand, & r. W. Kiefer, 1994. *Remote sensing and image interpretation*, 3rd ed. Xvi + 750 pp. New york, chichester, brisbane, toronto, singapore: john wiley & sons. Price £67.00 (hard covers), £19.95 (paperback). Isbn 0 471 30575 8 (pb). *Geological magazine*, 132(2), 248–249. <https://doi.org/10.1017/s0016756800012024>

Dhorde, A. And Dhorde, A. (2012) *Surface Urban Heat Island*. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing.

Dos santos, a. R., de oliveira, f. S., da silva, a. G., gleriani, j. M., gonçaves, w., moreira, g. L., silva, f. G., branco, e. R. F., moura, m. M., da silva, r. G., juvanhol, r. S., de souza, k. B., ribeiro, c. A. A. S., de queiroz, v. T., costa, a. V., lorenzon, a. S., domingues, g. F., marcatti, g. E., de castro, n. L. M., ... mota, p. H. S. (2017). Spatial and temporal distribution of urban heat

islands. *Science of the total environment*, 605–606, 946–956.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.275>

Dupont, E., Menut, L., Carissimo, B., Pelon, J., & Flamant, P. (1999). Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment. *Atmospheric Environment*, 33(6), 979–994. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00216-7)

Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3), 379–392. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00033-X](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00033-X)

Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48(1), 31–44. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00034-7)

Escourrou, G. (1933-) A. du texte. (1982). *Le Climat de la France* / Gisèle Escourrou. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3356240r>

Escourrou, G. (1984). Quelques remarques sur la climatologie urbaine (Some remarks about urban climatology). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 61(500), 83–97. <https://doi.org/10.3406/bagf.1984.5450>

Estoque, r. C., murayama, y., & myint, s. W. (2017). Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: an urban heat island study in the megacities of southeast asia. *Science of the total environment*, 577, 349–359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195>

Evans, J. M., & Schiller, S. D. (1996). Application of microclimate studies in town planning: A new capital city, an existing urban district and urban river front development. *Atmospheric Environment*, 30(3), 361–364. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00138-3](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00138-3)

Fahed, j., kinab, e., ginestet, s., & adolphe, l. (2020). Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of lebanon. *Sustainable cities and society*, 61, 102375. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102375>

Forouzandeh, A. (2018). Numerical modeling validation for the microclimate thermal condition of semi-closed courtyard spaces between buildings. *Sustainable Cities and Society*, 36, 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.025>

Frey, C.M., Rigo, G., Parlow, E. & Marçal, A. (2005) 'The cooling effect of cities in a hot and dry environment', Global developments in environmental earth observation from space Porto, Portugal, 6-11 June.

Galal, o. M., sailor, d. J., & mahmoud, h. (2020). The impact of urban form on outdoor thermal comfort in hot arid environments during daylight hours, case study: new aswan. *Building and environment*, 184, 107222.

Gardes, T., Schoetter, R., Hidalgo, J., Long, N., Marquès, E., & Masson, V. (2020). Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors—An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of The Total Environment*, 737, 139253. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139253>

Ghaffarianhoseini, a., berardi, u., & ghaffarianhoseini, a. (2015). Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates. *Building and environment*, 87, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.001>

Ghaleb, F., Mario, M., & Sandra, A. (2015). Regional Landsat-Based Drought Monitoring from 1982 to 2014. *Climate*, 3(3), 563–577. <https://doi.org/10.3390/cli3030563>

Givoni, B. (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), 289–299. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90001-U](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90001-U)

Goh, K. Et Chang, C. (1999). The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22 :00 h for Singapore. *International Journal of Climatology*, 19:1011–1023.

Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00266-9](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00266-9)

Goward, s. N., xue, y., & czajkowski, k. P. (2002). Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements. *Remote sensing of environment*, 79(2–3), 225.

Goward, S. N., Xue, Y., & Czajkowski, K. P. (2002). Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements. *Remote Sensing of Environment*, 79(2–3), 225.

Greuillet, c. (2013). L'îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l'air urban heat island and linkage with air quality. *Pollution atmosphérique*.

Grimmond, C. Et Oke, T. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas : observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41:792–810.

Grimmond, c. S. B., cleugh, h. A., & oke, t. R. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric environment. Part b. Urban atmosphere*, 25(3), 311–326. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90003-w](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90003-w)

Grimmond, C., Roth, M., Oke, T., Au, Y., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L., Liu, C., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D. Et Voogt, J. (2010). Climate and more sustainable cities : climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1:247–274.

Guha, S., Govil, H., Gill, N., & Dey, A. (2021). A long-term seasonal analysis on the relationship between LST and NDBI using Landsat data. *Quaternary International*, 575–576, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.06.041>

Guo, G., Zhou, X., Wu, Z., Xiao, R., & Chen, Y. (2016). Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China. *Environmental Modelling & Software*, 84, 427–439. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.021>

He, j., hoyano, a., & asawa, t. (2009). A numerical simulation tool for predicting the impact of outdoor thermal environment on building energy performance. *Applied energy*, 86(9), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.12.034>

Heusinkveld, B., Steeneveld, G.-J., van Hove, L., Jacobs, C. Et Holtslag, A. (2014). Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 119:677–692.

Jiménez-muñoz, j. C., & sobriño, j. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of geophysical research: atmospheres*, 108(d22), 2003jd003480. <https://doi.org/10.1029/2003jd003480>

Jiménez-muñoz, j. C., sobrino, j. A., skoković, d., mattar, c., & cristóbal, j. (2014). Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *Ieee geoscience and remote sensing letters*, 11(10), 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2014.2312032>

Jimenez-munoz, j.-c., cristóbal rosselló, j., sobrino, j., sòria barres, g., ninyerola, m., & pons, x. (2009). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from landsat thermal-infrared data. *Geoscience and remote sensing, ieee transactions on*, 47, 339–349. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.2007125>

Johansson, e. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in fez, morocco. *Building and environment*, 41(10), 1326–1338. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.022>

Kämpf, j. H., & robinson, d. (2010). Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms. *Energy and buildings*, 42(6), 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.11.019>

Kayet, n., pathak, k., chakrabarty, a., & sahu, s. (2016). Urban heat island explored by co-relationship between land surface temperature vs multiple vegetation indices. *Spatial information research*, 24(5), 515–529. <https://doi.org/10.1007/s41324-016-0049-3>

Klysiak, K. Et Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33:3885–3895.

Kondo, j., and yamazawa h. , 1986: aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface. *Bound.-layer meteor.*, **35**, 331–348.

Kumar, a., agarwal, v., pal, l., chandniha, s. K., & mishra, v. (2021). Effect of land surface temperature on urban heat island in varanasi city, india. *J*, 4(3), article 3. <https://doi.org/10.3390/j4030032>

Lahm, e., & bruse, m. (2003). Microclimatic effects of a small urban park in densely built-up areas: measurements and model simulations. In *5th international conference on urban climate* (pp. 273-276), lodz.

Lauer, d. T., morain, s. A., & salomonson, v. V. (1997). The landsat program: its origins, evolution, and impacts. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 63(7), 831–838.

