

Faculté des bioingénieurs

Impact de la résolution spatiale du capteur TIRS dans l'étude des îlots de chaleur urbains

Effet de l'occupation du sol dans la ville de Liège

Auteure Margot DOMINIQUE

Promoteurs Pr. Pierre DEFOURNY (SST/ELI/ELIE)
Dr. Julien RADOUX (SST/ELI/ELIE)

Lecteurs Pr. Sébastien LAMBOT(SST/ELI/ELIE)
M. Thomas HALFORD (Ville de Liège)

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement

REMERCIEMENTS

« En période de canicule, ce sont les arbres qui sont les plus à plaindre.
Ils ne peuvent pas se mettre à l'ombre. »
Denis Langlois

Au travers de ces quelques lignes, je désire remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la bonne réalisation de ce mémoire.

Je remercie avant tout mes deux co-promoteurs, le Pr. Pierre Defourny, pour son suivi, sa bienveillance et son soutien lors de l'élaboration de ce mémoire. Le Dr. Julien Radoux, pour son implication, sa disponibilité et ses recommandations.

Je souhaite également exprimer mes remerciements au Pr. Sébastien Lambot et à M. Thomas Halford qui ont accepté d'être lecteurs de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier Baptiste Delhez, Nicolas Deffense et Barbara Stinghamber, les membres du laboratoire de Géomatique de la Faculté des bioingénieurs. Merci à eux pour leurs conseils et tout particulièrement à Quentin Deffense pour son aide dans mes problèmes de code. Merci aussi à Audric Bos pour son mémoire qui m'a permis de mieux appréhender le sujet et de continuer sur sa lancée.

Merci également à ma sœur, Marie Dominique, à Mireille Wenkin et à mon copain, Rémy Rousseau, pour leurs corrections de l'orthographe et pour l'amélioration des tournures de phrases. Merci à Emeline Gomes pour sa relecture et pour ces deux années.

Sans oublier, un grand merci à mes parents qui m'ont toujours soutenue ainsi qu'à ma famille et mes amis pour leur présence continue durant ces 5 années d'étude.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
1 Synthèse bibliographique	4
1.1 Îlots de chaleur urbains	4
1.1.1 Facteurs incontrôlables influençant les ICU	5
1.1.2 Facteurs contrôlables influençant les ICU	6
1.2 Conséquences des ICU	10
1.2.1 Conséquences des ICU sur la faune et la flore	10
1.2.2 Conséquences des ICU sur la santé humaine	11
1.2.3 Conséquences des ICU sur la consommation d'énergie	11
1.3 Mesure de l'intensité de l'ICU	12
1.3.1 Mesure de la température de l'air	12
1.3.2 Mesure de la LST par télédétection	12
1.3.3 Comparaison de l'intensité des ICU quantifiée à l'aide de la température de l'air et de la LST	19
1.3.4 Résolution spatiale du capteur	20
1.4 Modélisation des ICU	22
2 Objectifs	23
3 Zone d'étude	24
4 Matériels et méthodes	26
4.1 Démarche générale	26
4.2 Sources de données	28
4.2.1 Série d'images Landsat 8	28
4.2.2 Carte d'occupation du sol en Wallonie	29
4.2.3 PSF	30
4.3 Outils numériques	31
4.3.1 Système d'information géographique	31
4.3.2 Langages de programmation et outils	31
4.4 Traitement des images satellites	32
4.4.1 Estimation de la LST	32

4.4.2	Cartographie des SHI	32
4.5	Traitement des données d'occupation du sol	33
4.5.1	Regroupement des données d'occupation du sol	33
4.5.2	Calcul des proportions d'occupation du sol par pixel de 30 X 30 m	33
4.6	Traitement des données d'occupation du sol afin de prendre en compte la résolution effective (PSF) du capteur TIRS	34
4.6.1	Approximation de la PSF du capteur TIRS	34
4.6.2	Matrice PSF	35
4.6.3	Calcul des proportions d'occupation du sol pour tenir compte de la résolution effective (PSF)	36
4.6.4	Calcul des proportions d'occupation du sol par pixel de 30 X 30 m en tenant compte de la résolution effective (PSF)	36
4.7	Caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST	37
4.8	Modèle linéaire mixte	37
4.8.1	Construction de modèles linéaires mixtes	37
4.8.2	Utilisation des modèles linéaires mixtes	38
4.8.3	Validation des modèles linéaires mixtes	39
5	Résultats et discussion	40
5.1	Répartition spatiale de la LST	40
5.2	Cartographie des SHI	41
5.3	Caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST	43
5.3.1	Influence de l'occupation du sol sur la LST	43
5.3.2	Influence de l'occupation du sol considérant la PSF sur la LST	46
5.3.3	Effet de la prise en considération de la PSF	49
5.4	Modèles linéaires mixtes	49
5.4.1	Valeurs des modèles linéaires mixtes	49
5.4.2	Application des modèles linéaires mixtes	51
5.4.3	Validation des modèles linéaires mixtes	51
5.5	Discussion	54
5.5.1	Cartographie des SHI	54
5.5.2	Caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST	54
5.5.3	Prédiction des SHI	56
6	Conclusions et perspectives	58
	Bibliographie	A
	Annexes	I

TABLE DES FIGURES

1.1	<i>Sky View Factors</i> (SVF) différents en fonction de l’environnement (APUR, 2012).	7
1.2	Représentation des valeurs de luminance d’un corps noir pour des longueurs d’onde comprises entre 0 et 20 μm et des températures du corps noir de 300, 600, 800 et 1000 K. Les traits bleus représentent les valeurs de λ_{max} spécifiques à chaque température (ANTOINE & LOPEZ, 2020).	14
1.3	Transmittance de l’atmosphère standard en fonction de la longueur d’onde (ANTOINE & LOPEZ, 2020).	14
1.4	Série chronologique du NDVI (PETTORELLI et al., 2005).	16
3.1	Localisation de la zone d’étude.	24
3.2	Occupation du sol dans la zone d’étude (LENNERT et al., 2019).	25
4.1	Démarche générale de l’étude	27
4.2	Les ronds bleus représentent l’estimation de l’ESF pour le site Sarah 3 avec en ligne cyan, un modèle gaussien ajusté. Le côté eau est à gauche et le côté terre à droite (WENNY et al., 2015).	30
4.3	Fonction gaussienne approximant l’ESF calculée dans l’article WENNY et al. (2015) pour le site du Sarah 3.	34
4.4	Estimation de la PSF du capteur TIRS de Landsat 8.	35
4.5	Passage de la fonction de la PSF à la matrice de pondération simulant l’effet de la PSF.	35
4.6	Balayage de la matrice PSF afin d’obtenir les proportions de l’occupation du sol « Eau de surface » en tenant compte de la PSF.	36
5.1	LST à la date du 27 juin 2019 sur la zone étudiée à une résolution de 30 m.	40
5.2	Cartographie des SHI pour la zone étudiée.	42
5.3	Comparaison de la LST aux pourcentages des différentes occupations du sol à la date du 07 mai 2018.	45
5.4	Boîte à moustaches des coefficients de détermination pour les 11 dates entre la LST et l’occupation du sol. Les croix représentent les moyennes et leurs valeurs sont indiquées sur le graphe.	45
5.5	Comparaison de la LST aux pourcentages des différentes occupations du sol en considérant la PSF à la date du 07 mai 2018.	48

5.6	Boîte à moustaches des coefficients de détermination pour les 11 dates entre la LST et l'occupation du sol considérant la PSF du capteur TIRS. Les croix représentent les moyennes et leurs valeurs sont indiquées sur le graphe.	48
5.7	Coefficients de détermination moyens entre la LST et les proportions de chaque occupation du sol avec (vert) et sans PSF (orange) et intervalles de confiance de 95%.	49
5.8	Valeurs calibrées du modèle linéaire mixte sans PSF.	50
5.9	Valeurs calibrées du modèle linéaire mixte avec PSF.	50
5.10	Application des modèles linéaires mixtes à la date du 04 août 2018. (A) LST estimée via le modèle sans PSF, (B) LST calculée via LANDARTs, (C) LST estimée via le modèle avec PSF.	51
5.11	Cartographie des erreurs générées par le modèle sans PSF. $\Delta LST = LST_{LANDARTs} - LST_{modele}$	52
5.12	Cartographie des erreurs générées par le modèle avec prise en compte de la PSF. $\Delta LST = LST_{LANDARTs} - LST_{modele}$	52
5.13	Histogramme des erreurs moyennes d'estimation de la LST via le modèle sans PSF.	53
5.14	Histogramme des erreurs moyennes d'estimation de la LST via le modèle avec PSF.	53
5.15	Cartographie de la LST et du NDVI pour la classe « Couvert herbacé en rotation dans l'année » à la date du 31 juillet 2020.	56

LISTE DES TABLEAUX

4.1	Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat 8 (USGS, p. d.-c).	28
4.2	Images sélectionnées (USGS, p. d.-a).	29
5.1	Statistiques de la LST pour chaque date.	41

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BLHI	Boundary Layer Heat Island (Îlot de chaleur de la couche limite)
CLHI	Canopy Layer Heat Island (Îlot de chaleur de la canopée)
ESF	Edge Spread Function (Fonction d'étalement des bords)
FWHM	Full Width at Half Maximum (Largeur à mi-hauteur)
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
GSD	Ground Sample Distance (Résolution au sol)
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
LANDARTs	Landsat Automatic Retrieval of Surface Temperatures
LST	Land Surface Temperature (Température de la surface terrestre)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation par différence normalisée)
OLI	Operational Land Imager
PSF	Point Spread Function (Fonction d'étalement du point)
R ²	Coefficient de détermination
SHI	Surface Heat Island (Îlot de chaleur de surface)
SIG	Systèmes d'Information Géographique
SVF	Sky View Factors (Facteur de vue du ciel)
TIRS	Thermal InfraRed Sensor (Capteur infrarouge thermique)
WGS84	World Geodetic System 1984

INTRODUCTION

Il est de notoriété publique que le climat à l'échelle planétaire subit d'importantes perturbations liées aux activités humaines. Selon le rapport de 2021 du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « L'influence humaine a réchauffé le climat à un rythme sans précédent depuis au moins les 2000 dernières années. » (GIEC, 2021). Aujourd'hui déjà, le changement climatique provoque de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes dans le monde entier. Ces phénomènes extrêmes sont, par exemple, des vagues de chaleur, des fortes précipitations et des épisodes de sécheresse. Depuis les années 1950, dans la plupart des régions du globe, les périodes de températures extrêmes sont devenues plus fréquentes et plus intenses (GIEC, 2021).

Différents scénarios ont été envisagés en fonction des émissions de gaz à effet de serre (GES) prévues. Dans tous les scénarios envisagés, la température à la surface du globe continuera d'augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle. Les prévisions de la température moyenne à la surface du globe entre 2081 et 2100 sont de 1 °C à 1,8 °C supplémentaire par rapport à 1850-1900 dans le scénario de très faibles émissions de GES et de 3,3 °C à 5,7 °C dans le scénario de très fortes émissions de GES. Les événements extrêmes vont continuer de s'amplifier avec l'augmentation supplémentaire de la température terrestre. Chaque augmentation supplémentaire de 0,5 °C entraîne une augmentation clairement perceptible de l'intensité et de la fréquence des extrêmes de chaleur (GIEC, 2021).

Or, les vagues de chaleur compromettent la santé publique, réduisent la productivité et limitent la fonctionnalité des infrastructures. En Europe, parmi les catastrophes naturelles survenues au cours des dernières décennies, ce sont les vagues de chaleur qui ont causé le plus de décès (AGENCY, 2012). Dans l'Union européenne, selon les projections, si aucune action d'adaptation n'est entreprise, d'ici 2050, chaque année 120 000 personnes succomberaient à la chaleur et 150 milliards d'euros seraient perdus en raison des vagues de chaleur. De plus, le phénomène de vieillissement de la population augmente la proportion de personnes vulnérables aux vagues de chaleur (AGENCY, 2015).

Selon l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), une vague de chaleur climatique nationale est annoncée lorsque les maxima à Uccle atteignent au moins 25 °C durant au moins 5 jours consécutifs parmi lesquels le seuil des 30 °C est atteint durant au moins trois jours (IRM, p. d.-b). Depuis le début du vingtième siècle, la décennie ayant subi le plus de vagues de chaleur est 2011-2020. En effet, sur 44 vagues de chaleur nationales enregistrées depuis 1901, 10 se sont produites entre 2011 et 2020, ce qui représente 2,7 fois plus que les autres décennies (IRM,

p. d.-a). Il est donc probable que la fréquence des canicules soit déjà en augmentation visible en Belgique.

L'impact des canicules est particulièrement fort dans les zones urbaines. En effet, le phénomène microclimatique d'îlots de chaleur urbains (ICU) est défini comme une augmentation significative de la température de l'air urbain par rapport à l'environnement rural immédiat (OKE, 1982). Les différences de température peuvent atteindre plus de 10 °C et sont particulièrement frappantes la nuit. Ce phénomène peut également se produire dans les villes relativement petites. Les ICU sont dus à l'urbanisation et aux activités humaines et peuvent mettre à mal la faune et la flore locale, l'économie et la santé humaine. L'impact des canicules dans les villes est aggravé par l'augmentation des surfaces artificielles au détriment de zones vertes au sein de celles-ci. Les ICU accentuent l'impact des vagues de chaleur en provoquant une augmentation des températures dans les zones les plus densément peuplées (AGENCY, 2012).

La ville de Liège n'échappe pas à ce phénomène. En effet, la différence de température entre le centre-ville et les zones plus campagnardes est significative en période chaude. De plus, à l'horizon 2100, le climat liégeois pourrait correspondre à celui de Madrid ou Porto. Les vagues de chaleur passeraient d'une fréquence de 2 à 6 jours par an aujourd'hui à 15 et 27 jours en 2100. Dans ce contexte de changement climatique global, la ville de Liège est désireuse de réguler les ICU. C'est pourquoi elle lance son Plan Canopée. Ce plan a pour finalité l'augmentation de son couvert arboré de manière à refroidir la ville lors de vagues de chaleur. En collaborant avec le laboratoire de Géomatique de l'UCLouvain et l'Institut Scientifique de Service Public (ISSEP), la ville de Liège souhaite implanter des espaces verts au cœur des zones prioritaires et dans les densités les plus profitables (de LIÈGE, p. d.).

L'étude de ce phénomène à grande échelle spatiale et temporelle est possible via la télédétection. En effet, cette technique permet d'obtenir la température de la surface terrestre (Land Surface Temperature, LST) et donc d'étudier un type d'ICU qu'est l'îlot de chaleur de surface (SHI). Pour ce travail, des données obtenues par le satellite Landsat 8 seront analysées. Lors de l'analyse de ces données, il est important de prendre en considération la qualité spatiale de l'instrument. Ce mémoire a donc pour ambition d'appréhender la qualité spatiale de l'instrument de manière à mieux comprendre le phénomène de SHI ainsi que l'influence de l'occupation du sol sur la LST. Cela permettra, dans un second temps, de comprendre dans quelle mesure l'occupation du sol permet de prédire les SHI à l'échelle de la ville de Liège.

Pour ce faire, ce travail débute par un état des connaissances scientifiques actuelles sur ce phénomène d'ICU. Les facteurs influençant les ICU ainsi que les conséquences de ceux-ci sont exposés dans cette partie. Ensuite, les techniques de mesure de la température sont expliquées. Les techniques de mesure de la température de l'air sont brièvement énoncées. Les méthodes de mesure par télédétection de la LST sont développées. Les concepts physiques y faisant référence sont appréhendés et les capteurs satellitaires capables d'obtenir des données dans l'infrarouge thermique sont énumérés. Ensuite, les techniques permettant de passer de ces données à la LST sont expliquées. Par la suite, une introduction à la résolution spatiale des capteurs est réalisée. Finalement, des modèles de prédiction des ICU sont présentés.

Cette vision globale des connaissances scientifiques sur le sujet permet de développer les objectifs spécifiques de ce mémoire dans un second chapitre. Les questions de recherche du mémoire y sont présentées.

Le troisième chapitre introduit et délimite la zone d'étude qu'est la ville de Liège.

Le chapitre intitulé matériels et méthodes a pour but d'expliquer les démarches réalisées et ainsi justifier les différents choix opérés. En premier lieu, une synthèse des étapes réalisées est présentée afin de saisir de manière globale la structure des phases de traitement. Les données et programmes utilisés sont, ensuite, expliqués et justifiés. Finalement, les différents traitements effectués sont explicités et motivés.

Le chapitre suivant reprend et décrit les résultats produits durant ce mémoire. Par la suite, une discussion sur les résultats est menée dans le but de les interpréter et d'en sortir différents enseignements.

Le dernier chapitre conclut ce mémoire en synthétisant les résultats ainsi que les apprentissages pouvant être tirés de ce mémoire. Dans ce chapitre se trouvent les réponses aux questions de recherche de ce travail. Sur cette base, une série de perspectives sont formulées.

CHAPITRE

1

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre aborde l'état de l'art relatif aux ICU. La première partie de ce chapitre s'intéresse à la compréhension du phénomène d'ICU. Les facteurs influençant les ICU y sont analysés. Ensuite, la deuxième partie aborde les conséquences de ce phénomène tant sur la flore et la faune que sur la santé humaine et l'économie. La troisième partie synthétise les différentes techniques de mesure de la température. Cette partie traite de la mesure de la température de l'air et principalement de la mesure par télédétection de la LST. Les concepts physiques en relation sont expliqués et les capteurs satellitaires capables d'obtenir des données dans l'infrarouge thermique sont énoncés. Les techniques permettant le passage des données acquises par les satellites dans l'infrarouge thermique vers des données de LST sont expliquées. Ensuite, une partie décrit la résolution spatiale des capteurs et particulièrement celle du capteur TIRS. Finalement, la dernière section aborde la modélisation des ICU.

1.1 Îlots de chaleur urbains

Le terme îlot de chaleur urbain décrit un phénomène microclimatique qui se manifeste par une augmentation significative de la température de l'air urbain par rapport à l'environnement rural immédiat (AGENCY, 2012). Une zone peut être classée comme subissant un ICU lorsque la température de l'air dans le centre-ville est d'au moins 2 °C plus chaude que dans la zone rurale avoisinante (ODLI et al., 2016). Cette différence de température peut atteindre 10 °C, voir plus dans certains cas (OKE, 1982).

Ce phénomène est induit par des modifications environnementales attribuables à l'accroissement urbain. Cette urbanisation conduit aux changements des caractéristiques physiques de la surface ainsi qu'au changement de la morphologie de l'espace. Ces transformations impliquent une modification du bilan énergétique à l'échelle locale de la surface. Cela entraîne une augmentation de la LST qui crée une augmentation du flux de chaleur sensible et une hausse conséquente de la température de l'air (DUBREUIL et al., 2011 ; FABRIZI et al., 2010).

La réduction du refroidissement par évaporation et par ventilation, la variation du bilan énergétique et l'augmentation du dégagement de chaleur anthropique dans les zones urbaines sont les

facteurs principaux de la modification de climat urbain (FOUNDA & SANTAMOURIS, 2017).

Il est possible de distinguer trois types d'ICU :

- l'îlot de chaleur de la canopée (*Canopy Layer Heat Island*, CLHI) ;
- l'îlot de chaleur de la couche limite (*Boundary Layer Heat Island*, BLHI) ;
- l'îlot de chaleur de surface (*Surface Heat Island*, SHI).

Ce dernier fait référence à un réchauffement de surface alors que les deux premiers désignent une augmentation de la température de l'atmosphère urbain. CLHI se rapporte au réchauffement de la couche de la canopée urbaine qui représente la couche d'air la plus proche de la surface dans les villes allant du sol jusqu'à la hauteur moyenne des toits des bâtiments. La couche limite urbaine se situe juste au-dessus de la couche de la canopée. BLHI concerne l'augmentation de la température de la couche limite urbaine dont l'épaisseur s'étend donc du toit des bâtiments à 1 kilomètre ou plus pendant la journée et se restreint à des centaines de mètres ou moins la nuit (AZEVEDO et al., 2016 ; FABRIZI et al., 2010).

La génération d'ICU est la réponse à de nombreux facteurs combinés qui peuvent être classés en facteurs contrôlables et incontrôlables (RIZWAN et al., 2007).

1.1.1 Facteurs incontrôlables influençant les ICU

L'intensité de même que les caractéristiques temporelles et spatiales de l'ICU varient selon différents facteurs non contrôlables tels que les saisons et les conditions météorologiques (FABRIZI et al., 2010).

Cycle jour/nuit

Le phénomène d'ICU connaît une fluctuation journalière. Les différences de températures entre les zones urbaines et rurales sont pratiquement inexistantes aux heures les plus chaudes de la journée. En revanche, de grandes différences de température se font sentir la nuit. Cela s'explique par un refroidissement nocturne plus faible en ville par rapport à la zone rurale avoisinante (APUR, 2012 ; CANTAT, 2004).

Saisons

Il existe une fluctuation saisonnière de l'intensité et de la fréquence des ICU. En Europe, les ICU les plus forts sont majoritairement recensés en été. Le mois ayant dénombré le plus d'ICU est août. Alors que celui qui en a connu le moins est le mois de décembre. Cependant, la saison n'est pas le seul facteur explicatif des répartitions des ICU durant l'année. En effet, certaines journées estivales présentent de faibles ICU alors qu'inversement des journées hivernales peuvent recenser des ICU considérables. Cela s'explique par la fluctuation des conditions météorologiques de nos latitudes. Les saisons sont donc plutôt des révélateurs de la fréquence des conditions météorologiques favorables ou non à la formation d'ICU (CANTAT, 2004 ; LIANG et al., 2020).

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques influencent considérablement l'intensité et la fréquence des ICU. Les facteurs propices aux ICU sont le caractère dégagé du ciel et la stagnation des masses d'air. À contrario, les nuages, les vents, les précipitations et l'humidité relative ont une corrélation négative avec l'intensité des ICU. Les ICU se produisent donc principalement lorsque la zone est en condition radiative : ciel clair et vent faible. À contrario, les conditions dépressionnaires :

nébulosité, vent et précipitations réduisent la formation d'ICU (CANTAT, 2004; DUBREUIL et al., 2011; LIANG et al., 2020; PENG et al., 2019). Un vent supérieur à environ 4 mètres par seconde [m/s] est un seuil au-delà duquel l'intensité de l'ICU est minimale. Cela s'explique par le fait que les vents forts mélangent la chaleur dans l'atmosphère. Néanmoins, cette valeur seuil est variable en fonction de la forme de la ville. De même, les nuages bas dans l'atmosphère diminuent considérablement l'intensité des ICU (OKE, 1987).

Position géographique

La position géographique de la région a également son influence sur les ICU. De fait, en fonction de la position sur la Terre, l'inclinaison par rapport au soleil est différente et les mouvements des masses d'air changent. Il en ressort donc que les régions côtières présentent de plus faibles intensités d'ICU que les régions au milieu des terres. Cela est à mettre en relation avec la vitesse du vent. Les ICU sont également plus intenses dans les espaces urbains en milieux arides qu'en milieux humides dus à la corrélation entre les ICU, les précipitations et l'humidité relative. Par contre, il ne semble pas y avoir de lien important entre l'intensité de l'ICU et les différentes zones climatiques (PENG et al., 2019).

1.1.2 Facteurs contrôlables influençant les ICU

La partie contrôlable de l'ICU englobe les éléments de conception et de planification de la ville (RIZWAN et al., 2007). Il est primordial d'étudier ces facteurs puisqu'ils vont permettre d'agir pour atténuer les ICU.

Morphologie urbaine

Le microclimat et donc les ICU sont très sensibles à la morphologie urbaine. La morphologie urbaine est « l'étude de la forme urbaine » (LILLEY, 2009). Cela reprend l'étude d'un ensemble d'éléments tels que la forme, la disposition, l'orientation et la densité des rues, des bâtiments ainsi que des parcelles. La morphologie urbaine affecte aussi bien les flux d'énergie que les flux d'air (OLIVEIRA, 2016; PERRIN, 2020).

Premièrement, la morphologie urbaine influence l'absorption et la réémission du rayonnement solaire. En fonction de l'organisation de la ville, un piégeage radiatif peut avoir lieu. Cela provoque une absorption accrue du rayonnement solaire car, la chaleur ne peut pas s'évacuer normalement à une échelle locale. Afin de mieux quantifier cet effet, il existe un indicateur « facteur de vue du ciel » appelé en anglais *Sky View Factors* (SVF). Cet indicateur permet d'évaluer l'aisance du refroidissement nocturne par échange radiatif avec l'atmosphère. La Figure 1.1 illustre les SVF en zone rurale et urbaine. Le refroidissement est maximal en zone rurale avec un SVF de 1. Alors qu'en zone urbaine, ce refroidissement est restreint par la présence des bâtiments. Le SVF y est donc inférieur à 1 (APUR, 2012; PERRIN, 2020).

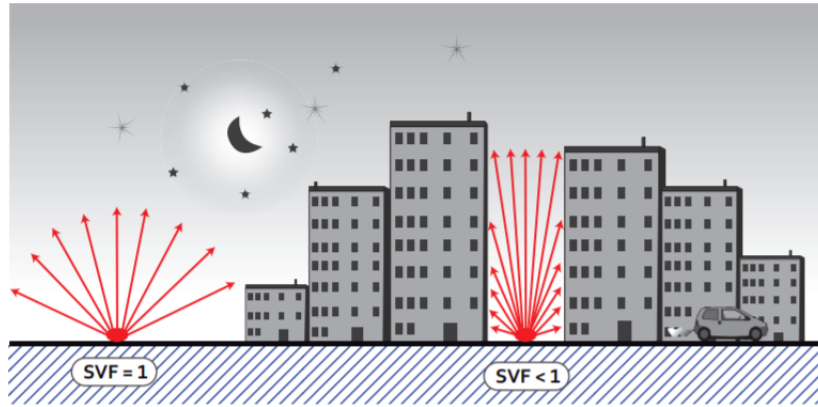


FIGURE 1.1 – *Sky View Factors* (SVF) différents en fonction de l’environnement (APUR, 2012).

Deuxièmement, la morphologie de la ville est également importante afin de favoriser l’ombre dans celle-ci. L’ombre permet une sensation de fraîcheur pour la population, mais contribue également à réduire le stockage de chaleur dans les matériaux (PERRIN, 2020).

Finalement, en plus de son impact sur le bilan radiatif, la morphologie de la rue et plus largement de la ville influence la distribution de l’écoulement du vent. Cela influence aussi bien l’apport d’air pour apporter une sensation de fraîcheur que le mécanisme responsable de la ventilation de la ville. Par exemple, à l’échelle de la rue, plus le rapport canyon (rapport entre la hauteur des constructions et la largeur de la rue) est élevé moins le débit d’air est considérable et donc plus le refroidissement est réduit. De plus, au niveau de la ville, étant donné l’importance du vent dans la dispersion des ICU, une réflexion sur la morphologie urbaine doit être menée afin de favoriser une ventilation naturelle de celle-ci (KIM & BROWN, 2021 ; PERRIN, 2020 ; Y. ZHAO et al., 2021).

Matériaux

L’intensité de l’ICU est principalement fonction de l’absorption du rayonnement solaire par les matériaux durant la journée et de sa lente restitution sous forme de chaleur durant la nuit. En effet, les structures naturelles et artificielles absorbent et stockent le rayonnement solaire sous forme d’énergie thermique lorsque le soleil est levé. Ensuite, lorsque le soleil commence à se coucher, l’environnement a tendance à se refroidir. De fait, à ce moment, l’énergie thermique stockée dans les structures se libère dans l’environnement. La méthode et la quantité de chaleur libérée dépendent des éléments de l’environnement ainsi que des matériaux de construction (CANTAT, 2004 ; RIZWAN et al., 2007).

La quantification de la fraction du rayonnement incident qui est réfléchi par une surface est possible via l’albédo. L’albédo d’une surface est défini comme le rapport entre l’énergie solaire incidente et l’énergie réfléchi par la surface terrestre sur une échelle de 0 à 1. Un albédo de 0 signifie une absorption de 100 % du rayonnement incident. Alors qu’une valeur d’albédo de 1 indique une capacité de réflexion de 100 % du rayonnement incident (KOTOPOULEAS et al., 2021). L’albédo diffère de la réflectance par le fait que la réflectance se calcule selon la même fraction mais pour un seul angle d’incidence. L’albédo, lui, est l’intégration directionnelle de la réflectance sur toutes les géométries de vue du soleil (MAURER, 2002).

L’albédo des matériaux influence donc la mesure dans laquelle les surfaces absorbent le rayonnement et donc tendent à se réchauffer par rapport à leur environnement. Lorsque l’albédo est différent de 1, l’énergie solaire non réfléchi est absorbée et provoque une augmentation de la

température du matériau. L'albédo des matériaux est défini par la couleur dans le spectre visible des matériaux et l'état de surface des matériaux. Les couleurs sombres dans le spectre visible présentent une forte absorptivité et donc un faible albédo alors que les couleurs plus claires ont une forte réflectivité du rayonnement solaire et donc un albédo proche de 1 (HULLEY, 2012 ; LOPEZ-CABEZA et al., 2022 ; PERRIN, 2020).

Le milieu urbain est caractérisé par un grand nombre de matériaux avec un albédo faible tel que les tuiles foncées, l'asphalte, les graviers et le béton. Tout cela contribue à la formation d'ICU. Afin de lutter contre ce phénomène, il est judicieux lors de constructions ou d'aménagements d'utiliser des matériaux avec des albédos élevés tels que des graviers blancs, l'acier, des toits hautement réfléchissants et de la peinture blanche (HULLEY, 2012 ; PERRIN, 2020).

Cependant, l'effet d'un albédo élevé diffère en fonction du SVF. Plus le SVF est élevé, plus les matériaux à haut albédo sont efficaces. Lors d'une configuration urbaine à faible SVF, les matériaux à albédo élevés peuvent augmenter la température radiante moyenne et générer un stress thermique. En effet, dans ce cas, les réflexions multiples du rayonnement solaire produites par ces matériaux ne peuvent pas aller dans l'atmosphère à cause de la géométrie de l'espace. L'utilisation de matériaux à haut albédo est judicieuse pour lutter contre les ICU. Néanmoins, il est important de penser à la position et à l'orientation des surfaces à fort albédo (LOPEZ-CABEZA et al., 2022).

En plus de leurs différences d'albédo, les matériaux ont des capacités différentes de rétention et de conduction de la chaleur. Ces éléments modifient le bilan radiatif à la surface, le stockage de la chaleur dans le tissu urbain et la répartition de l'énergie en chaleur latente et sensible (ALBERTI, 2008).