- Levy, a. (2005). Formes urbaines et significations: revisiter la morphologie urbaine. *Espaces et sociétés*, 122(3), 25–48. <https://doi.org/10.3917/esp.122.0025>
- Li, j., wang, x., wang, x., ma, w., & zhang, h. (2009). Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the shanghai metropolitan area, china. *Ecological complexity*, 6(4), 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.02.002>.
- Li, S., Mo, H. And Dai, Y. (2011) 'Spatio-temporal Pattern of Urban Cool Island Intensity and Its Eco-environmental Response in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration', *Communications in Information Science and Management Engineering*, 1(9), pp. 1-6.
- Li, z.-l., wu, h., wang, n., qiu, s., sobriño, j. A., wan, z., tang, b.-h., & yan, g. (2013). Land surface emissivity retrieval from satellite data. *International journal of remote sensing*, 34(9–10), 3084–3127. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716540>
- Lindén, j., grimmond, c. S. B., & esper, j. (2015). Urban warming in villages. *Advances in science and research*, 12(1), 157–162. <https://doi.org/10.5194/asr-12-157-2015>
- Liou, Y.-A., Le, M. S., & Chien, H. (2019). Normalized Difference Latent Heat Index for Remote Sensing of Land Surface Energy Fluxes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(3), 1423–1433. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2866555>
- Liu, h., & weng, q. (2008). Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in indianapolis, usa. *Environmental monitoring and assessment*, 144(1), 199–219. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9979-5>
- Lowry, w. P. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of applied meteorology and climatology*, 16(2), 129–135. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0129:eeoueo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0129:eeoueo>2.0.co;2)
- Markham, b. L., & helder, d. L. (2012). Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from landsat: a review. *Remote sensing of environment*, 122, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.026>
- Masson, v. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology*, 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/a:1002463829265>
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Lioussé, C., Pont, V., Lagouarde, J., Voogt, J., Salmond, J., Oke, T., Hidalgo, J., Legain, D., Garrouste, O., Lac, C., Connan, O., Briottet, X.,

Lachérade, S. Et Tulet, P. (2008). The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102:135–157.

Mattsson, J., & Lindqvist, S. (1989). Topoclimatic maps for different planning levels. Some Swedish examples. *The Journal of CIB Bâtiment International. Building Research and Practice*, 17, 299–304.

Matzarakis, a., rutz, f., & mayer, h. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the rayman model. *International journal of biometeorology*, 51(4), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>

Mcmillin. (1975). Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption— 1975 -.

Mélissa Giguère, M. E. (2009). Urban Heat Island Mitigation Strategies. [https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1513\\_urbanheatislandmitigationstrategies.pdf](https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/1513_urbanheatislandmitigationstrategies.pdf)

Memon, r. A., leung, d. Y. C., & liu, c.-h. (2009). An investigation of urban heat island intensity (uhii) as an indicator of urban heating. *Atmospheric research*, 94, 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.07.006>

Mestayer, p. G., durand, p., augustin, p., bastin, s., bonnefond, j.-m., bénech, b., campistrion, b., coppalle, a., delbarre, h., & dousset, b. (2005). The urban boundary-layer field campaign in marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results. *Boundary-layer meteorology*, 114(2), 315–365.

Mills, G. (1999). Urban climatology and urban design. 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology.

Mills, G. (2006). Progress toward sustainable settlements: A role for urban climatology. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1–3), 69.

Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, 63(6), 153–157. <https://doi.org/10.1002/wea.195>

Nikolopoulou, M. (2004). Designing open spaces in the urban environment: A bioclimatic approach. Centre for Renewable Energy Sources, EESD, FP5.

Nur Edayu, Z., & Syerrina, Z. (2018). A statistical analysis for geographical weighted regression. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169, 012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012105>

Oke, t. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric environment* (1967), 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)

Oke, T. R. (1984). Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings*, 7(1), 1–10.

Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). Urban heat storage derived as energy balance residuals. *Boundary-Layer Meteorology*, 39, 233–245.

Ozkeresteci, i., crewe, k., brazel, a. J., & bruse, m. (2003). Use and evaluation of the envi-met model for environmental design and planning: an experiment on linear parks.

Park, h.-s. (1986). Features of the heat island in seoul and its surrounding cities. *Atmospheric environment* (1967), 20(10), 1859–1866. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90326-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90326-4)

Petralli, m., massetti, l., brandani, g., & orlandini, s. (2014). Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. *International journal of climatology*, 34(4), 1236–1244. <https://doi.org/10.1002/joc.3760>

Pettorelli, n., laurance, w. F., o'brien, t. G., wegmann, m., nagendra, h., & turner, w. (2014). Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *Journal of applied ecology*, 51(4), 839–848. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12261>

Piringer, M., Grimmond, C., Joffre, S., Mestayer, P., Middleton, D., Rotach, M., Baklanov, A., Ridder, K. D., Ferreira, J., Guilloteau, E., Karppinen, A., Martilli, A., Masson, V. Et Tombrou, M. (2002). Investigating the surface energy balance in urban areas - recent advances and future needs. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2:1–16.

Rasul, a., balzter, h., & smith, c. (2016). Diurnal and seasonal variation of surface urban cool and heat islands in the semi-arid city of erbil, iraq. *Climate*, 4(3), 42. <https://doi.org/10.3390/cli4030042>

Ratti, c., raydan, d., & steemers, k. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and buildings*, 35(1), 49–59. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(02\)00079-8](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(02)00079-8)

Ratti, c., raydan, d., & steemers, k. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and buildings*, 35(1), 49–59.

Riano, d., chuvieco, e., salas, j., & aguado, i. (2003). Assessment of different topographic corrections in landsat-tm data for mapping vegetation types (2003). *Ieee transactions on geoscience and remote sensing*, 41(5), 1056–1061. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.811693>

Robinson, d., & stone, a. (2004). Irradiation modelling made simple: the cumulative sky approach and its applications.

Robinson, d., haldi, f., leroux, p., perez, d., rasheed, a., & wilke, u. (2009). Citysim: comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. *Proceedings of the eleventh international ibpsa conference, conf*, 1083–1090.

Rodríguez algeciras, j. A., gómez consuegra, l., & matzarakis, a. (2016). Spatial-temporal study on the effects of urban street configurations on human thermal comfort in the world heritage city of camagüey -cuba. *Building and environment*, 101, 85–101. [Doi:10.1016/j.buildenv.2016.02.026](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.026).

Rotach, M., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y., Ruffieux, D., Salmond, J., Schatzmann, M. Et Voogt, J. (2005). Bubble - an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81:231–261.