Végétation

La végétation, quant à elle, a une grande importance dans le refroidissement des villes et influence donc les ICU. La végétation a une influence sur la quantité d'énergie absorbée par la surface. En effet, la végétation a un albédo plus élevé que le béton par exemple. C'est pourquoi la végétation réfléchit environ 20 % du rayonnement incident alors que l'environnement bâti ne réfléchit qu'approximativement 10 %. Cependant, la raison principale de l'importance de la végétation pour le refroidissement du microclimat est l'évapotranspiration. L'eau capturée par les plantes s'évapore par les stomates, le changement de l'eau liquide sous forme de vapeur absorbe l'énergie thermique de la plante et de l'atmosphère environnante. Cela provoque donc une conversion du rayonnement solaire en flux de chaleur latente. Cela permet un refroidissement de l'air ambiant. De plus, les arbres interceptent le rayonnement solaire incident créant de l'ombre et réduisant la température environnante durant la journée (X. CHEN et al., 2019 ; GILL et al., 2013).

En ville, il existe différentes formes de végétation : les espaces verts publics et parcs, les alignements d'arbres de rue, les espaces verts privés (jardins) et les toits ou façades végétalisés. La végétation a un effet de refroidissement variable pouvant aller en moyenne de 1 à 4,7 °C sur une distance de 100 à 1 000 m. Néanmoins, cela dépend d'un grand nombre d'éléments tels que le type de végétation, la répartition spatiale, les espèces, l'environnement ainsi que les conditions météorologiques dont principalement l'apport en eau (KLEEREKOPER et al., 2012 ; RAKOTO et al., 2021).

Les arbres provoquent une diminution de la température via l'évapotranspiration et via l'ombrage. Le refroidissement par évapotranspiration des arbres varie considérablement en fonction des espèces en raison des différentes caractéristiques physiologiques. De même, les traits fonctionnels de l'arbre tels que sa hauteur et son indice de surface foliaire (LAI) influencent l'ombrage.

Il est donc important d'étudier l'atténuation de l'effet d'ICU par la canopée afin de sélectionner les espèces d'arbres les plus propices (X. CHEN et al., 2019 ; J. ZHAO et al., 2020).

La strate herbacée, elle, produit un refroidissement de la température via le phénomène d'évapotranspiration. Cependant, dû à la faible profondeur de leurs racines, l'effet de refroidissement peut être limité en été lorsqu'aucune irrigation n'a lieu. En effet, il semblerait que l'effet de refroidissement pour la strate herbacée pourrait être réduit jusqu'à plus de 50 % en cas de grave sécheresse. Et ce, dû au mécanisme de fermeture des stomates par les graminées en raison du stress hydrique. Ainsi, pour une surface équivalente, les arbres ont un processus d'évapotranspiration plus intense que la strate herbacée en général (GILL et al., 2013 ; J. ZHAO et al., 2020).

Grâce à leur albédo élevé, leur conductivité de la chaleur faible ainsi que via le phénomène d'évapotranspiration, les toits et façades végétalisés permettent de refroidir la température de l'air ambiant et la température intérieure du bâtiment. Ces technologies permettent donc d'isoler les bâtiments mais également de réduire les phénomènes d'ICU (BRUNO et al., 2021 ; X.-X. LI & NORFORD, 2016 ; ODLI et al., 2016).

En plus d'être bénéfique pour réduire les ICU, la végétation urbaine agit comme une isolation contre le bruit, crée un environnement agréable pour les habitants, améliore la qualité de l'air et améliore la biodiversité en milieu urbain (X.-X. LI & NORFORD, 2016).

Néanmoins, malgré tous ces avantages, il existe une préoccupation sérieuse concernant le déploiement de la végétation en ville. La végétation pourrait faire augmenter l'humidité relative. Cette augmentation de l'humidité relative affectera potentiellement le confort thermique physiologique humain. Le confort thermique dépend non seulement de la température, mais aussi de l'humidité relative. Cependant, cette préoccupation est surtout importante pour les régions tropicales. Dans les régions tempérées, l'implantation de végétation en zone urbaine semble profitable à beaucoup d'égards, également pour diminuer l'effet d'ICU (X.-X. LI & NORFORD, 2016).

Points d'eau

Les points d'eau ont également un effet de refroidissement de l'atmosphère. Deux phénomènes peuvent expliquer cela. Lorsque l'eau se déplace, celle-ci peut absorber la chaleur et la transporter hors de la zone. L'eau peut également s'évaporer en absorbant l'énergie thermique de l'atmosphère environnant (KLEEREKOPER et al., 2012).

L'eau permet un refroidissement moyen de 1 à 3 °C jusqu'à une distance d'approximativement 30 à 35 m. Néanmoins, cela dépend de la superficie du point d'eau ainsi que de la mobilité de l'eau. De plus, le refroidissement de l'air provoqué par l'évaporation de l'eau dépend du débit d'air qui fait circuler l'air plus froid. Le refroidissement lorsque l'eau se déplace dépend des conditions météorologiques. L'eau stagnante a un effet de refroidissement plus faible que l'eau qui coule mais l'eau dispersée, comme celle d'une fontaine, a l'effet de refroidissement le plus considérable (KLEEREKOPER et al., 2012).

Chaleur anthropique

La chaleur générée par les sources stationnaires et mobiles dans une zone influence également l'intensité des ICU. Cette chaleur est appelée chaleur anthropique. Celle-ci est dégagée par les véhicules, les centrales électriques, les climatiseurs et d'autres sources. La chaleur anthropique d'une zone est liée à la population de la zone ainsi qu'à sa consommation d'énergie par habitant. La chaleur anthropique joue un rôle minuscule dans la formation d'ICU. En effet, cette source d'augmentation de la température locale est insignifiante par rapport à l'occupation du sol et

l'albédo. Toutefois, une diminution des émissions de chaleur anthropique dans les zones fortement impactées par les ICU serait profitable. De plus, cette chaleur peut s'avérer importante dans la formation d'ICU lors de situations particulières telles qu'une rue à forte circulation ou bien une rue peu ventilée avec un grand nombre de climatiseurs (RIZWAN et al., 2007).

1.2 Conséquences des ICU

Bien que les conséquences des ICU ne soient pas encore totalement connues, il est incontestable que ce phénomène affecte le confort et la santé des êtres vivants, la biodiversité ainsi que la consommation d'énergie (SHENG et al., 2017).

1.2.1 Conséquences des ICU sur la faune et la flore

L'environnement urbain amène des changements microclimatiques qui perturbent les organismes. La modification de la température est un phénomène climatique qui perturbe particulièrement la flore et la faune. Ce faisant, les ICU affectent les espèces inféodées au milieu. En effet, les ICU peuvent affecter la flore et la faune aussi bien à l'échelle de l'individu qu'à l'échelle de l'espèce. Au niveau de l'individu, les modifications peuvent apparaître au niveau de la phénologie et de la physiologie des organismes. À l'échelle de l'espèce, des modifications peuvent se manifester par exemple via le déplacement d'espèces ou par la disparition d'espèces. Cependant, toutes les espèces ne sont pas menacées de la même manière par les changements de température (HAMBLIN et al., 2017).

Par exemple, les changements dans les régimes de température environnementale peuvent affecter de manière considérable les organismes ectothermes. Un ectotherme est un organisme qui ne produit pas de chaleur interne. Leurs températures corporelles fluctuent donc avec les températures de leur milieu. La plupart des réactions biochimiques et des processus biologiques oscillent avec la température environnementale. En conséquence, la température bouleverse littéralement leur rythme de vie. Par exemple, la taille du corps et des cellules de ces espèces diminue en réponse à une température moyenne plus élevée et à de plus grandes fluctuations de températures. De plus, ces espèces se développent plus rapidement lorsque la température augmente (KIERAT et al., 2017; ZUO et al., 2012).

D'autre part, le développement des plantes des régions tempérées est principalement régulé par la température. C'est pourquoi les ICU peuvent affecter les processus phénologiques de la flore. Des études phénologiques ont révélé qu'il existe un lien entre le caractère rural d'un site et le stade phénologique. En effet, en raison des températures locales plus élevées, les plantes poussant dans les villes fleurissent plus tôt que les plantes dans les zones rurales. De plus, les ICU provoquent une durée de saison de croissance plus longue. Cependant, les stades phénologiques ne dépendent pas exclusivement de la température (DUBREUIL et al., 2011; JOCHNER et al., 2013).

Ce phénomène peut affecter les organismes du milieu humide. En effet, les ICU peuvent provoquer un réchauffement des eaux de ruissellement mais également des eaux stagnantes et ainsi diminuer la quantité d'oxygène dissous au sein de celles-ci. L'augmentation de la température et la diminution de la disponibilité en oxygène sont deux éléments qui peuvent affecter la biocénose du milieu humide (LOWE, 2016).

Les ICU perturbent les individus et les espèces mais également les réseaux écologiques. En effet, les variations phénologiques dues aux changements de température ne sont pas similaires entre les espèces. De plus, les espèces peuvent se déplacer différemment. Cette différence de réactivité, mais également de localisation peut parfois mettre à mal les interactions entre les espèces au sein

des réseaux écologiques, comme les chaînes trophiques, les interactions hôtes-parasitoïdes et/ou les réseaux mutualistes (WALTHER, 2010).

1.2.2 Conséquences des ICU sur la santé humaine

Entre autres, les ICU impactent négativement la santé humaine. L'augmentation des températures diurnes et nocturnes associées aux ICU peut affecter les citoyens. Lors de vagues de chaleur, les ICU augmentent l'exposition de la population à la chaleur. Or, l'exposition aux conditions thermiques extrêmes peut provoquer un large éventail de conséquences telles que l'inconfort général, des difficultés respiratoires, des crampes de chaleur, un épuisement ainsi que des mortalités liées à la chaleur. Les facteurs aggravants sont la durée de la vague de chaleur, l'intensité de la vague de chaleur ainsi que le maintien des températures élevées durant la nuit. Cette préoccupation est primordiale puisque la moitié de la population mondiale vit en ville (HEAVISIDE et al., 2017; LOWE, 2016; van der HOEVEN & WANDL, 2015; L. ZHAO et al., 2014).

Il existe une différence de vulnérabilité en fonction, entre autres, du climat, de la culture, de l'état de santé, du type de logement, de l'environnement ainsi que des facteurs socio-économiques. Le risque de mortalité liée à la chaleur augmente lorsqu'une personne présente une vulnérabilité physique. Les femmes enceintes, les foetus, les nourrissons et les personnes âgées sont considérés comme une tranche de la population à risque pendant les vagues de chaleur. Ce faisant, lors d'étude sur les ICU, il est important de cartographier les zones avec de fortes concentrations de personnes vulnérables (HEAVISIDE et al., 2017; van der HOEVEN & WANDL, 2015).

À l'inverse, pendant les mois les plus froids, le réchauffement des villes en raison d'ICU peut avoir des effets bénéfiques sur la santé. Ils provoquent, par exemple, moins de décès en raison du froid. Cependant, cet effet est plus limité (HEAVISIDE et al., 2017; LOWE, 2016).

1.2.3 Conséquences des ICU sur la consommation d'énergie

Dans l'Union européenne, environ 40 % de la demande totale d'énergie est attribuable aux bâtiments. La plus grande partie de l'énergie consommée par les bâtiments est utilisée pour la régulation de la température des pièces (TOPARLAR et al., 2018). Lorsque la température ambiante augmente, les ménages sont dépendants de la climatisation alors que lorsque celle-ci diminue, il est indispensable d'avoir recours au chauffage. La demande énergétique des bâtiments est donc fortement corrélée aux degrés-jours froids et de chauffe (HWANG et al., 2020; LOWE, 2016; TOPARLAR et al., 2018).

En fonction du climat ainsi que de la saison, les ICU peuvent provoquer une augmentation ou une diminution de la consommation en énergie liée à l'utilisation de climatiseurs ou de chauffages. Lors d'ICU en période chaude, les logements en centre-ville ont une demande de refroidissement sensiblement plus élevée que celle des bâtiments comparables à la campagne. La demande en refroidissement peut être de 10 % à 120 % plus forte en ville qu'à la campagne. En période froide, les ICU provoquent une variation de température entraînant une diminution de la consommation d'énergie de chauffage de 3 % à 45 % en ville par rapport à la région environnante. Il semble difficile de donner une valeur fixe puisque les demandes en refroidissement et en chauffage dépendent notamment de l'isolation thermique des bâtiments, de la distance aux points verts, du comportement des occupants, de la météorologie,... En conclusion, les ICU provoquent plutôt une augmentation de la consommation en énergie. De plus, le réchauffement climatique risque d'accroître ce phénomène (HWANG et al., 2020; X. LI et al., 2019; LOWE, 2016; TOPARLAR et al., 2018).

1.3 Mesure de l'intensité de l'ICU

Il existe différentes métriques capables de mesurer l'intensité des ICU. Les deux principales sont la température de l'air et la LST. La température de l'air permet de mesurer les CLHI ainsi que les BLHI. La LST, quant à elle, permet de quantifier les SHI (AZEVEDO et al., 2016).

1.3.1 Mesure de la température de l'air

La température de l'air est la variable clé afin de quantifier les CLHI et les BLHI. Or, les CLHI sont les types d'ICU susceptibles d'affecter le plus considérablement la qualité de vie des habitants (AZEVEDO et al., 2016).

Les études sur les CLHI se réalisent traditionnellement via des réseaux de stations météorologiques urbains. Celles-ci peuvent être fixes ou portables (montées sur des plateformes mobiles). Cependant, le déploiement de réseaux météorologiques urbains est onéreux et donc restreint. Les données in situ offrent une résolution temporelle élevée mais manquent de détails spatiaux. Cette méthode est donc limitée pour quantifier l'intensité et l'étendue spatiale des CLHI (AZEVEDO et al., 2016 ; KIM & BROWN, 2021).

Les techniques de mesure des BLHI sont encore plus limitées. En effet, cela repose sur l'utilisation de ballons captifs, de radiosondes ou de techniques de télédétection au sol. Ces techniques sont très peu répandues dans les zones urbaines (AZEVEDO et al., 2016).

Compte tenu de la rareté des observations de la température de l'air, les résolutions spatiale et temporelle sont faibles. C'est pour ces raisons que les techniques de modélisation numérique se sont énormément développées en climatologie urbaine. La modélisation a permis de remarquables progrès. Néanmoins, les modèles ont tout de même besoin d'un nombre de données élevé pour fonctionner (AZEVEDO et al., 2016).

Actuellement, les réseaux météorologiques urbains à haute résolution commencent à se déployer. Ces réseaux permettent, entre autres, d'observer la température de l'air à des résolutions temporelles et spatiales élevées. Toutefois, toutes ces stations et ces technologies ne permettent pas encore aujourd'hui de quantifier l'intensité et l'étendue spatiale des ICU atmosphériques dans l'entièreté des villes du monde (AZEVEDO et al., 2016).

1.3.2 Mesure de la LST par télédétection

Les changements d'occupation des sols perturbent le microclimat et peuvent provoquer ou accentuer les ICU. Pour analyser cet aspect, J. ZHAO et al. (2020) ont analysé les variations de la LST. Il en ressort que la LST est directement liée aux types d'occupation du sol. Selon cette étude, une augmentation de 10 % de la couverture en bâtiments augmente la LST moyenne d'une zone locale d'environ 1,3 °C. Une augmentation équivalente de la couverture en surfaces imperméabilisées ne l'accroît que d'approximativement 0,2 °C. À contrario, les plans d'eau et les espaces végétalisés ont un effet de refroidissement. Pour chaque augmentation de couverture de 10 %, les plans d'eau réduisent la LST locale d'environ 0,7 °C tandis que les prairies et les arbres diminuent la LST locale d'approximativement 0,6 °C (J. ZHAO et al., 2020). Ces chiffres permettent de se rendre compte que les bâtiments et les surfaces imperméabilisées renforcent les ICU alors que les espaces végétalisés et les plans d'eau permettent de créer des îlots de fraîcheur (zones les plus fraîches). De cela découle la question de la quantification de la LST.

Il est important de mesurer la LST, entre autres, afin de détecter les SHI. De plus, la LST impacte la température de l'air des couches inférieures via des échanges d'énergie entre la surface et l'air. La LST influence donc le confort thermique dans la couche de canopée ainsi que le climat intérieur des bâtiments. Les mesures de LST permettent donc de quantifier les SHI, mais également les CLHI et plus difficilement les BLHI (AZEVEDO et al., 2016 ; WENG, 2009). De plus, la quantification des SHI est également importante puisque la LST impacte également la qualité de vie de la population.

La LST est progressivement devenue un élément essentiel des études du climat urbain et donc des ICU. En effet, actuellement les ICU sont majoritairement quantifiés par des mesures de la LST. Cela est dû à la grande disponibilité de cette information. Ces mesures de la LST s'obtiennent par des satellites. Elles sont donc peu onéreuses et potentiellement disponibles sur l'entièreté du globe (FABRIZI et al., 2010 ; KIM & BROWN, 2021).

Grâce à la télédétection dans l'infrarouge thermique, il est possible de calculer la LST. Tous les objets ayant une température supérieure au zéro absolu émettent spontanément un rayonnement thermique dans le domaine infrarouge. Le rayonnement thermique émanant d'un objet dépend de sa température de surface. Selon la loi de rayonnement de Planck, il est possible de quantifier l'énergie qu'un corps rayonne en fonction de sa température. La Loi de Planck définit l'émittance spectrale d'un corps noir aux différentes températures :

$$E_{\lambda} = B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (1.1)$$

avec :

$B(\lambda, T)$, la luminance spectrale (aussi appelée brillance ou radiance) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$] d'un corps noir à la longueur d'onde λ [μm^{-1}] et à la température T [K] ;

C_1 et C_2 , deux constantes physiques ($C_1 = 1.191 \times 10^8 W \mu m^{-4} \cdot sr^{-1} m^{-2}$, $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu m \cdot K$).

L'énergie radiative émise par un objet varie en fonction de la longueur d'onde et de sa température. Un corps maintenu à une température constante voit son énergie radiative émise varier en fonction de la longueur d'onde. Pour chaque température, il existe une longueur d'onde spécifique où l'énergie émise est maximale. Celle-ci se nomme pic d'énergie radiatif (λ_{max}). Lorsque la température du corps augmente, la quantité totale d'énergie radiative émise augmente et le λ_{max} va vers de plus courtes longueurs d'onde (voir Figure 1.2). La loi de Wien détermine la longueur d'onde au maximum du rayonnement :

$$\lambda_{max} = \frac{k}{T} \quad (1.2)$$

avec :

λ_{max} , le pic d'énergie radiatif [m] ;

k , la constante de Wien (= 2,8983 m K) ;

T , la température [K].

La terre émet donc spontanément un rayonnement thermique dans le domaine infrarouge. La température à la surface terrestre se situe aux environs de 300 K (26.85 °C). C'est pourquoi comme il est possible de le voir sur la Figure 1.2, le maximum d'émission intervient autour de 10 μm (ANTOINE & LOPEZ, 2020).

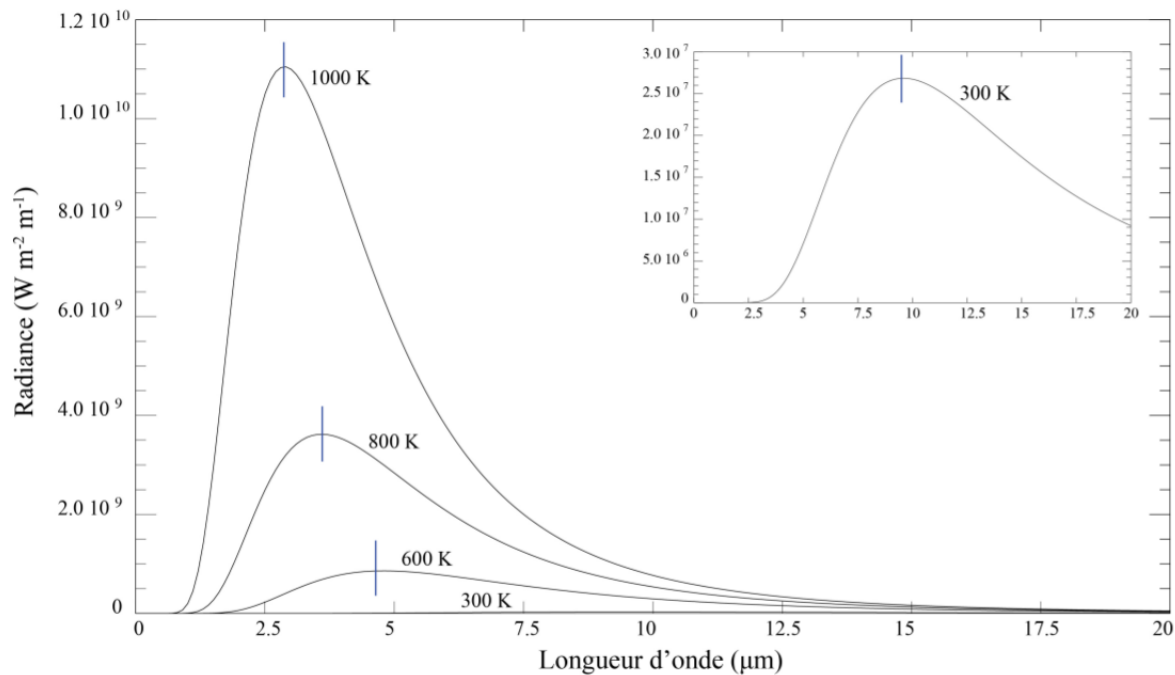


FIGURE 1.2 – Représentation des valeurs de luminance d’un corps noir pour des longueurs d’onde comprises entre 0 et 20 μm et des températures du corps noir de 300, 600, 800 et 1000 K. Les traits bleus représentent les valeurs de λ_{max} spécifiques à chaque température (ANTOINE & LOPEZ, 2020).

Afin d’observer le rayonnement thermique émis par la surface terrestre, il est également important de soustraire au maximum l’influence de l’atmosphère. Comme illustré à la Figure 1.3, il existe des fenêtres atmosphériques définies par une absorption minimale par l’atmosphère du rayonnement thermique émis par la surface terrestre. Deux fenêtres atmosphériques sont couramment utilisées pour l’observation de la Terre. La première est appelée infrarouge moyen et est comprise entre 3 et 5 μm . La deuxième nommée infrarouge thermique s’étend de 8 à 14 μm (ANTOINE & LOPEZ, 2020).

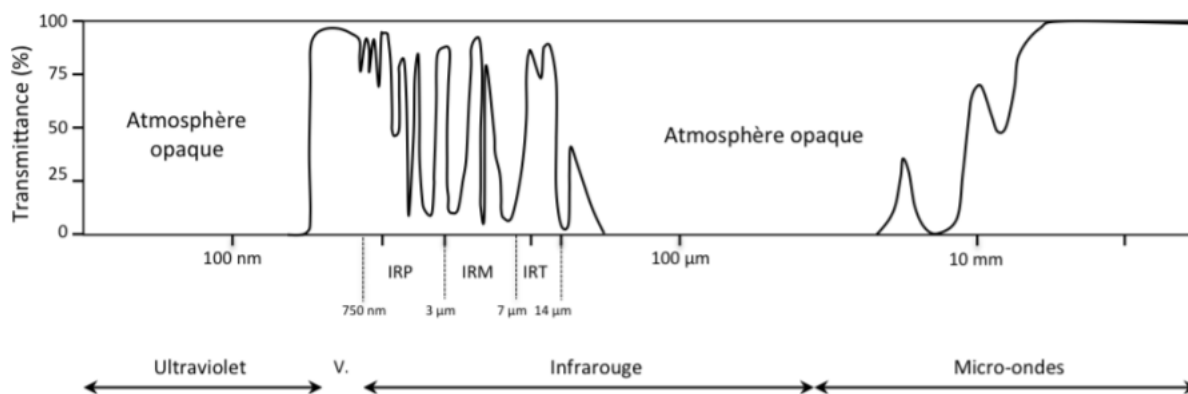


FIGURE 1.3 – Transmittance de l’atmosphère standard en fonction de la longueur d’onde (ANTOINE & LOPEZ, 2020).

Les mesures de LST via des capteurs embarqués s’effectuent principalement dans l’infrarouge thermique. De fait, c’est dans cette gamme de longueurs d’onde que la quantité d’énergie radiative émise par un objet à température ambiante est maximale et que l’influence de l’atmosphère

est minimale (ANTOINE & LOPEZ, 2020).

En connaissant la longueur d'onde observée et la luminance spectrale, il est possible d'estimer la température radiométrique de l'objet étudié. Cette température correspond à la température si l'objet étudié était un corps noir (ANTOINE & LOPEZ, 2020).

$$T(\lambda) = \frac{\alpha}{\ln\left(\frac{2\alpha ck}{\lambda^4 E_\lambda} + 1\right)} \quad (1.3)$$

avec :

$T(\lambda)$, la température radiométrique [K] ;

$\alpha, = \frac{hc}{\lambda k}$;

E_λ , la luminance énergétique spectrale [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$] ;

λ , la longueur d'onde [μm^{-1}].

Cependant, la surface terrestre ne peut être considérée comme un corps noir. En effet, son émissivité est inférieure à 1 (l'émission maximale d'un corps noir). L'émissivité fait référence au rapport entre l'énergie rayonnée par le corps réel et l'énergie rayonnée par le corps noir dans les mêmes conditions (même température, direction d'observation, longueur d'onde,...). L'émissivité de la Terre est comprise entre 0 (émission nulle) et 1 car le rayonnement émis par une surface réelle est moins efficace que celui émis par un corps noir à la même température (ANTOINE & LOPEZ, 2020). L'émissivité d'une surface naturelle (corps gris) est :

$$\epsilon = \frac{M(\text{corps})}{M(\text{corpsnoir})} \quad (1.4)$$

avec :

M, la quantité d'énergie émise par un corps à une température T [K] (Loi de Stefan-Boltzmann : $M = \epsilon \sigma T^4$, $\sigma =$ Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$)) ;

ϵ , l'émissivité d'un corps.

La Terre possède une émissivité très proche de 1. L'émissivité de l'atmosphère, elle, est très inférieure à 1 mais non nulle. Toutefois, afin d'estimer la LST à partir des données dans l'infrarouge thermique, il est primordial de connaître de façon précise les valeurs d'émissivité de la surface terrestre. L'émissivité d'une surface varie selon, entre autres, la teneur en eau, la composition chimique et la rugosité. De plus, l'émissivité est fonction de la longueur d'onde. Pour les données satellitaires, l'émissivité de la surface terrestre peut être estimée à l'aide de différentes techniques telles que la méthode d'émissivité normalisée, les indices spectraux thermiques et la méthode de l'indice de végétation (TARDY et al., 2016 ; WENG, 2009).

Cette dernière est la plus fréquemment utilisée. Les méthodes basées sur des relations empiriques contenant des indices de végétation utilisent généralement l'indice de végétation de la différence normalisée (NDVI). Celui-ci s'intéresse, respectivement, à la quantité de lumière proche infrarouge et rouge réfléchi par la végétation et capturée par le satellite. Les valeurs du NDVI vont de -1 à $+1$. Celles-ci varient, entre autres, en fonction des espèces végétales et des phases de développement (voir Figure 1.4). La biomasse verte produit des NDVI de l'ordre de 0,5 à 1. Le NDVI est compris entre 0 et 0,2 lorsque le sol est nu ou recouvert de matières organiques en décomposition, d'asphalte ou de béton par exemple. Le NDVI de l'eau est inférieur à 0 (PETTORELLI et al., 2005 ; TARDY et al., 2016 ; WITTICH, 1997).

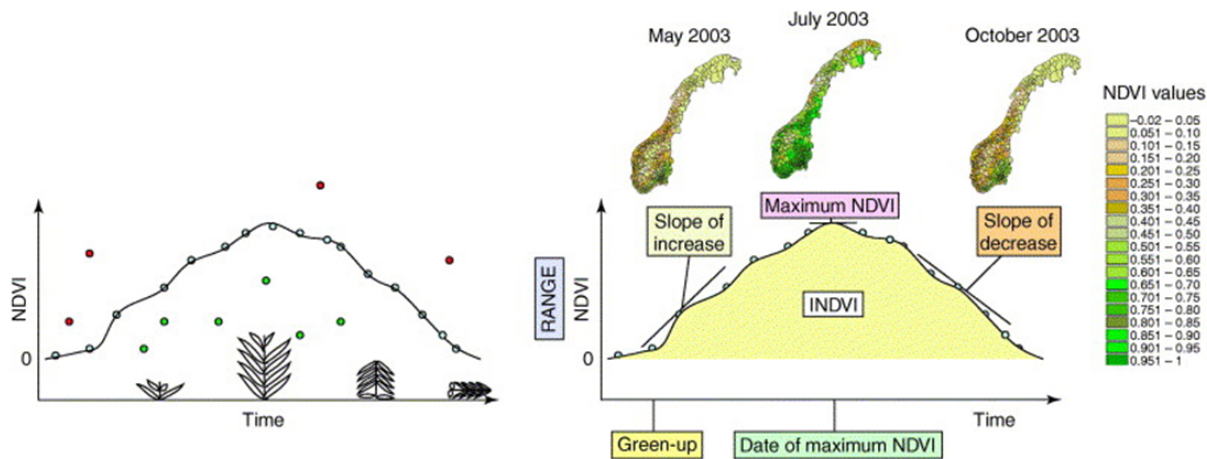


FIGURE 1.4 – Série chronologique du NDVI (PETTORELLI et al., 2005).

Cet indice est défini comme :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1.5)$$

Avec :

NIR, la réflectance spectrale dans la région du proche infrarouge ;

RED, la réflectance spectrale dans la région rouge.

Une méthode couramment utilisée pour calculer l'émissivité des pixels mixtes est l'utilisation d'une relation empirique basée sur une fonction exponentielle qui dépend du NDVI (TARDY et al., 2016 ; WITTICH, 1997). Cette relation est définie comme suit :

$$\epsilon_{\lambda} = \epsilon_{\nu\lambda} - (\epsilon_{\nu\lambda} - \epsilon_{s\lambda}) \left(\frac{NDVI - NDVI_{\nu}}{NDVI_s - NDVI_{\nu}} \right)^k \quad (1.6)$$

Avec :

λ , la bande spectrale ;

ϵ_{ν} , l'émissivité de la végétation en condition optimale (LAI maximal et végétation complète) ;

ϵ_s , l'émissivité du sol ;

$NDVI_{\nu}$, le NDVI maximum pour une végétation complète avec un LAI maximal ;

$NDVI_s$, le NDVI minimum pour un sol nu ;

k, le paramètre (fixé à 2).

Il en découle que lorsque le NDVI égal le NDVI minimum pour un sol nu, l'émissivité du pixel équivaut à l'émissivité du sol. Dans le cas où le NDVI équivaut au NDVI maximal pour une végétation complète, l'émissivité du pixel vaut l'émissivité de la végétation en condition optimale.