Roth, m., oke, t. R., & emery, w. J. (1989). Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International journal of remote sensing*, 10(11), 1699–1720. <https://doi.org/10.1080/01431168908904002>

Rouse, j. W., haas, r. H., deering, d. W., & schell, j. A. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. (no. E7410113). Texas a and m univ., college station. Remote sensing center. <https://ntrl.ntis.gov/ntrl/dashboard/searchresults/titledetail/e7410113.xhtml>

Rousta, i., olafsson, h., nasserzadeh, m. H., zhang, h., krzyszczak, j., & baranowski, p. (2021). Dynamics of daytime land surface temperature (lst) variabilities in the middle east countries during 2001–2018. *Pure and applied geophysics*, 178(6), 2357–2377. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02765-4>

Rozenstein, o., qin, z., derimian, y., & karnieli, a. (2014). Derivation of land surface temperature for landsat-8 tirs using a split window algorithm. *Sensors*, 14(4), article 4. <https://doi.org/10.3390/s140405768>

Saitoh, T., Shimada, T. Et Hoshi, H. (1996). Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island. *Atmospheric Environment*, 30:3431–3442.

Salamanca, F., Martilli, A. Et Yagüe, C. (2011). A numerical study of the urban heat island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*.

Salisbury, j. W., & d'aria, d. M. (1992). Emissivity of terrestrial materials in the 8–14  $\mu\text{m}$  atmospheric window. *Remote sensing of environment*, 42(2), 83–106. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90092-x](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90092-x)

Schmidt, g. A., ruedy, r., hansen, j. E., aleinov, i., bell, n., bauer, m., bauer, s., cairns, b., canuto, v., cheng, y., del genio, a., faluvegi, g., friend, a. D., hall, t. M., hu, y., kelley, m., kiang, n. Y., koch, d., lacis, a. A., ... yao, m.-s. (2006). Present-day atmospheric simulations using giss modele: comparison to in situ, satellite, and reanalysis data. *Journal of climate*, 19(2), 153–192. <https://doi.org/10.1175/jcli3612.1>

Schwarz, n., schlink, u., franck, u. And großmann, k. (2012) 'relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators - an application for the city of leipzig (germany)', *ecological indicators*, 18, pp. 693-704.

Senanayake, i. P., welivitiya, w. D. D. P., & nadeeka, p. M. (2013). Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in colombo city, sri lanka using landsat-7 etm+ data. *Urban climate*, 5, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.07.004>

Seto, k. C. (2011). Exploring the dynamics of migration to mega-delta cities in asia and africa: contemporary drivers and future scenarios. *Global environmental change-human and policy dimensions*, 21, s107, s94+. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.005> (original work published dec)

Shahmohamadi, P., Che-Ani, A., Sodoudi, S. And Cubasch, U. (2012) 'Mitigating Urban Heat Island Effects in Tehran Metropolitan Area', in Budi Haryanto (ed.) *Air Pollution - A Comprehensive Perspective*. INTECH Open Access Publisher.

Shashua-bar, I., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2011). The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International journal of climatology*, 31(10), 1498–1506.

Shi, Y., Xiang, Y., & Zhang, Y. (2019). Urban Design Factors Influencing Surface Urban Heat Island in the High-Density City of Guangzhou Based on the Local Climate Zone. *Sensors*, 19(16), 3459. <https://doi.org/10.3390/s19163459>

Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A., & Martinez, P. (2008). Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316–327. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>

Sobrino, J., Jimenez-Munoz, J.-C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90, 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>

Srivanit, M., Hokao, K., & Phonekeo, V. (2012). Assessing the Impact of Urbanization on Urban Thermal Environment: A Case Study of Bangkok Metropolitan. *International Journal of Applied Science and Technology*, 2, 243–256.

Srivastava, P. K., Majumdar, T. J., & Bhattacharya, A. K. (2009). Surface temperature estimation in Singhbhum shear zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data. *Advances in Space Research*, 43(10), 1563–1574. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.01.023>

Stemmers, K., Baker, N., Crowther, D., Dubiel, J., Nikolopoulou, M. H., & Ratti, C. (1997). City texture and microclimate. *Urban Design Studies*, 3(1997), 25–50.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39, 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>

Taha, H., & Bornstein, R. (1999). Urbanization of meteorological models and implications on simulated heat islands and air quality.

Taleghani, m., kleerekoper, l., tenpierik, m., & van den dobbelsteen, a. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the netherlands. *Building and environment*, 83, 65–78.

Tempfli, k., huurneman, g. C., bakker, w. H., janssen, l. L. F., feringa, w. F., gieske, a. S. M., grabmaier, k. A., hecker, c. A., horn, j. A., kerle, n., meer, f. D. Van der, parodi, g. N., pohl, c., reeves, c. V., ruitenbeek, f. J. A. Van, schetselaar, e. M., weir, m. J. C., westinga, e., & woldai, t. (2009). *Principles of remote sensing: an introductory textbook*. International institute for geo-information science and earth observation. <https://research.utwente.nl/en/publications/principles-of-remote-sensing-an-introductory-textbook-4>

Traore, M., Lee, M. S., Rasul, A., & Balew, A. (2021). Assessment of land use/land cover changes and their impacts on land surface temperature in Bangui (the capital of Central African Republic). *Environmental Challenges*, 4, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100114>

Tupin, f., inglada, j., & nicolas, j. M. (2014). *Remote sensing imagery*. Iste - wiley. <https://hal.telecom-paris.fr/hal-02287185>

Tzavali, a., paravantis, j. P., & mihalakakou, g. (2015). Urban heat island intensity: a literature review. *Fresenius environmental bulletin*, 24(12), 21.

Unger, J., Sümeghy, Z. Et Zoboki, J. (2001). Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research*, 58:117–127.

Unger, J., Sümeghy, Z., Szegedi, S., Kiss, A. Et Géczi, R. (2010). Comparison and generalisation of spatial patterns of the urban heat island based on normalized values. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35:107–144.

Voogt, j. A., & oke, t. R. (1997). Complete urban surface temperatures. *Journal of applied meteorology*, 36(9), 1117–1132. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1117:cust>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1117:cust>2.0.co;2)

Voogt, j. A., & oke, t. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote sensing of environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(03)00079-8)

Wang, f., qin, z., song, c., tu, l., karnieli, a., & zhao, s. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote sensing*, 7(4), article 4. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>

Wang, l., lu, y., & yao, y. (2019). Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from landsat 8 images. *Sensors*, 19(22), article 22. <https://doi.org/10.3390/s19225049>

Wei, x., & wang, x.-j. (2022). Analyzing the spatial distribution of lst and its relationship with underlying surfaces in different months by classification and intersection. *Frontiers in environmental science*, 10, 872282. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.872282>

Yang, J., Ren, J., Sun, D., Xiao, X., Xia, J. (Cecilia), Jin, C., & Li, X. (2021). Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102818. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818>

Yannas, S. (2001). Toward more sustainable cities. *Solar Energy*, 70(3), 281–294. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00091-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00091-8)

Yola, l. (2020). Canyon effects in urban configurations: tropical context study. *Iop conference series: earth and environmental science*, 436(1), 012028.