De plus, les capteurs dans l'infrarouge thermique des satellites mesurent les radiances au sommet de l'atmosphère (Top of Atmosphere, TOA) et non à la base de l'atmosphère (Bottom Of Atmosphere, BOA). De manière à obtenir la radiance émise par la surface de la Terre et donc la LST, il est crucial de retirer les effets atmosphériques tels que l'absorption, l'émission ascendante et l'irradiance descendante réfléchiée par la surface (WENG, 2009). Un modèle de transfert radiatif doit être utilisé afin de supprimer ces effets atmosphériques. Pour ce faire, il est nécessaire de résoudre l'équation de transfert radiatif dans la fenêtre de la longueur d'onde de bande du

capteur (TARDY et al., 2016).

$$L_{\lambda, sen}(T) = \tau_{\lambda} \epsilon_{s, \lambda} B_{\lambda}(T) + L_{u, \lambda, atmo} + \tau_{\lambda} (1 - \epsilon_{s, \lambda}) L_{d, \lambda, atmo} \quad (1.7)$$

Avec :

$L_{\lambda, sen}$, la luminance spectrale au niveau du capteur (sommet de l'atmosphère) [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$];

B_{λ} , la luminance d'un corps noir à une température cinétique T en [K];

τ_{λ} , la transmission atmosphérique [];

$L_{u, \lambda, atmo}$, le rayonnement atmosphérique ascendant dans la fenêtre de longueur d'onde [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$];

$L_{d, \lambda, atmo}$, le rayonnement atmosphérique descendant dans la fenêtre de longueur d'onde [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$];

$\epsilon_{s, \lambda}$, l'émissivité spectrale de surface [].

Après correction atmosphérique et une fois l'émissivité estimée, en inversant la loi de Planck, il est possible de trouver la température de la surface terrestre via la mesure de la luminance spectrale à une longueur d'onde donnée (KLOK et al., 2012).

$$LST = \frac{K_2}{\ln\left(1 + \frac{K_1}{B(\lambda, T)}\right)} \quad (1.8)$$

Avec :

LST, la température de surface [K];

$B(\lambda, T)$, la luminance spectrale [$W m^{-2} sr^{-1} m^{-1}$];

K1, la constante de calibration [$W m^{-2} sr^{-1} m^{-1}$];

K2, la constante de calibration [K];

Ces constantes de conversion thermique spécifique à la bande sont disponibles dans les métadonnées des images.

Capteurs dans l'infrarouge thermique

Différents capteurs satellitaires tels qu'ASTER, AATSR, MODIS, TIRS, AVHRR et SEVIRI sont actuellement capables de collecter des données dans l'infrarouge thermique à partir de la surface de la Terre. Ces capteurs permettent de capturer des images avec une résolution spatiale de 30 m à 3 km. La résolution temporelle de la télédétection varie de 15 minutes à 16 jours. Dans l'intention d'analyser les ICU, de bonnes résolutions spatiales et temporelles sont essentielles. En effet, la surface urbaine est spatialement complexe et des changements remarquables se produisent dans des intervalles de temps et d'espaces faibles. Malheureusement, la présence de nuages peut rendre plus faible la résolution temporelle des capteurs satellitaires (KIM & BROWN, 2021; WENG, 2009).

Par exemple, les séries de satellites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) transportent le capteur Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiomètre Avancé à Très Haute Résolution, AVHRR) possédant trois canaux dans la région visible-proche infrarouge ainsi que trois canaux dans l'infrarouge thermique. Ce capteur procure des données avec une résolution spatiale de 1 kilomètre au nadir et une couverture globale quotidienne. Cette résolution spatiale est adaptée uniquement à la cartographie de la température urbaine sur de grandes zones (FABRIZI et al., 2010; HOLBEN, 2007; WENG, 2009).

Le radiomètre avancé à balayage longitudinal (Advanced Along Track Scanning Radiometer, AATSR) est également capable de procurer des informations dans l'infrarouge thermique. Le capteur AATSR se situe à bord du satellite ENVISAT. Ce capteur offrait une couverture complète du globe tous les trois jours et une résolution spatiale de 1 kilomètre (FABRIZI et al., 2010; KERAMITSOGLOU et al., 2012).

Le capteur MODIS est un spectroradiomètre d'imagerie à résolution modérée. Il est déployé à bord des satellites Terra et Aqua de la NASA. Ces satellites ont une résolution temporelle de 1 à 2 jours et une résolution spatiale de 1 kilomètre (AZEVEDO et al., 2016; FABRIZI et al., 2010; KERAMITSOGLOU et al., 2012; TRAN et al., 2006).

Il existe également comme capteur infrarouge satellitaire, le capteur ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Ce radiomètre offre des images à haute résolution spatiale (90m) avec un cycle récurrent de 16 jours. Celui-ci se situe également sur le satellite Terra (CAO et al., 2010; J. CHEN et al., 2020; THOME, p. d.; WENG, 2009).

Les satellites Landsat 8 et 9 sont équipés, entre autres, du capteur TIRS (Thermal InfraRed Sensor). Celui-ci permet d'obtenir des images dans l'infrarouge thermique. L'instrument TIRS est un radiomètre multispectral infrarouge. Le capteur TIRS collecte des données dans deux bandes (10 et 11) infrarouges thermiques de grandes longueurs d'onde. Cependant, la bande 10 (10.6-11.19 μm) doit être privilégiée car la bande 11 (11.5-12.51 μm) est défectueuse. Ce capteur a une résolution spatiale de 100 m et sa résolution temporelle est de 16 jours (AZEVEDO et al., 2016; J. CHEN et al., 2020; TARDY et al., 2016; USGS, p. d.-c).

Il existe également le programme de satellites opérationnels météorologiques (MetOp). Celui-ci consiste en une série de trois satellites polaires développés conjointement par l'Agence spatiale européenne (ESA) et EUMETSAT. MetOp est utilisé pour surveiller le climat et améliorer les prévisions météorologiques (spatiale EUROPÉENNE, 2011).

Certains satellites en orbite géostationnaire sont également dotés de capteurs fournissant des images dans la région de l'infrarouge thermique. Ces capteurs ont une résolution spatiale très faible. Par exemple, le capteur SEVIRI (Spring Enhanced Visible and Infrared Imager), un radiomètre à balayage linéaire, fournit des informations dans quatre canaux visibles et proches infrarouges ainsi que huit canaux infrarouges. Cet instrument vole sur les satellites Météosat deuxième génération (MSG) et est développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Ce capteur a une résolution temporelle de 15 minutes et spatiale de 3 km pour les canaux standards (AMINOU, 2002; TARDY et al., 2016).

Techniques pour passer de l'imagerie dans l'infrarouge thermique aux températures absolues

Bien que beaucoup de capteurs possèdent actuellement des canaux dans l'infrarouge thermique, très peu d'outils ont été développés pour obtenir la LST d'une région via la télédétection. En effet, afin de passer de l'imagerie dans l'infrarouge thermique à des températures absolues, l'émissivité doit être estimée et les effets atmosphériques d'absorption et d'émission affectant le spectre thermique doivent d'abord être retirés (TARDY et al., 2016).

Cependant, plusieurs techniques permettent d'obtenir la température absolue au sol via les données thermiques de différents capteurs. Par exemple, l'utilisation de l'algorithme LST, à fenêtre partagée, appliqué aux bandes thermiques MODIS donne comme produit la LST. Le même produit est possible par une stratégie de filtre Kalman opérationnel appliqué aux trois canaux infrarouges du capteur SEVIRI. La LST est également disponible avec le capteur ASTER. Ce-

pendant, ces données ne sont pas générées tous les 16 jours, mais bien 1 à 8 fois par an.

L'outil LANDSARTs (Landsat Automatic Retrieval of Surface Temperatures) lui permet d'obtenir, à partir de l'ensemble des images Landsat 5, 7 et 8, les LST. Cet outil a été développé par les membres du Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) ou du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) afin d'obtenir des cartes LST haute résolution. De plus, cet outil ré-échantillonne les données thermiques Landsat d'entrée avec une résolution native de 100 m en données avec une résolution de 30 m (TARDY et al., 2016).

L'objectif étant d'estimer la LST à l'aide des images thermiques, les effets atmosphériques d'absorption et d'émission affectant le spectre thermique doivent être retirés via une correction spatiale cohérente. De plus, l'émissivité doit être estimée. Trois étapes sont nécessaires à LANDARTs pour faire passer les images thermiques en LST (TARDY et al., 2016).

Premièrement, une estimation doit être réalisée pour les trois paramètres de correction atmosphérique que sont : la transmittance, le rayonnement ascendant et le rayonnement descendant. Cela s'effectue à l'aide du logiciel commercial RTM MODTRAN, des images thermiques de Landsat et du jeu de données ERA-Interim (ECMWF). Cela permet de récupérer les conditions atmosphériques verticales (TARDY et al., 2016).

Ensuite, à l'aide des métadonnées, les comptes numériques des images multispectrales des satellites Landsat sont calibrés radiométriquement pour obtenir les réflectances. Par la suite, les réflectances spectrales respectivement dans la région du proche infrarouge et du rouge sont utilisées pour calculer le NDVI (formule 1.5). Cette spatialisation du NDVI est ensuite convertie en une carte d'émissivité (formule 1.6) de résolution similaire aux données thermiques, soit 30 m (TARDY et al., 2016).

Finalement, grâce aux métadonnées, les nombres numériques de la bande thermique sont convertis en luminance au sommet de l'atmosphère. La luminance de surface est ensuite calibrée via la carte d'émissivité en inversant l'équation de transfert radiatif (formule 1.7). La LST est en fin de compte calculée à l'aide de la loi de Planck simplifiée (formule 1.8), des variables atmosphériques spatialisées et de la luminance de surface (TARDY et al., 2016).

1.3.3 Comparaison de l'intensité des ICU quantifiée à l'aide de la température de l'air et de la LST

La distribution des BLHI et CLHI obtenus grâce à la température de l'air et la distribution des SHI acquise grâce à la LST varie. En effet, la cartographie des SHI est principalement liée à l'utilisation du sol, alors que pour les CLHI, d'autres variables, telles que l'advection, jouent un rôle également conséquent (AZEVEDO et al., 2016). Il ressort de différentes études que la température de l'air est davantage constante par rapport à la LST. Toutefois, il existe de fortes relations entre les températures de l'air et la LST pendant la journée et la nuit à l'échelle du quartier. Actuellement, bien que ces fortes relations aient été découvertes entre LST et température de l'air à l'échelle du quartier, aucun modèle statistique simple n'existe entre LST et température de l'air à l'échelle de la ville. Cette corrélation entre la LST et la température de l'air permet, néanmoins, d'approuver l'existence d'un lien entre les différents types d'ICU (AZEVEDO et al., 2016).

1.3.4 Résolution spatiale du capteur

Lors de l'étude de différents phénomènes, il est indispensable d'analyser la résolution des données utilisées. Dans le cas de la télédétection, la résolution du capteur doit être connue de manière précise. Par exemple, de façon à démêler de manière robuste la relation entre l'occupation du sol et la LST, la connaissance exacte de la résolution spatiale du capteur utilisé est indispensable (RADOUX et al., 2016).

La qualité spatiale d'un instrument de télédétection optique s'obtient généralement par l'interaction entre la distance au sol d'échantillonnage de la luminance reçue par le capteur (Ground Sample Distance, GSD) et la fonction d'étalement du point (Point Spread Function, PSF) du système optique de l'instrument. Le GSD correspond à la distance entre les centres des pixels adjacents. La PSF d'un système d'imagerie se rapporte à une mesure de la quantité de « flou » qui se produit en raison de tous les composants qui constituent le système d'imagerie. La PSF est formée de l'interaction complexe entre tous les composants du système d'imagerie tels que l'optique, l'électronique et l'atmosphère. Cela implique que l'énergie reçue au niveau du détecteur du système d'imagerie comprend toujours de l'énergie provenant de l'extérieur du champ de vision. En lien avec la résolution, la PSF exprime la dispersion du signal. L'estimation de la PSF d'un système d'imagerie permet d'obtenir la résolution spatiale réelle de ce système (JIANG et al., 2020 ; RADOUX et al., 2016 ; WENNY et al., 2015).

Il existe différentes méthodes de mesure de la PSF. Celles-ci peuvent être divisées en trois catégories : l'estimation de la PSF à l'aveugle, l'estimation de la PSF non aveugle et les méthodes de mesure directe de la PSF. La première catégorie se réalise à l'aide d'images de scènes naturelles. La PSF est estimée par l'utilisation des bords nets dans les images acquises sans aucune information préalable. L'estimation de la PSF non aveugle consiste en l'obtention de la PSF au moyen d'images de certains motifs (damiers, disques,...) parce que ceux-ci possèdent des bords nets. Pour cette technique, des informations préalables telles que la forme des motifs, sont nécessaires. Ces deux méthodes considèrent, dans la plupart des cas, la forme de la PSF comme un modèle idéal gaussien. Les paramètres du modèle gaussien sont obtenus par l'une ou l'autre méthode. La fonction est représentée par l'équation 1.9. La dernière catégorie estime la PSF par le biais d'images de sources ponctuelles. Cette technique est simple et fiable mais nécessite des sources ponctuelles très petites avec une intensité forte (JIANG et al., 2020). La fonction gaussienne est visible à l'équation 1.9.

$$h(x, y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]} \quad (1.9)$$

Avec :
 $A = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, l'amplitude ;
 σ , l'écart-type ;
 μ , la moyenne.

Dans le cas du capteur TIRS sur la plateforme Landsat 8, l'article WENNY et al. (2015) a estimé la PSF par l'utilisation de cibles naturelles. Pour ce faire, la fonction d'étalement des bords (Edge Spread Function, ESF) a été étudiée. L'ESF peut être considérée comme une intégration unidimensionnelle de la PSF, plus facile à estimer. Pour mesurer la résolution spatiale des capteurs optiques en orbite, des cibles naturelles à bords nets pour les longueurs d'onde thermiques ont été utilisées. Un bord thermique naturel avec un net contraste doit être cherché. Par exemple, des rivages d'eau plus froide et de terre plus chaude feraient un contraste thermique intéressant. Une cible adéquate doit avoir une différence maximale entre la température de l'eau et celle du sol. De plus, de part et d'autre du bord, la température doit être la plus constante possible. Le rivage doit également être physiquement stable. La transition doit être nette entre l'eau et la

terre ferme. Le bord doit être orienté correctement par rapport à l'orbite du satellite. Finalement, les températures de l'eau et de la terre doivent fluctuer le moins possible durant l'année. Compte tenu de ces critères, 5 sites ont été retenus afin d'estimer la PSF du capteur TIRS à bord du satellite Landsat 8 (WENNY et al., 2015).

Dans le but d'estimer l'ESF, il est impératif d'identifier l'emplacement exact du bord. Pour ce faire, la fonction de Fermi est ajustée aux données à l'aide de l'algorithme des moindres carrés. De plus, cette fonction est modifiée, en ajoutant un terme linéaire (gX), en raison de la nature de l'arête utilisée. En effet, la température de chaque côté de la frontière terre/eau n'est pas constante. Ce terme permet donc de prendre en compte le changement de température de manière à peu près linéaire à mesure que la distance au bord augmente (WENNY et al., 2015). L'équation de la fonction de Fermi utilisée est :

$$y(x) = r\acute{e} + \frac{b - d}{1 + e^{-s(X-e)}} + gX \quad (1.10)$$

Avec :

- d, la valeur moyenne du côté sombre du bord ;
- b, la valeur moyenne du côté clair ;
- s, la pente du bord ;
- e, la position réelle du bord.

En vue d'obtenir l'ESF, les profils de bord ont été alignés en fonction de l'emplacement estimé du bord. Ensuite, les données ESF sont normalisées en soustrayant la partie linéaire du modèle de Fermi modifié. En divisant par la hauteur du bord (bd), ces données sont transformées en vue de s'étendre de 0 à 1. Après avoir établi le profil de bord, les données ont été filtrées par un filtre Savitzky-Golay pour éliminer le bruit ainsi que pour fournir un échantillonnage horizontal uniforme. La dernière étape consiste en la différenciation de l'ESF afin d'obtenir la PSF (WENNY et al., 2015).

Toutes ces étapes permettent donc d'évaluer la qualité spatiale de l'instrument TIRS via l'estimation de la PSF. L'article donne les PSF estimées pour les 5 sites ainsi que les modèles gaussiens s'ajustant respectivement à chacune des 5 PSF. Les largeurs à mi-hauteur (FWHM) de chacune des PSF sont également exprimées. La FWHM exprime l'amplitude d'une fonction, dans ce cas, l'amplitude de la PSF. Chacune des fonctions gaussiennes ajustées à la PSF a une amplitude de 1 et une moyenne de 0. Les FWHM varient entre 6,09 et 7 pixels de 30 m (WENNY et al., 2015).

1.4 Modélisation des ICU

De manière à améliorer la compréhension sur les ICU, tant d'un point de vue de leur prédiction que de l'évaluation de l'efficacité de différentes stratégies, différents modèles se sont développés.

En raison de la faible résolution spatiale et temporelle des outils de mesure de la température de l'air, la modélisation est particulièrement utilisée dans l'étude des BLHI et des CLHI. Cependant, la modélisation est également employée lors de l'étude des SHI.

Les modèles peuvent être développés à l'échelle du bâtiment, du quartier ou de la ville en fonction de l'objectif de l'étude (MIRZAEI, 2015). L'adéquation de l'échelle utilisée permet de générer un modèle statistique avec le meilleur pouvoir explicatif et prédictif (CHUN & GULDMANN, 2014).

Le modèle à l'échelle du bâtiment permet d'étudier la performance énergétique du bâtiment. Il analyse la réponse de l'enveloppe de la construction face aux changements extérieurs. Afin d'étudier l'effet de l'UCI sur la performance énergétique du bâtiment étudié, ce modèle doit être intégré dans des modèles plus larges (MIRZAEI, 2015).

Les modèles à micro-échelle, échelle du quartier, peuvent inclure le rayonnement solaire, la convection, le bilan énergétique d'une couche de canopée urbaine, l'aspect du canyon de la rue, les matériaux de surface, la végétation,... Un modèle à petite échelle aide à étudier l'impact d'un nombre limité de paramètres sur la température (MIRZAEI & HAGHIGHAT, 2010). La limite principale d'un tel modèle est le coût. Celui-ci rend l'analyse limitée à quelques centaines de mètres (MIRZAEI, 2015 ; MIRZAEI & HAGHIGHAT, 2010).

Dans les domaines de la climatologie et de la météorologie urbaine, la modélisation se réalise à l'échelle de la ville au niveau macro. À cette échelle, des modèles de régression sont couramment développés afin de comprendre la relation entre la variation spatio-temporelle de la température et différentes variables météorologiques, de morphologies urbaines, topographiques, anthropiques. Par exemple, la ventilation urbaine, la gestion de la dispersion de la pollution, le verdissement, le rayonnement, la couverture nuageuse, la position topographique, le volume de construction, l'orientation et l'occupation du sol peuvent être intégrés dans ces modèles. Une limite au modèle de régression consiste en sa faible résolution due à la taille des cellules. De plus, ces modèles ne sont valables que pour un lieu précis et peuvent difficilement être étendus à d'autres régions (MIRZAEI, 2015).

CHAPITRE

2

OBJECTIFS

Dans le but de soutenir la ville de Liège dans son Plan Canopée, ce mémoire a pour objectif d'augmenter la compréhension des ICU principalement via l'étude de la relation entre les ICU et l'occupation du sol. Afin de mieux appréhender les ICU, la qualité spatiale du capteur TIRS est étudiée. Deux objectifs sont poursuivis dans ce mémoire.

Concrètement, ce mémoire a pour objectif de comprendre le lien entre la LST et l'occupation du sol dans la ville de Liège. La question de recherche se formule ainsi : « *Quel est l'impact des différentes occupations du sol sur la LST ?* ». Afin de prendre en considération la résolution effective du capteur TIRS lors de la mesure des températures, l'impact de la PSF du capteur TIRS est étudié et la PSF est appliquée à l'occupation au sol. Cette démarche permet de répondre à la question : « *La prise en compte de la PSF du capteur TIRS permet-elle de mieux caractériser la relation entre la LST et l'occupation du sol ?* »

Ensuite, un modèle prédictif est conçu en vue de répondre à la question : « *Est-ce que l'occupation du sol suffit à prédire la présence de SHI à Liège ?* ». Des modèles prédictifs sont réalisés avec et sans la prise en compte de la PSF afin de répondre à la question de recherche : « *Est-ce que l'occupation du sol prenant en compte la PSF permet une prédiction plus précise de la présence de SHI à Liège ?* »

CHAPITRE

3

ZONE D'ÉTUDE

Ce mémoire vient soutenir la ville de Liège et son Plan Canopée visant à atténuer les ICU. La zone étudiée au travers de ce travail se situe donc dans l'est de la Belgique et couvre l'agglomération liégeoise (Figure 3.1). Le choix de la zone d'étude s'est porté sur le centre urbain de la Ville de Liège mais également sur les environs proches. Une telle zone permet une étude de la météorologie en centre-ville mais également en périphérie. La zone étudiée s'étend sur environ 9 km sur l'axe ouest-est et sur 7,5 km sur l'axe nord-sud. La superficie couverte par la zone d'étude s'étend sur 68,4 km². La zone d'étude est couverte par les scènes 198/25 et 197/25. Étant données que cette zone se situe dans l'emprise de deux scènes Landsat, la résolution temporelle est double.

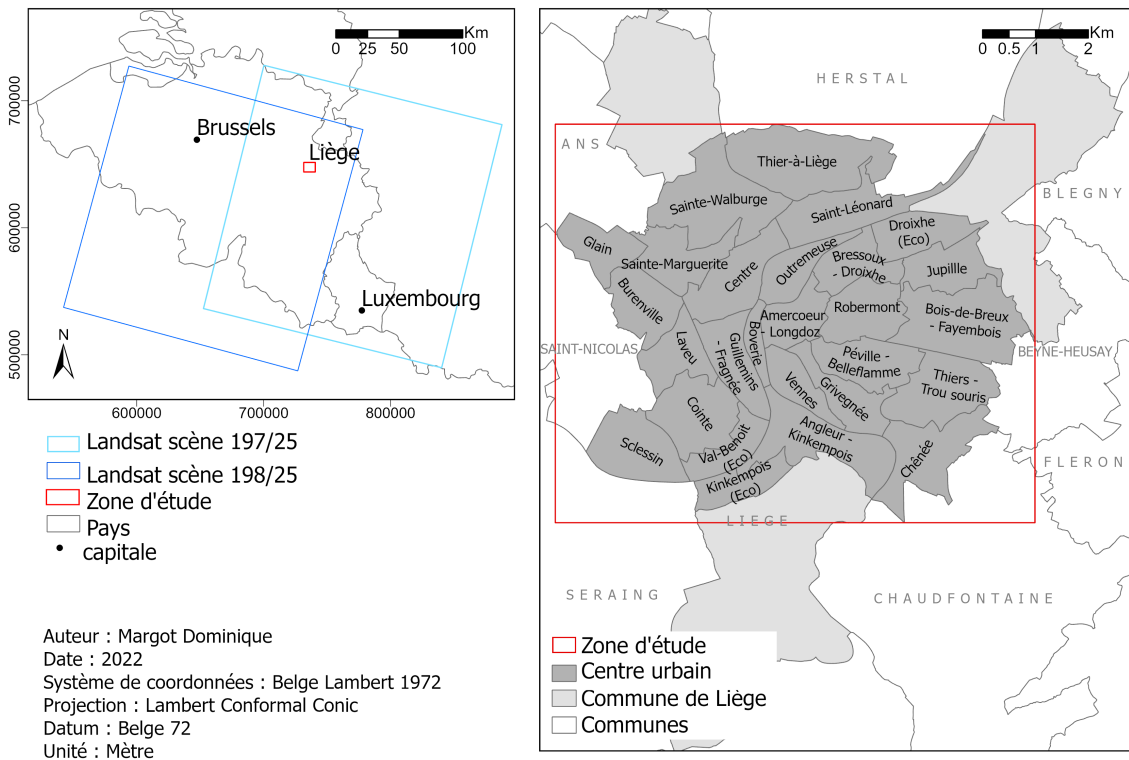
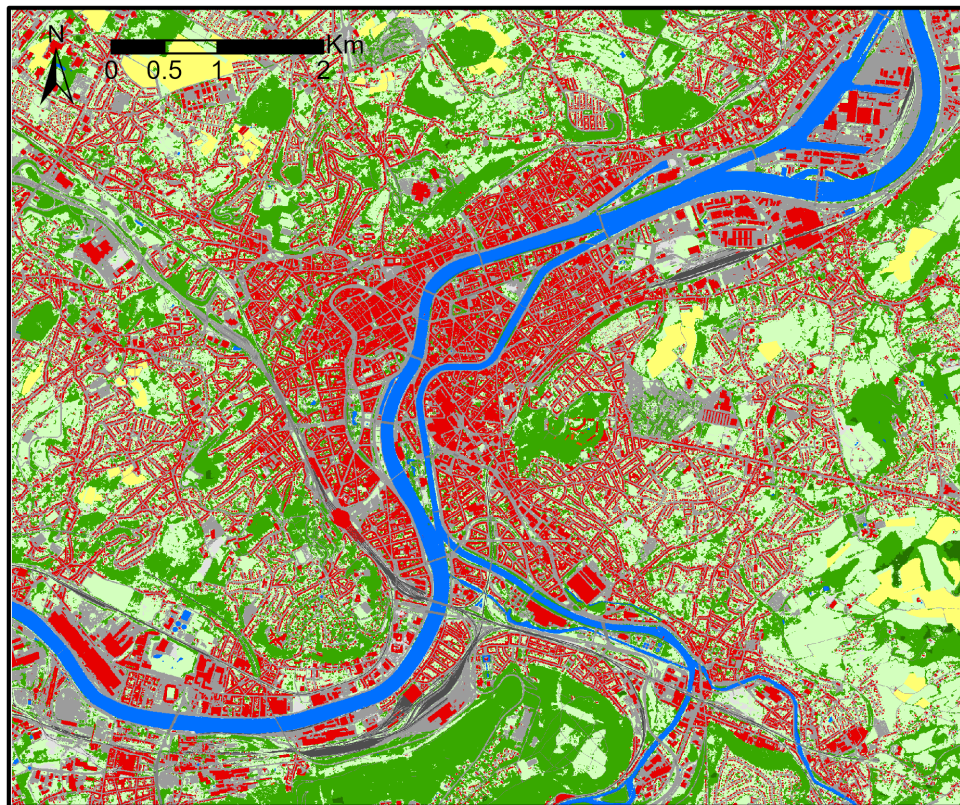


FIGURE 3.1 – Localisation de la zone d'étude.

De manière générale, l'agglomération de Liège comporte une aire d'influence majeure au sein du territoire wallon. Celle-ci est densément artificialisée avec 54 % de sa superficie en zones artificialisées (BOUSBAINÉ, 2020). De plus, cette agglomération est la plus peuplée de Wallonie et la troisième de Belgique avec 500 000 habitants (BOUSBAINÉ, 2020 ; MÉRENNE-SCHOUMAKER, 2010). En 2020, le centre-ville présentait une densité de 2 851,8 habitants/km² (BOUSBAINÉ, 2020). La ville se situe au confluent de la Meuse, de l'Ourthe et de la Vesdre (MÉRENNE-SCHOUMAKER, 2010). Le climat de Liège est dit tempéré. Les précipitations annuelles totales en moyenne sont de 900mm alors que la température moyenne annuelle est de 9,5 °C (VAN DER PERRE et al., 2015).

La Figure 3.2 met en exergue l'occupation du sol dans la zone étude. Cette carte permet de comprendre le contexte local dans lequel s'intègre ce projet. La région analysée se centre sur le centre-ville ayant une densité élevée en bâtis. Des zones boisées, des cultures et des constructions peu denses sont visibles vers l'extérieur de la zone d'étude sur les plateaux et versants de la ville. La Meuse traverse la zone. Il est également possible de voir l'Ourthe et la Vesdre dans le sud de la zone et le canal Albert au nord.



Système de coordonnées : Belge Lambert 2018

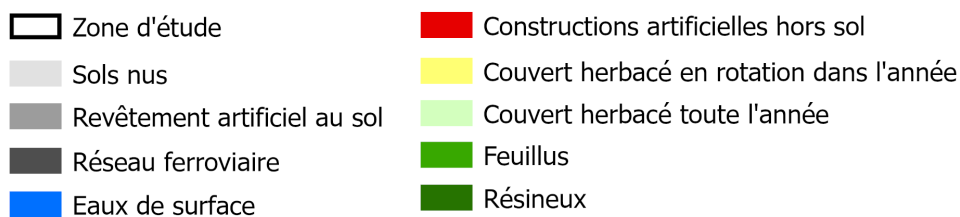


FIGURE 3.2 – Occupation du sol dans la zone d'étude (LENNERT et al., 2019).

CHAPITRE

4

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Ce chapitre s'articule en différentes parties. La première partie a pour finalité d'avoir une vue d'ensemble des données utilisées et des étapes réalisées au cours de ce mémoire. Les deuxième et troisième parties présentent respectivement les données et programmes indispensables pour la réalisation de ce travail. Ensuite, les différentes étapes de traitement des données sont explicitées.

4.1 Démarche générale

La Figure 4.1 présente la démarche générale du travail. Celle-ci est axée autour de trois sources de données principales : les images du capteur TIRS de Landsat 8, les données d'occupation du sol (Walou 2018) et la PSF du capteur TIRS obtenue dans l'article WENNY et al. (2015).

Les encadrements ovales indiquent les données et logiciels tandis que les cadres rectangulaires font référence aux étapes principales. Les encadrés grisés désignent, quant à eux, les objectifs.

Une première approche de la structure générale de la méthodologie est bénéfique afin de mieux appréhender dans sa globalité l'ensemble des étapes. Premièrement, 11 images du capteur TIRS de Landsat 8 sont sélectionnées. Celles-ci correspondent à 11 dates de grandes chaleurs. Le logiciel LANDARTs estime à partir de ces images la LST aux différentes dates et un traitement des images est opéré. Cela permet de cartographier la LST. Cela peut conduire à l'obtention d'une carte représentant les SHI.

La carte d'occupation du sol (Walou 2018) ayant subi différents traitements, de même que ces images permettent de répondre à la question « *Quel est l'impact des différentes occupations du sol sur la LST ?* ».

Ensuite, la PSF du capteur TIRS est étudiée et mise en relation avec la carte Walou 2018 afin de produire une carte d'occupation du sol prenant en considération la PSF du capteur TIRS. Cette carte ainsi que les images Landsat 8 permettent d'analyser si : « *La prise en compte de la PSF permet-elle de mieux caractériser la relation entre la LST et l'occupation du sol ?* ».