Young, n. E., anderson, r. S., chignell, s. M., vorster, a. G., lawrence, r., & evangelista, p. H. (2017). A survival guide to landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932. <https://doi.org/10.1002/ecy.1730>

Yu, c. And hien, w.n. (2006) thermal benefits of city parks. *Energy and buildings*, 38, 105-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.003>

Zha, y., gao, j., & ni, s. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from tm imagery. *International journal of remote sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>

Zhou, s., liu, d., zhu, m., tang, w., chi, q., ye, s., xu, s., & cui, y. (2022). Temporal and spatial variation of land surface temperature and its driving factors in zhengzhou city in china from 2005 to 2020. *Remote sensing*, 14(17), article 17. <https://doi.org/10.3390/rs14174281>

Zhou, w., qian, y., li, x., li, w., & han, l. (2014). Relationships between land cover and the surface urban heat island: seasonal variability and effects of spatial and thematic resolution

of land cover data on predicting land surface temperatures. *Landscape ecology*, 29(1), 153–167.  
<https://doi.org/10.1007/s10980-013-9950-5>

### Sites internet

Bets - bureau d'études techniques salhi. (2016). Mostaganem sayada 1000 logements aadl. [http://www.bet-salhi.com/1000\\_logements\\_aadl\\_s\\_mostaganem.html](http://www.bet-salhi.com/1000_logements_aadl_s_mostaganem.html)

Canada, r. Naturelles. (2008a, January 29). Caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée. Ressources naturelles Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/caracteristiques-dun-satellite-lorbite-et-sa-fauchee/caracteristiques-dun-satellite>

Canada, r. Naturelles. (2008b, January 29). Notions fondamentales de télédétection—introduction. Ressources naturelles Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/introduction/9364>

Delcampe—la marketplace des collectionneurs. (2005). Delcampe. <https://www.delcampe.net/fr/collections/cartes-postales/algerie/mostaganem/>

Meteofrance (2008). Comprendre la météo - glossaire. <http://comprendre.meteofrance.com/>. [En ligne ; accès le 09-12-2022].

Verschaere, A. (2016, May 21). Les 3 modes de transfert thermique. <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>

Teb - centre national de recherches météorologiques. (2014). [https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?Article199#outil\\_sommaire\\_4](https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?Article199#outil_sommaire_4)

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/jc080i036p05113>

<https://login.lacollegelibrary.idm.oclc.org/login?Url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?Direct=true&scope=site&db=nlebk&an=74015>

### **Autres**

Altena, b., boufidou, effrosyni, commandeur, tom, & koudijs, marjolein. (2010). Gm2100 synthesis project. [https://www.academia.edu/942628/gm2100\\_synthesis\\_project](https://www.academia.edu/942628/gm2100_synthesis_project)

Bargain, a. (2012). Etude de la structure et de la dynamique des herbiers de *Zostera noltii* par télédétection multi et hyperspectrale.

Escourrou, g. (1933-) a. Du texte. (1982). Le climat de la France / Gisèle Escourrou. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3356240r>

Escourrou, g. (1984). Quelques remarques sur la climatologie urbaine (some remarks about urban climatology). Bulletin de l'association de géographes français, 61(500), 83–97. <https://doi.org/10.3406/bagf.1984.5450>

Gandemer, j., Guyot, a., Centre scientifique et technique du bâtiment . Section aérodynamique, & unité pédagogique d'architecture . Groupe ambiance bio-climatique. (1976). Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti: guide méthodologique et conseils pratiques... (France. Groupe central des villes nouvelles, ed.). Ministère de l'équipement : ministère de la qualité de la vie.

Sahib. (2022, January 2). Manuel d'utilisation du thermomètre infrarouge uni-t ut301a - manuels+. Manuals+. <https://manuals.plus/fr/uni-t/ut301a-infrared-thermometer-manual>

US EPA, O. (2014, June 23). Heat Island Compendium [Reports and Assessments]. <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-compendium>

Froggit.de. (2019). Manuel d'utilisation de la Station météo Froggit radio professionnelle modèle WH4000SE. Escherstr. 31, 50733 D-Cologne Allemagne : HS Group GmbH & Co. KG.

UNI-Trend. (2022). **Manuel d'utilisation du thermomètre infrarouge UNI-T UT301A**. Zone de développement, ville de Dongguan, La province du Guangdong, en Chine : UNI-TREND TECHNOLOGY

Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods, Report No. 81, WMO/TD No. 1250.

GIEC, 2014: Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p

Fisher, B., Joffre, S., Kukkonen, J., Piringer, M., Rotach, M. Et Schatzmann, M. (2005). Meteorology applied to urban air pollution problems - final report cost action 715. Rapport technique, COST 715

# ***Annexes***

## Annexe

### Annexe 01 : Les modes de transfert de chaleur

#### 1.1 La conduction thermique

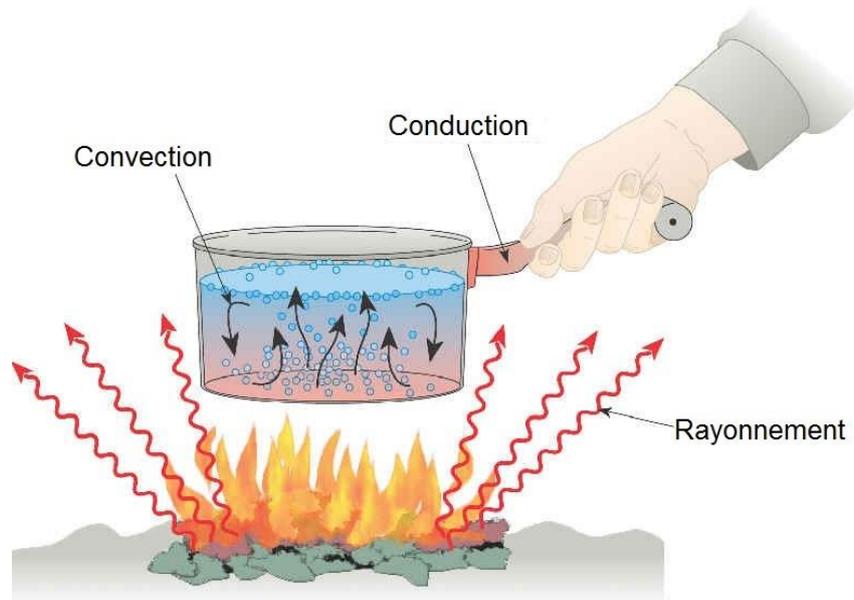
Un phénomène qui se produit exclusivement dans les solides tels que le bois et les métaux. Il s'agit d'un transfert direct de chaleur à travers un milieu matériel, où la chaleur se propage de proche en proche. Le mouvement de l'agitation thermique (flux de chaleur) se fait toujours des zones chaudes vers les zones froides. Les matériaux qui conduisent mal la chaleur, comme les gaz, la laine de verre ou le polystyrène, sont appelés isolants. Par exemple, lorsqu'une personne marche pieds nus sur un carrelage très chaud, il y a une conduction thermique entre le carrelage et les pieds, où la chaleur se transfère du carrelage vers les pieds. Le beurre fond également plus rapidement sur une poêle en acier (un bon conducteur thermique) que sur d'autres matériaux chauffés, comme le bois, car la conductivité thermique de l'acier ( $50 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ) est plus élevée que celle du bois ( $0,2 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ).