Finalement, deux modèles linéaires mixtes sont construits de manière à comprendre si l'occupation du sol permet de prédire la LST et donc les SHI. La comparaison entre les deux modèles évalue si l'ajout de la PSF à l'occupation du sol donne lieu à une prédiction plus précise des SHI.

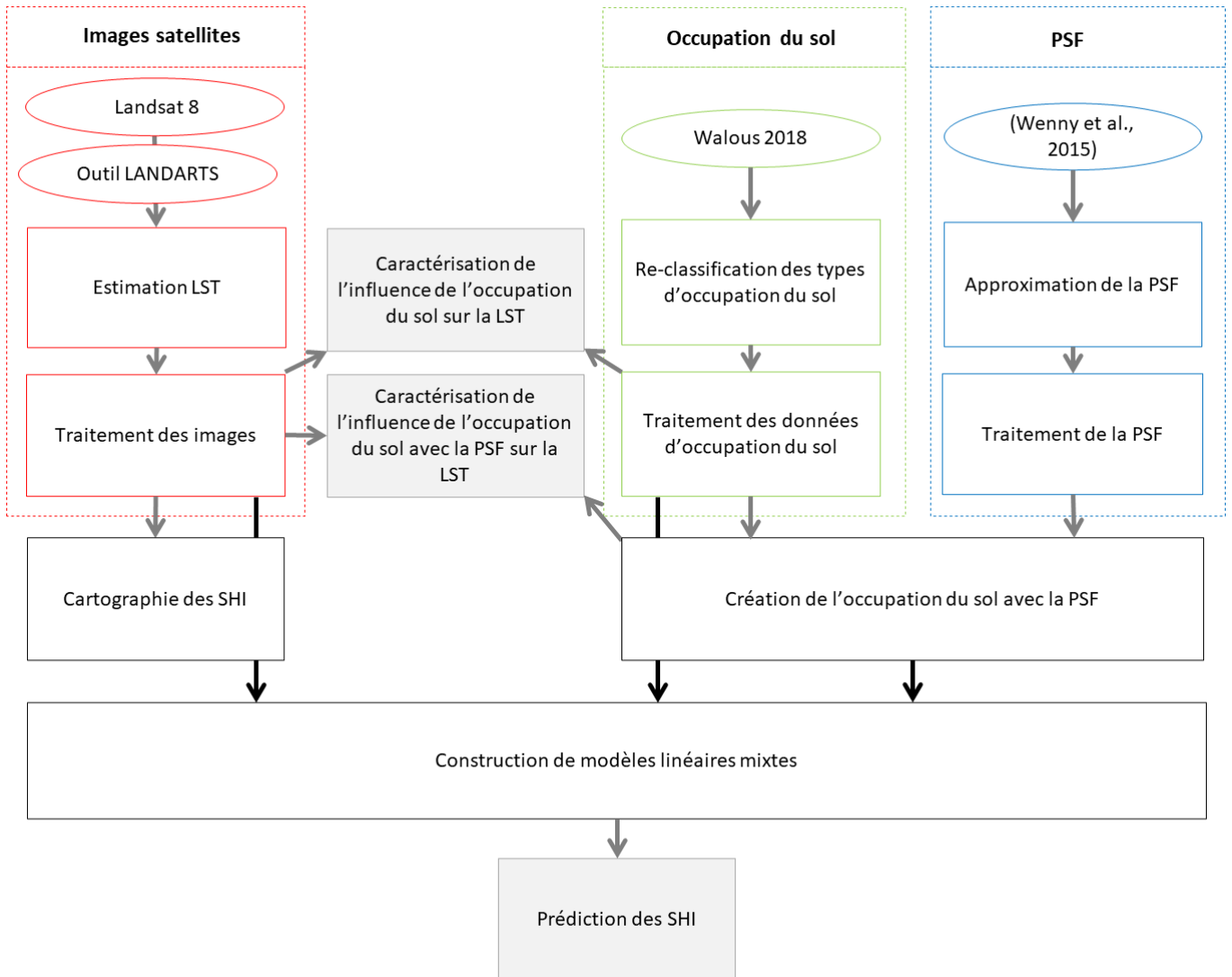


FIGURE 4.1 – Démarche générale de l'étude

4.2 Sources de données

4.2.1 Série d'images Landsat 8

Pour ce travail, les images doivent être capables de fournir une LST avec une bonne résolution spatiale afin de pouvoir étudier l'impact de l'occupation du sol sur les ICU. Pour ce faire, les images en infrarouge thermique capturées par le capteur TIRS embarqué sur le satellite d'observation de la Terre Landsat 8 ont été choisies. Ce choix a été opéré car le capteur TIRS a une résolution spatiale de 100 m et une résolution temporelle de 16 jours. Ce capteur présente donc des résolutions appropriées pour ce mémoire. De plus, un outil permet de passer des images dans l'infrarouge thermique à la LST.

Landsat 8 a été lancé en février 2013. Celui-ci tourne autour de la Terre sur une orbite quasi polaire héliosynchrone ayant une inclinaison de 98,2 degrés. La période de revisite est de maximum 16 jours. L'heure de capture des images par le satellite au-dessus de la Belgique varie entre 10 et 11 heures. Le système géodésique est le World Geodetic System 1984 (WGS84). L'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS), qui a la charge d'exploitation des données collectées, met les données à disposition en libre accès (USGS, p. d.-b).

Ce satellite Landsat transporte deux capteurs distincts, OLI et TIRS, qui lui permettent d'acquérir des données dans respectivement 9 et 2 bandes (Tableau 4.1). Les bandes thermiques 10 et 11 du capteur TIRS fournissent des images dans l'infrarouge thermique avec une résolution de 100 m (USGS, p. d.-c).

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat 8 (USGS, p. d.-c).

Bandes	Longueur d'onde [μm]	Résolution [m]
Imageur terrestre opérationnel (OLI)		
Bande 1 - Aérosol côtier	0,43 - 0,45	30
Bande 2 - Bleu	0,45 - 0,51	30
Bande 3 - Vert	0,53 - 0,59	30
Bande 4 - Rouge	0,64 - 0,67	30
Bande 5 - Proche infrarouge (NIR)	0,85 - 0,88	30
Bande 6 - SWIR 1	1,57 - 1,65	30
Bande 7 - SWIR 2	2,11 - 2,29	30
Bande 8 - Panchromatique	0,50 - 0,68	15
Bande 9 - Cirrus	1,36 - 1,38	30
Capteur infrarouge thermique (TIRS)		
Bande 10 - Infrarouge thermique (TIRS) 1	10,6 - 11,19	100
Bande 11 - Infrarouge thermique (TIRS) 2	11,5 - 12,51	100

Pour ce mémoire, il a été choisi d'analyser des images de la ville de Liège lors de périodes de vague de chaleur. Le choix s'est porté sur des images allant de l'année 2018 à 2021 du mois d'avril au mois de septembre (Tableau 4.2). Ces années ont été choisies car elles sont relativement récentes. Concernant les mois de l'année étudiés, ceux-ci sont les plus susceptibles de produire des ICU impactant négativement la population. Les images sélectionnées présentent une couverture nuageuse inférieure à 10 %. À ces dates, les précipitations n'ont pas dépassé 0,5 mm pour la ville de Liège. Ces images couvrent la ville de Liège et appartiennent aux scènes 198/025 et 197/025 de Landsat 8 (USGS, p. d.-a).

TABLEAU 4.2 – Images sélectionnées (USGS, p. d.-a).

Dates	Scènes	Température maximale de l'air à Liège à l'ombre [°C]	Vague de chaleur climatique nationale
13 septembre 2021	197/025	23	
04 septembre 2021	198/025	25	
17 septembre 2020	198/025	22	
31 juillet 2020	198/025	32	
30 août 2019	198/025	26	
23 août 2019	197/025	29	X
27 juin 2019	198/025	24	X
04 août 2018	197/025	32	X
26 juillet 2018	198/025	35	X
7 mai 2018	198/025	26	
21 avril 2018	198/025	25	

4.2.2 Carte d'occupation du sol en Wallonie

La carte d'occupation du sol en Wallonie, Walous 2018, a été choisie comme carte d'occupation du sol pour la région étudiée. Celle-ci présente comme avantage d'avoir été réalisée récemment. De plus, sa grande résolution spatiale (1 m) décrit finement la couverture physique et biologique de la surface terrestre.

Cette couche dépeint, pour l'année 2018, la cartographie de l'occupation du sol de l'ensemble du territoire wallon. Elle a été réalisée dans le cadre du projet de recherche Wallonie Occupation et Utilisation du Sol (WALOUS 2017-2020) par consortium de deux universités (l'UCLouvain et l'ULB) et un centre de recherche public (l'ISSeP) via une subvention de la Région wallonne. La carte est fournie dans le système de projection Lambert belge 2008 (LENNERT et al., 2019).

Ce jeu de données détaille la couverture du sol en 12 classes réparties de la façon suivante : « Eaux de surface », « Sols nus », « Revêtement artificiel au sol », « Réseau ferroviaire », « Constructions artificielles hors sol », « Serres », « Couvert herbacé en rotation dans l'année », « Couvert herbacé toute l'année », « Feuillus ($> 3m$) », « Feuillus ($\leq 3m$) », « Résineux ($> 3m$) » et « Résineux ($\leq 3m$) » (SPW et al., 2018).

Concernant la classe « Revêtement artificiel du sol », tous les revêtements artificiels du sol, de nature peu ou pas perméable, y sont repris. En termes d'utilisation, cela fait référence aux réseaux routiers, trottoirs, terrasses, parkings et les terrains ou pistes de sport en matériaux synthétiques (public de WALLONIE, p. d.).

Toutes les roches mères non couvertes par des végétaux supérieurs durant toute l'année sont reprises dans la classe « Sols nus » (public de WALLONIE, p. d.).

La classe « Couvert herbacé en rotation » reprend les parcelles combinant un couvert herbacé durant une partie de l'année et un sol temporairement mis à nu. Les utilisations du sol : cultures annuelles et prairies temporaires succédant à une culture annuelle sont regroupées dans cette classe (public de WALLONIE, p. d.).

Tous les sols recouverts par de la végétation herbacée tout au long de l'année sont inclus dans la classe « Couvert herbacé toute l'année ». Cette végétation peut être d'origine naturelle, agricole (via les prés et prairies non labourés) ou artificielle (comme les jardins, terrains de sport, parcs,...) (public de WALLONIE, p. d.)

4.2.3 PSF

Pour ce mémoire, l'estimation de la PSF du capteur TIRS se fait via l'analyse de l'article WENNY et al. (2015). Les démarches entreprises dans cet article sont expliquées dans la section 1.3.4.

La PSF calculée sur le site Sarah 3 sera utilisée pour ce travail. La raison étant que ce site produit des estimations très cohérentes de FWHM comme l'indiquent les faibles écarts-types. Le site Sarah 3 est le plus précis avec le site du Yémen (WENNY et al., 2015).

L'ESF du site du Sarah 3 est reprise à la Figure 4.2. Cette ESF est assez symétrique avec de bonnes caractéristiques signal/bruit. Cependant, plus de bruits sont visibles du côté terrestre du bord. Une courbe gaussienne a été ajustée aux données et sera utilisée dans le mémoire. Cette courbe suit la fonction gaussienne (équation 1.9). La valeur FWHM de ce site vaut 6,26 pixels sur base du produit L1T qui est rééchantillonné avec des pixels de 30 m. Cela signifie que la résolution empirique est de 187,8 m. L'écart-type de la fonction gaussienne vaut 2,65 alors que la moyenne égale 0 (WENNY et al., 2015).

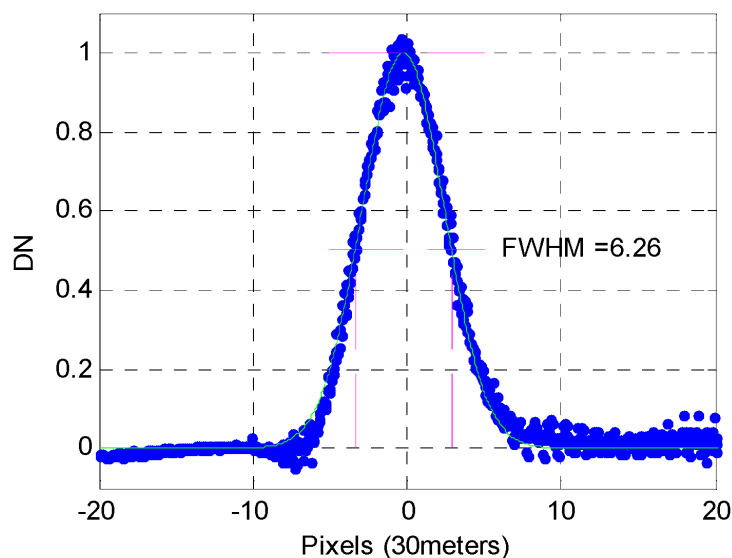


FIGURE 4.2 – Les ronds bleus représentent l'estimation de l'ESF pour le site Sarah 3 avec en ligne cyan, un modèle gaussien ajusté. Le côté eau est à gauche et le côté terre à droite (WENNY et al., 2015).

4.3 Outils numériques

4.3.1 Système d'information géographique

Dans le cadre de ce mémoire, la visualisation, l'édition, l'analyse et certains traitements de données géospatiales 2D ont été réalisés à l'aide du logiciel **ArcGISPro**. Ce logiciel est un Système d'Information Géographique (SIG) développé par Esri. Cette solution SIG professionnelle est appréciée pour son interface intuitive et sa diversité d'outils.

4.3.2 Langages de programmation et outils

Bien que le logiciel ArcGISPro soit optimal pour la visualisation de données géospatiales ou pour certains traitements de base, un langage de programmation est préférable lors des traitements de grands volumes de données. En effet, de tels langages jouissent d'une considérable puissance de calcul et permettent une automatisation des traitements répétitifs. Ceux-ci permettent également une diversité de traitements et d'analyses de données.

Python

Dans ce mémoire, beaucoup d'opérations réalisées sur les données ont été exécutées par le langage de script Python. Ce langage présente comme avantage d'être très polyvalent. Ces différentes bibliothèques spécialisées lui permettent de s'adapter à tout type d'utilisation. Le traitement des images de télédétection et des données géoréférencées a été principalement réalisé par les bibliothèques GDAL et NumPy. Un autre atout de ce langage est sa gratuité.

R

L'analyse statistique a été réalisée par le biais du langage R. Le logiciel R est libre et spécialisé dans l'analyse des données et plus spécifiquement dans le calcul statistique. Il permet également de réaliser des représentations graphiques des différents résultats statistiques.

LANDARTs

Dans ce mémoire, la transformation des images thermiques du capteur TIRS de Landsat 8 en des cartes LST haute résolution se fait via l'outil LANDARTs. Ce logiciel code en python de manière entièrement automatique. Les données thermiques Landsat sont données au logiciel qui en ressort les données de LST correspondantes (TARDY et al., 2016). Les différentes étapes réalisées par ce logiciel sont expliquées dans la section 1.3.2.

Aucune calibration de LANDARTs pour la zone d'étude n'a été réalisée. Les paramètres standards ont été conservés.

4.4 Traitement des images satellites

4.4.1 Estimation de la LST

À partir des 11 images thermiques Landsat 8 sélectionnées, il est possible de calculer la LST via l'utilisation du logiciel LANDARTs. Les images de Landsat 8 téléchargées sont compressées dans des fichiers .tar.gz. À partir de ces fichiers, LANDARTs produit 11 rasters .tif exprimant la LST pour chaque date en Kelvin x 100 à une résolution de 30 m.