#### 1.2 La convection thermique

Spécifique aux fluides tels que les liquides, les gaz et l'air, ainsi qu'aux éléments déformables tels que les roches soumises à de fortes pressions dans le manteau terrestre. Elle est liée au mouvement du fluide, ce qui entraîne également un transport de matière. Les fluides comprennent les états gazeux et liquide, qui ont la capacité de se déformer et de s'écouler pour s'adapter à la forme du récipient qui les contient. Par exemple, lorsque l'on place ses mains au-dessus d'un feu de cheminée ou d'un barbecue, on ressent de l'air chaud. Cela est dû à la convection, qui se produit grâce aux molécules d'air (dioxygène, diazote) situées au-dessus du feu ou de la source de chaleur. Ces molécules montent vers le haut, où il fait plus froid, et lors de leur ascension, elles entrent en contact avec la main, provoquant ainsi la sensation de chaleur.

#### 1.3 Le rayonnement thermique

Un mode de transfert qui implique l'émission de rayonnement électromagnétique par un corps chaud. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement peut se propager même dans le vide, comme c'est le cas pour le rayonnement solaire. L'énergie électromagnétique reçue par le système est absorbée et convertie en énergie thermique, c'est-à-dire en chaleur. Il est intéressant de noter que la plupart des êtres vivants émettent principalement des longueurs d'onde infrarouges (pour des températures courantes). Les longueurs d'onde infrarouges se situent entre la fin du spectre visible (environ  $700/800 \text{ nm}$ , soit environ  $7 \times 10^{-7} \text{ m}$ ) et le domaine des micro-ondes (environ  $1 \text{ mm}$ , soit  $10^6 \text{ nm}$  ou  $10^{-3} \text{ m}$ ).



**Annexe. Figure. 1:** schémas expliquant les trois modes de transfert de chaleur. **Source :**(Verschaere, 2016)

## Annexe 02 : caractéristiques du climat méditerranéen

Selon Givoni (1978), Le terme "climat méditerranéen" englobe non seulement les conditions climatiques qui prévalent autour de la mer Méditerranée, mais également des régions telles que la Californie et les côtes du Chili (17.10). Les principales caractéristiques de ce climat sont les suivantes :

- Une concentration des précipitations en hiver et des étés secs.
- Des étés chauds à très chauds et des hivers frais à froids.
- Un rayonnement solaire intense, surtout en été.

Il existe de nombreuses variations de ce climat, et lorsqu'il est considéré du point de vue de la conception architecturale, il doit être subdivisé en au moins trois sous-types : continental, maritime et montagneux. La transition d'un sous-type à un autre, ainsi que vers les climats désertiques chauds, peut souvent être observée sur de courtes distances. Le climat méditerranéen est donc un bon exemple de la nécessité de prendre en compte les conditions locales, d'appliquer différentes approches et de choisir des solutions architecturales différentes à l'intérieur d'une même zone géographique et sur de courtes distances.

Bien que les exigences physiologiques et les principes de conception des bâtiments diffèrent d'un sous-type de climat méditerranéen à un autre, il existe néanmoins des caractéristiques et des problèmes communs. Dans les climats méditerranéens, les bâtiments doivent être conçus et construits de manière à offrir une protection contre la chaleur estivale, le froid et la pluie hivernaux, sans avoir recours à des systèmes de chauffage ou de climatisation coûteux. Le chauffage en hiver est souvent nécessaire, et parfois la climatisation en été est également recommandée, mais il est possible de concevoir des bâtiments de manière à ce que des dispositifs très simples soient suffisants.

Étant donné que les trois sous-types climatiques sont présents en Israël, avec des caractéristiques similaires à celles d'autres pays, nous les utiliserons comme exemple détaillé pour illustrer la détermination des exigences humaines et l'adaptation de la conception et de la construction des bâtiments aux caractéristiques spécifiques du climat méditerranéen local.

### 1.4 Climat méditerranéen continental

Le climat méditerranéen continental est présent à une distance relativement courte de la mer. En été, il se caractérise par de grandes amplitudes thermiques journalières allant de 15 à 18°C. Les températures diurnes varient de 33 à 37°C, atteignant parfois des valeurs de 38 à

40°C pendant les jours les plus chauds, mais pour une période brève. Les nuits sont fraîches avec des températures minimales d'environ 18 à 20°C. La tension de vapeur d'eau est modérément basse, d'environ 15 mm Hg en été, et l'humidité relative varie de 30 à 40% au milieu de la journée jusqu'à 80 à 90% et plus pendant la nuit. Le vent est relativement fort, il se déclenche le matin, atteint son maximum l'après-midi avec des tourbillons de poussière, puis diminue graduellement tout en conservant des vitesses relativement élevées même le soir, avant de tomber la nuit. La direction du vent est souvent de l'ouest, généralement du sud-ouest le matin et du nord-ouest l'après-midi. En hiver, les températures sont généralement au-dessus du point de congélation, avec une moyenne minimale d'environ 5°C, mais des températures inférieures à 0°C sont fréquentes. La pluviométrie moyenne est faible, d'environ 200 à 300 mm, mais elle est très variable.

### **1.5 Climat méditerranéen maritime**

Le sous-type maritime du climat méditerranéen se trouve le long des côtes de la mer Méditerranée. Il se caractérise par une faible amplitude thermique diurne (de 5 à 10°C) en été, avec des températures diurnes d'environ 25 à 30°C et des températures nocturnes proches de 20 à 23°C. La tension de vapeur d'eau est élevée en été, d'environ 20 à 22 mm Hg. La vitesse du vent est relativement faible pendant la journée en été (environ 2 à 3 m/s) et diminue en soirée à 1,5 m/s, devenant presque nulle la nuit. La direction du vent est souvent de l'ouest, passant du sud-ouest le matin à l'ouest et au nord-ouest l'après-midi. La quantité de précipitations dépend fortement de la latitude et diminue du nord au sud, atteignant environ 500 mm par an. Les précipitations se concentrent sur des périodes de quelques jours avec une forte intensité et sont souvent accompagnées de tempêtes et de vents violents. En hiver, les températures sont généralement supérieures à 0°C, avec une moyenne minimale quotidienne d'environ 8°C et une moyenne mensuelle des minimales proches de 3°C.

### **1.6 Climat méditerranéen de montagne**

Le climat méditerranéen de montagne se distingue des autres sous-types par des hivers plus froids, ce qui en fait l'aspect dominant. Des températures proches ou inférieures à 0°C ne sont pas rares, à tel point que la moyenne mensuelle la plus basse peut être d'environ 0°C. En été, la moyenne journalière peut atteindre un maximum de 30°C, mais il peut y avoir des périodes de chaleur et de sécheresse causée par des vents venant du désert, pendant lesquelles la température peut atteindre 35°C ou plus. Les amplitudes thermiques varient de 7°C en hiver à 12°C en été. La tension de vapeur d'eau est plus faible que dans le sous-type maritime, se situant entre 6 et 8 mm Hg en hiver et entre 10 et 15 mm Hg en été. Les précipitations sont plus

abondantes que dans les autres parties du pays, et la neige est fréquente. Les vents sont plus forts que sur les zones côtières, en particulier dans les vallées, et les tempêtes de pluie sont fréquentes.

### Annexe 03 : Le confort thermique

La définition du confort thermique présente une complexité inhérente en raison de l'interaction simultanée de multiples variables environnementales et personnelles. Selon les travaux de Givoni (1978), maintenir un équilibre thermique entre le corps humain et son environnement constitue l'une des exigences essentielles pour garantir la santé, le bien-être et le confort. Il soutient que cet équilibre est atteint lorsque le corps humain parvient à un état d'équilibre avec son environnement, lequel dépend de la combinaison de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs relèvent du domaine personnel, tels que l'activité physique et le niveau d'habillement, tandis que d'autres sont liés à l'environnement immédiat, tels que la température de l'air, le rayonnement solaire, l'humidité relative et le mouvement de l'air. Par conséquent, il est théoriquement et quantitativement possible de prédire les conditions de confort thermique en fonction des paramètres environnementaux et des variables personnelles, notamment le niveau d'habillement et le taux métabolique.

Givoni (1978) (cité par Potvin, 1997) propose une définition des paramètres environnementaux qui déterminent le confort thermique. Ces paramètres incluent la température de l'air (exprimée en degrés Celsius), la température moyenne radiante (également exprimée en degrés Celsius), l'humidité de l'air (en pourcentage) et le mouvement de l'air (en mètres par seconde). Selon l'auteur, différentes combinaisons de ces paramètres peuvent conduire à un état de confort thermique. Toutefois, il précise que cette combinaison peut être modifiée par d'autres facteurs tels que le taux métabolique et le niveau d'habillement.

**Annexe. Tableau. 1:** Les différents paramètres déterminant le confort thermique. **Source :** (Djaghrouri, 2021)

Paramètres environnementaux	Paramètres personnels
— Température de l'air (°C)	— Taux métabolique (met) ;
— La température radiante moyenne (°C)	— Habillement de niveau (clo).
— Humidité (%) ;	
— Mouvement d'air (m/s).	

Au cours des dernières décennies, les chercheurs se sont efforcés de normaliser une référence de confort, connue sous le nom d'"indice de confort thermique" ou "échelle de

confort", en particulier dans le domaine du confort thermique. Cependant, la majorité de ces indices ont été initialement développés pour définir le confort à l'intérieur des espaces. Les premières recherches ont utilisé des questionnaires pour classer la sensation thermique entre deux extrêmes, à savoir "très chaud" et "très froid", ainsi que des expériences en laboratoire dans des conditions climatiques artificielles. À partir de nombreuses études, une trentaine d'indices de confort thermique ont été identifiés (Djaghrouri, 2021) à savoir :

La température effective corrigée (CET)

La chaleur équivalente (EW)

La température opérative (TO)

La température moyenne radiante (T<sub>mrt</sub>)

Le vote moyen prévisible (PMV)

La température physiologique équivalente (PET)

La température résultante (RT)

Le vote de sensation effective (Actual Sensation Vote) « ASV »

L'UTCI (Indice Universel du Climat Thermique)

SET (Température effective standard)

L'indice d'OUT- SET

Le confort thermique dans les espaces publics extérieurs

## Annexe 04 : le fichier MLT de l'image du 29 Juillet 2019

```

GROUP = L1_METADATA_FILE
GROUP = METADATA_FILE_INFO
  ORIGIN = "Image courtesy of the U.S. Geological Survey"
  REQUEST_ID = "0701907310762_00047"
  LANDSAT_SCENE_ID = "LC81980352019210LGN00"
  LANDSAT_PRODUCT_ID = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1"
  COLLECTION_NUMBER = 01
  FILE_DATE = 2019-08-01T21:08:51Z
  STATION_ID = "LGN"
  PROCESSING_SOFTWARE_VERSION = "LPGS_13.1.0"
END_GROUP = METADATA_FILE_INFO
GROUP = PRODUCT_METADATA
  DATA_TYPE = "L1TP"
  COLLECTION_CATEGORY = "T1"
  ELEVATION_SOURCE = "GLS2000"
  OUTPUT_FORMAT = "GEOTIFF"
  SPACECRAFT_ID = "LANDSAT_8"
  SENSOR_ID = "OLI_TIRS"
  WRS_PATH = 198
  WRS_ROW = 35
  NADIR_OFFNADIR = "NADIR"
  TARGET_WRS_PATH = 198
  TARGET_WRS_ROW = 35
  DATE_ACQUIRED = 2019-07-29
  SCENE_CENTER_TIME = "10:38:16.0942410Z"
  CORNER_UL_LAT_PRODUCT = 37.10215
  CORNER_UL_LON_PRODUCT = -1.69569
  CORNER_UR_LAT_PRODUCT = 37.04647
  CORNER_UR_LON_PRODUCT = 0.85988
  CORNER_LL_LAT_PRODUCT = 35.01461
  CORNER_LL_LON_PRODUCT = -1.72970
  CORNER_LR_LAT_PRODUCT = 34.96300
  CORNER_LR_LON_PRODUCT = 0.75950
  CORNER_UL_PROJECTION_X_PRODUCT = 615900.000
  CORNER_UL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 4107000.000
  CORNER_UR_PROJECTION_X_PRODUCT = 843300.000
  CORNER_UR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 4107000.000
  CORNER_LL_PROJECTION_X_PRODUCT = 615900.000
  CORNER_LL_PROJECTION_Y_PRODUCT = 3875400.000
  CORNER_LR_PROJECTION_X_PRODUCT = 843300.000
  CORNER_LR_PROJECTION_Y_PRODUCT = 3875400.000
  PANCHROMATIC_LINES = 15441
  PANCHROMATIC_SAMPLES = 15161
  REFLECTIVE_LINES = 7721
  REFLECTIVE_SAMPLES = 7581
  THERMAL_LINES = 7721
  THERMAL_SAMPLES = 7581
  FILE_NAME_BAND_1 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B1.TIF"

```

```

FILE_NAME_BAND_2 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B2.TIF"
FILE_NAME_BAND_3 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B3.TIF"
FILE_NAME_BAND_4 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B4.TIF"
FILE_NAME_BAND_5 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B5.TIF"
FILE_NAME_BAND_6 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B6.TIF"
FILE_NAME_BAND_7 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B7.TIF"
FILE_NAME_BAND_8 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B8.TIF"
FILE_NAME_BAND_9 = "LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B9.TIF"
FILE_NAME_BAND_10 =
"LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B10.TIF"
FILE_NAME_BAND_11 =
"LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_B11.TIF"
FILE_NAME_BAND_QUALITY =
"LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_BQA.TIF"
ANGLE_COEFFICIENT_FILE_NAME =
"LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_ANG.txt"
METADATA_FILE_NAME =
"LC08_L1TP_198035_20190729_20190801_01_T1_MTL.txt"
CPF_NAME = "LC08CPF_20190701_20190930_01.01"
BPF_NAME_OLI = "LO8BPF20190729101720_20190729110531.01"
BPF_NAME_TIRS = "LT8BPF20190717130555_20190730101752.01"
RLUT_FILE_NAME = "LC08RLUT_20150303_20431231_01_12.h5"
END_GROUP = PRODUCT_METADATA
GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
CLOUD_COVER = 1.28
CLOUD_COVER_LAND = 0.00
IMAGE_QUALITY_OLI = 9
IMAGE_QUALITY_TIRS = 9
TIRS_SSM_MODEL = "FINAL"
TIRS_SSM_POSITION_STATUS = "ESTIMATED"
TIRS_STRAY_LIGHT_CORRECTION_SOURCE = "TIRS"
ROLL_ANGLE = -0.001
SUN_AZIMUTH = 125.09163549
SUN_ELEVATION = 63.70376264
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0154163
SATURATION_BAND_1 = "N"
SATURATION_BAND_2 = "N"
SATURATION_BAND_3 = "N"
SATURATION_BAND_4 = "N"
SATURATION_BAND_5 = "Y"
SATURATION_BAND_6 = "Y"
SATURATION_BAND_7 = "Y"
SATURATION_BAND_8 = "N"
SATURATION_BAND_9 = "N"
GROUND_CONTROL_POINTS_VERSION = 4
GROUND_CONTROL_POINTS_MODEL = 440
GEOMETRIC_RMSE_MODEL = 7.666
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_Y = 5.088
GEOMETRIC_RMSE_MODEL_X = 5.734
GROUND_CONTROL_POINTS_VERIFY = 235

```

```

GEOMETRIC_RMSE_VERIFY = 6.139
TRUNCATION_OLI = "UPPER"
END_GROUP = IMAGE_ATTRIBUTES
GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 737.15887
RADIANCE_MINIMUM_BAND_1 = -60.87482
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 754.85968
RADIANCE_MINIMUM_BAND_2 = -62.33656
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 695.59674
RADIANCE_MINIMUM_BAND_3 = -57.44260
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 586.56635
RADIANCE_MINIMUM_BAND_4 = -48.43884
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 358.94937
RADIANCE_MINIMUM_BAND_5 = -29.64215
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 89.26744
RADIANCE_MINIMUM_BAND_6 = -7.37173
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 30.08791
RADIANCE_MINIMUM_BAND_7 = -2.48467
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 663.83167
RADIANCE_MINIMUM_BAND_8 = -54.81944
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 140.28555
RADIANCE_MINIMUM_BAND_9 = -11.58483
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_10 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_10 = 0.10033
RADIANCE_MAXIMUM_BAND_11 = 22.00180
RADIANCE_MINIMUM_BAND_11 = 0.10033
END_GROUP = MIN_MAX_RADIANCE
GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_1 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_1 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_2 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_2 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_3 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_3 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_4 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_4 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_5 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_5 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_6 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_6 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_7 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_7 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_8 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_8 = -0.099980
REFLECTANCE_MAXIMUM_BAND_9 = 1.210700
REFLECTANCE_MINIMUM_BAND_9 = -0.099980
END_GROUP = MIN_MAX_REFLECTANCE
GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_1 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_1 = 1

```

QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_2 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_2 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_3 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_3 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_4 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_4 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_5 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_5 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_6 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_6 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_7 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_7 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_8 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_8 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_9 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_9 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_10 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_10 = 1  
 QUANTIZE\_CAL\_MAX\_BAND\_11 = 65535  
 QUANTIZE\_CAL\_MIN\_BAND\_11 = 1  
 END\_GROUP = MIN\_MAX\_PIXEL\_VALUE  
 GROUP = RADIOMETRIC\_RESCALING  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_1 = 1.2177E-02  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_2 = 1.2470E-02  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_3 = 1.1491E-02  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_4 = 9.6897E-03  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_5 = 5.9296E-03  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_6 = 1.4746E-03  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_7 = 4.9703E-04  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_8 = 1.0966E-02  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_9 = 2.3174E-03  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_10 = 3.3420E-04  
 RADIANCE\_MULT\_BAND\_11 = 3.3420E-04  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_1 = -60.88700  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_2 = -62.34903  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_3 = -57.45410  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_4 = -48.44853  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_5 = -29.64808  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_6 = -7.37321  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_7 = -2.48517  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_8 = -54.83040  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_9 = -11.58714  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_10 = 0.10000  
 RADIANCE\_ADD\_BAND\_11 = 0.10000  
 REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_1 = 2.0000E-05  
 REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_2 = 2.0000E-05  
 REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_3 = 2.0000E-05  
 REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_4 = 2.0000E-05  
 REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_5 = 2.0000E-05  
 REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_6 = 2.0000E-05

```
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
END_GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442
END_GROUP = TIRS_THERMAL_CONSTANTS
GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
MAP_PROJECTION = "UTM"
DATUM = "WGS84"
ELLIPSOID = "WGS84"
UTM_ZONE = 30
GRID_CELL_SIZE_PANCHROMATIC = 15.00
GRID_CELL_SIZE_REFLECTIVE = 30.00
GRID_CELL_SIZE_THERMAL = 30.00
ORIENTATION = "NORTH_UP"
RESAMPLING_OPTION = "CUBIC_CONVOLUTION"
END_GROUP = PROJECTION_PARAMETERS
END_GROUP = L1_METADATA_FILE
END
```

## Annexe 05 : Les résultats de la campagne de mesure

### 1.7 Température de l'air

Station	07 :00/09 :00	09 :00/11 :00	11 :00/13 :00	13 :00/15 :00	15 :00/17 :00	17 :00/19 :00
S 01	26,3	28,6	29,3	32	29,5	32
S 02	25,8	28,7	27,7	31,2	29,4	31,9
S 03	26	28,2	28,5	32,2	30,6	33,2
S 04	26	28,6	27,6	32,3	28,8	30,9
S 05	27	28,8	29,4	34,1	31,8	31,4
S 06	27,8	30,7	30	32,9	31,6	31,3
S07	27,8	28,6	28,4	29,6	31,2	31,1

### 1.8 Humidité Relative

Station	07 :00/09 :00	09 :00/11 :00	11 :00/13 :00	13 :00/15 :00	15 :00/17 :00	17 :00/19 :00
S 01	82	72	72	63	75	59
S 02	85	75	79	64	73	59
S 03	84	76	76	63	70	59
S 04	83	76	78	60	74	65
S 05	80	74	68	57	63	66
S 06	78	66	70	63	63	65
S 07	77	73	75	75	61	66

### 1.9 Vitesse du vent

Station	07 :00/09 :00	09 :00/11 :00	11 :00/13 :00	13 :00/15 :00	15 :00/17 :00	17 :00/19 :00
S 01	1,1	1,4	1,4	1,8	5,8	2,5
S 02	1,8	4	1,8	5,8	7,2	5,8
S 03	1,8	2,2	3,2	2,9	7,9	3,2
S 04	4,3	1,4	1,4	0	13	6,5
S 05	0,4	1,8	1,8	0	2,9	7,6
S 06	1,4	0,4	2,2	0,4	2,9	5,4
S 07	1,4	2,2	0,4	7,9	7,9	11,2

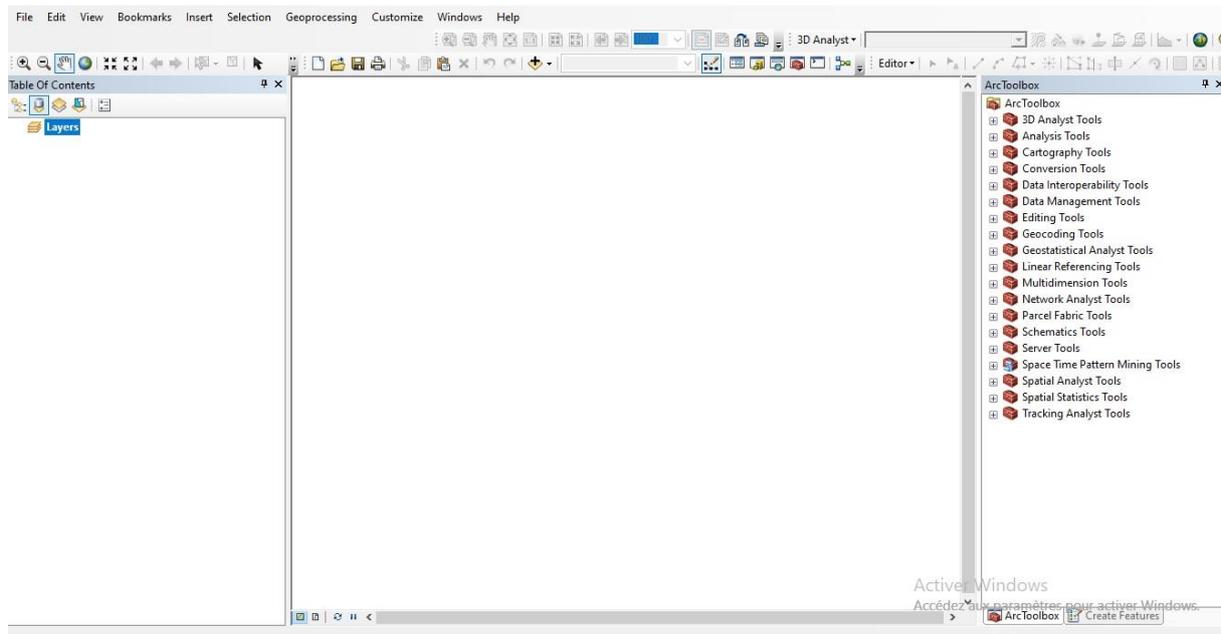
**1.10 Température de surface du sol**

Station	07 :00/09 :00	09 :00/11 :00	11 :00/13 :00	13 :00/15 :00	15 :00/17 :00	17 :00/19 :00
S1	28,5	39	43,8	51,9	47,1	38,5
S2	28,9	39,3	41,3	54,3	48,7	40
S3	29,8	35,7	41	51,5	52	42,2
S4	29,5	29,3	36,9	48,3	35,3	37,2
S5	29,2	36	36,6	47,3	45,9	43,2
S6	31,9	39,6	39,9	45	44,3	40,2
S7	27,4	29,2	29,5	38,6	44,7	41,8

## Annexe 06 : Interface des logiciels : SPSS et Arcgis

	Scénario	FVC	Température_air_10	Température_sol_10	Température_air_14	Température_sol_14	Température_air_22	Température_sol_22	var
1	cas réel	.80	27,47	30,84	32,19	41,16	26,80	27,90	
2	cas réel H	.70	27,07	28,03	31,46	40,59	27,05	27,80	
3	Cour fermé	.76	27,26	30,80	31,79	41,05	27,02	28,09	
4	Cour fermé H	.64	26,79	28,24	30,91	40,84	27,30	28,00	
5	Linéaire N/S	.81	27,47	30,83	32,48	40,41	26,63	27,52	
6	Linéaire N/S H	.71	27,47	29,22	32,38	39,99	26,57	27,31	
7	Linéaire E/O	.88	27,77	31,17	32,86	41,44	26,64	27,92	
8	Linéaire E/O H	.84	27,24	30,87	31,75	40,24	26,98	27,77	
9	L N/S	.78	27,29	30,84	31,85	41,18	27,02	28,13	
10	L N/S H	.68	26,87	28,08	31,09	41,25	27,23	28,30	
11	L E/O	.79	27,60	30,85	32,45	40,93	26,68	27,74	
12	L E/O H	.68	27,16	28,85	31,62	40,20	26,98	27,59	
13	L E/O H	.81	27,29	31,10	31,77	41,01	27,01	28,00	

Annexe. Figure. 2: Interface du logiciel SPSS



Annexe. Figure. 3: Interface du logiciel Arcgis

## Annexe 07 : Les sorties du logiciel SPSS

## 1.11 Température de l'air

## 1.11.1 A 10 :00h

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	,786 <sup>a</sup>	,618	,591	,18159
a. Prédicteurs : (Constante), FVC				

Coefficients <sup>a</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	24,746	,534		46,345	,000
	FVC	3,328	,699	,786	4,760	,000
a. Variable dépendante : Température_air_10						

## 1.11.2 A 14 :00h

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	,739 <sup>a</sup>	,545	,513	,41489
a. Prédicteurs : (Constante), FVC				

Coefficients <sup>a</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	26,887	1,220		22,039	,000
	FVC	6,547	1,597	,739	4,099	,001
a. Variable dépendante : Température_air_14						

## 1.11.3 A 22 :00h

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	,600 <sup>a</sup>	,360	,314	,19509
a. Prédicteurs : (Constante), FVC				

Coefficients <sup>a</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	28,529	,574		49,732	,000
	FVC	-2,106	,751	-,600	-2,804	,014
a. Variable dépendante : Température_air_22						

## 1.12 Température de surface du sol

## 1.12.1 A 10 :00h

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	,827 <sup>a</sup>	,684	,662	,72751
a. Prédicteurs : (Constante), FVC				

Coefficients <sup>a</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	18,259	2,139		8,535	,000
	FVC	15,434	2,801	,827	5,510	,000
a. Variable dépendante : Température_sol_10						

## 1.12.2 A 14 :00h

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	,243 <sup>a</sup>	,059	-,008	,51298
a. Prédicteurs : (Constante), FVC				

Coefficients <sup>a</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	39,488	1,508		26,179	,000
	FVC	1,855	1,975	,243	,939	,364

a. Variable dépendante : Température\_sol\_14

## 1.12.3 A 22 :00h

Récapitulatif des modèles				
Modèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation
1	,046 <sup>a</sup>	,002	-,069	,29984

a. Prédicteurs : (Constante), FVC

Coefficients <sup>a</sup>						
Modèle		Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	t	Sig.
		B	Erreur standard	Bêta		
1	(Constante)	28,069	,882		31,836	,000
	FVC	-,199	1,154	-,046	-,173	,865

a. Variable dépendante : Température\_sol\_22