La LST est, ensuite, transformée afin d'obtenir comme unité le degré Celsius.

Les images de LST en degrés Celsius initialement projetées en UTM 31N/WGS84 sont reprojétées en Lambert belge 2008. Par la suite, celles-ci sont coupées selon la zone d'étude.

4.4.2 Cartographie des SHI

Il est possible d'obtenir via ces données traitées, la cartographie des SHI sur la zone étudiée.

Pour ce faire, la LST moyenne de chacune des 11 images est calculée. Ensuite, pour chaque image, l'écart-type autour de la moyenne est estimé pour chaque pixel. Ces écarts-types sont additionnés pixel par pixel afin d'obtenir pour chaque pixel la somme des écarts-types des 11 dates. La somme des écarts-types est divisée par 11. Il en découle un raster présentant pour chaque pixel l'écart-type moyen (σ_{moyen}). Cela permet de caractériser les SHI. À cette fin, les pixels de ce raster peuvent être séparés en 5 groupes définis arbitrairement :

- Îlot de fraîcheur de surface (valeur du pixel (σ_{moyen}) ≤ -2);
- Fraîcheur relative de surface ($-2 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen}) \leq -1$);
- Température de surface moyenne ($-1 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen}) \leq +1$);
- Chaleur relative de surface ($+1 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen}) \leq +2$);
- Îlot de chaleur de surface ($+2 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen})$).

Cette méthode permet de cartographier les zones susceptibles de subir des SHI en n'excluant pas les zones où un SHI ne s'est pas produit lors de certaines dates sur les 11.

4.5 Traitement des données d'occupation du sol

La carte d'occupation du sol en Wallonie, WALOUS 2018, est projetée en Lambert belge 2008 à une résolution de 1 m.

4.5.1 Regroupement des données d'occupation du sol

De façon à augmenter la cohérence, certaines classes de la carte WALOUS 2018 sont regroupées. Étant donnée l'évolution dans le temps de la hauteur des arbres, les « Résineux ($> 3\text{m}$) » et les « Résineux ($\leq 3\text{m}$) » sont regroupés en une classe appelée « Résineux ». De même, les « Feuillus ($> 3\text{m}$) » et les « Feuillus ($\leq 3\text{m}$) » sont regroupés en une classe appelée « Feuillus ». Dans la mesure où la classe « Serres » n'est pas présente sur la zone étudiée, celle-ci est éliminée.

Les 9 classes d'occupation du sol résultantes se nomment de la façon suivante : « Sols nus », « Revêtement artificiel au sol », « Réseau ferroviaire », « Eaux de surface », « Constructions artificielles hors sol », « Couvert herbacé en rotation toute l'année », « Couvert herbacé toute l'année », « Feuillus », « Résineux ». Ces 9 classes seront donc étudiées au travers de ce mémoire.

4.5.2 Calcul des proportions d'occupation du sol par pixel de 30 X 30 m

L'objectif est d'étudier la relation entre la LST et chacune des occupations du sol pour la zone d'étude. Les occupations du sol doivent donc être séparées afin de pouvoir regarder la relation entre la LST et chaque occupation du sol séparément. De plus, les informations doivent reprendre la même zone et avoir des pixels de même emprise.

Cette carte est découpée selon la zone d'étude. Afin d'étudier la relation entre la LST et l'occupation du sol sans prendre en compte la PSF, chacune des classes est extraite séparément de la couche matricielle WALOUS 2018. Il en ressort 9 rasters binaires. Pour toutes ces couches matricielles, chaque pixel vaut 0 lorsque l'occupation considérée n'est pas présente sur l'emprise du pixel, et 1 lorsque la classe est présente sur la zone. Ensuite, dans le but d'obtenir la même résolution que pour les rasters de la LST, soit 30 x 30 m, 900 pixels de 1 m² sont additionnés selon le même découpage que celui de la LST. Chacun des pixels des 9 rasters vaut donc entre 0 et 900 en fonction du nombre de mètres carrés où l'occupation considérée par le raster est présente dans le pixel de 900 m². Finalement, les valeurs de ces rasters sont divisées par 900 dans le but d'obtenir des pixels ayant une valeur entre 0 et 1 en fonction de la fraction où l'occupation est présente sur le pixel. Les 9 rasters créés sont présents à l'Annexe 1.

4.6 Traitement des données d'occupation du sol afin de prendre en compte la résolution effective (PSF) du capteur TIRS

Afin de comparer les données d'occupation du sol et la LST, il est impératif d'avoir la même résolution effective. Pour ce faire, les données d'occupation du sol vont être traitées afin de prendre en compte la résolution effective (PSF) du capteur TIRS. Le but étant de pondérer la contribution de toutes les occupations du sol selon leur position par rapport à la mesure de LST. Pour ce faire, il faut connaître la proportion des occupations du sol à l'intérieur de l'emprise au sol de la PSF.

4.6.1 Approximation de la PSF du capteur TIRS

Une fonction gaussienne a été calculée dans le but d'approximer l'ESF estimée au sein de l'article WENNY et al. (2015). Comme il est possible de le voir à la Figure 4.3, la fonction gaussienne possède un écart-type de 2,65 et une moyenne de 0.

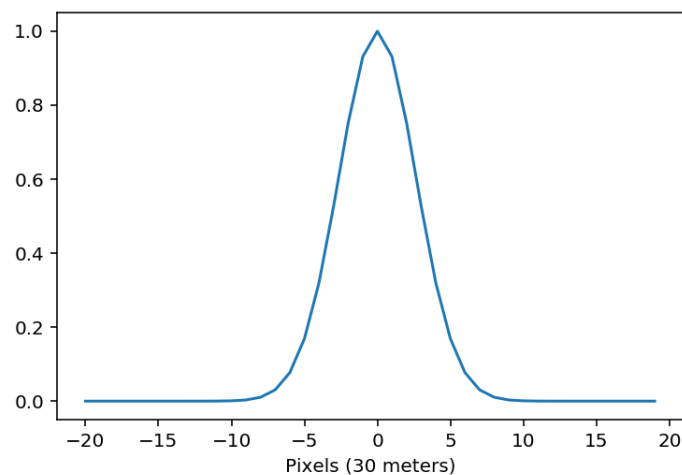


FIGURE 4.3 – Fonction gaussienne approxinant l'ESF calculée dans l'article WENNY et al. (2015) pour le site du Sarah 3.

Pour ce travail, selon l'hypothèse d'isotrope, il a été considéré que l'ESF est la même dans toutes les directions. La PSF peut donc être estimée. Cette fonction 3D a pour équation :

$$f(x, y) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2} - \frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

Avec :

σ , l'écart-type (valant 2,65).

L'allure générale de cette fonction est présentée à la Figure 4.4. Les pixels éloignés de plus de 10 pixels (de 30 x 30 m) par rapport au pixel central sont considérés comme ayant une influence négligeable en vue de l'allure générale du graphe.

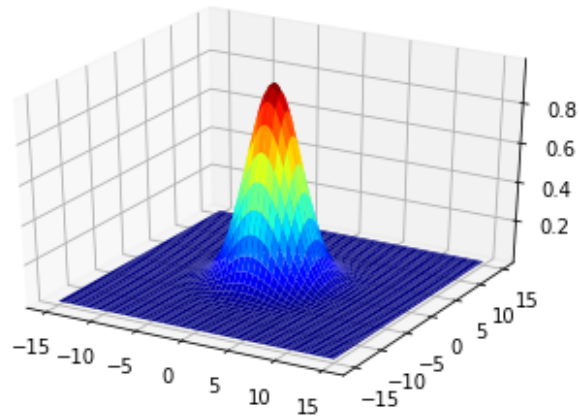


FIGURE 4.4 – Estimation de la PSF du capteur TIRS de Landsat 8.

Dans le but de pondérer la contribution des toutes les occupations du sol selon leur position par rapport à la PSF du capteur TIRS, l'intégrale de cette fonction est calculée. Cela permet de trouver respectivement le poids de chacun des 441 pixels (21 pixels en x et 21 pixels en y) dans la valeur du pixel central. La fonction est divisée par l'intégrale afin que la somme de chaque pixel soit égale à 1. Une nouvelle fonction est créée en prenant en compte cette normalisation.

4.6.2 Matrice PSF

Dans le but de prendre en compte la PSF du capteur TIRS pour les rasters d'occupation du sol, une matrice de pondération simulant l'effet de la PSF a été conçue. Cette matrice reprend les poids de chacun des quarts de pixel (15 m sur 15 m) distant de 20 demi-pixels de large dans les 4 dimensions du pixel central.

Étant donné que les rasters d'occupation du sol ont une résolution de 1 m^2 , le poids de chaque pixel de 1 m^2 aurait pu être calculé dans la PSF. Cependant, afin de réduire le temps de calcul, les poids de chacun des quarts de pixel ont été calculés. De plus, la même démarche a été réalisée avec des pixels de $30 \times 30 \text{ m}$ sans que la précision se voie réduite.

La dimension de la matrice est de 41 sur 41. Le poids de 1681 quarts de pixels a été calculé. La somme de tous les éléments de la matrice (poids des quarts de pixels) vaut 1.

La démarche réalisée est illustrée à la Figure 4.5.

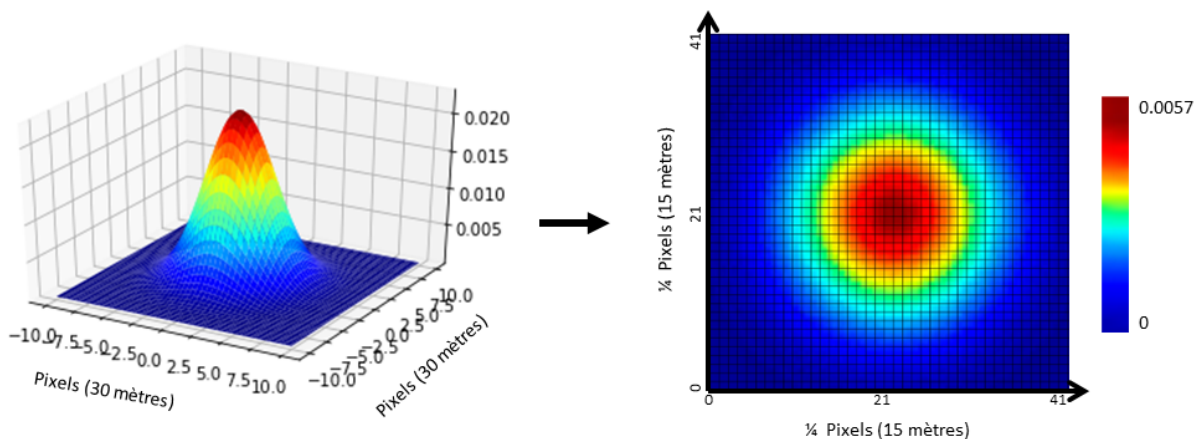


FIGURE 4.5 – Passage de la fonction de la PSF à la matrice de pondération simulant l'effet de la PSF.

4.6.3 Calcul des proportions d'occupation du sol pour tenir compte de la résolution effective (PSF)

Dans le but d'étudier la relation entre la LST et l'occupation du sol en prenant en compte la PSF du capteur TIRS, la carte d'occupation du sol en Wallonie a été découpée selon la zone d'intérêt en ajoutant 300 m des quatre côtés. L'intérêt de cet ajout sera expliqué ultérieurement. Chacune des 9 classes est ensuite extraite de cette carte découpée. Les rasters binaires créés présentent des pixels avec des valeurs de 0 et de 1 comme dans le cas de l'analyse sans PSF. Après cela, 225 pixels de 1 m² sont additionnés avec comme emprise le quart des pixels de la LST. Chacun des pixels des 9 rasters vaut donc entre 0 et 225. Cela dépend du nombre de mètres carrés où l'occupation considérée par le raster est présente dans le pixel de 15 m sur 15 m (quart de pixel de la LST).

4.6.4 Calcul des proportions d'occupation du sol par pixel de 30 X 30 m en tenant compte de la résolution effective (PSF)

La performance de la réponse spatiale du capteur TIRS implique la contribution de la LST de pixels voisins dans la réponse d'un pixel. Cela engendre donc la considération de l'occupation du sol des pixels voisins dans la réponse du pixel considéré. Il convient donc de s'intéresser à l'occupation du sol contribuant effectivement à la valeur mesurée de la LST pour chaque pixel.

Pour ce faire, la matrice de pondération simulant l'effet de la PSF va balayer respectivement les 9 rasters produits à la section précédente. Ces rasters ont comme emprise la zone étudiée avec un surcroît de 300 m sur les quatre côtés. L'ajout de 300 m sur les 4 côtés représente 20 pixels de 15 m² puisque la PSF est considérable jusqu'à 10 pixels de 30 m dans les 4 directions. Cet allongement permet de prendre en compte l'occupation du sol correspondant aux pixels voisins pour les pixels sur le bord de la zone étudiée. Ensuite, chaque élément de la matrice est multiplié par la valeur de l'occupation du pixel y faisant référence. Le tout est sommé afin d'attribuer une nouvelle valeur aux pixels. Il en ressort 9 nouveaux rasters avec comme attributs aux pixels le nombre de mètres carrés équivalents de l'occupation contribuant effectivement à la valeur mesurée de la LST. Les rasters conserveront donc une résolution de 15 m sur 15 m avec des pixels de valeur entre 0 et 225. La Figure 4.6 illustre la démarche dans le cas de l'occupation du sol « Eau de surface ».

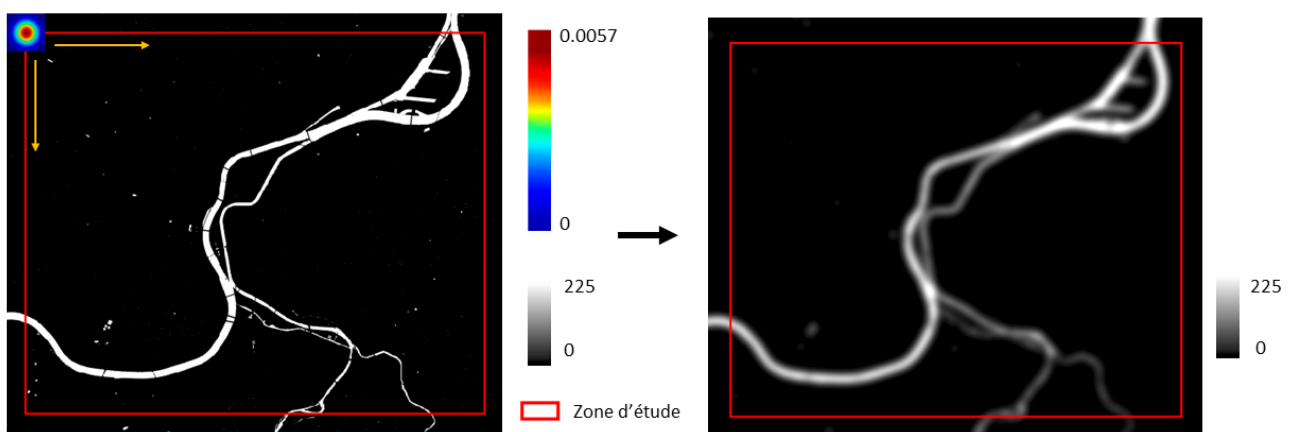


FIGURE 4.6 – Balayage de la matrice PSF afin d'obtenir les proportions de l'occupation du sol « Eau de surface » en tenant compte de la PSF.

Par la suite, les rasters sont coupés selon la zone d'étude. Les pixels sont agrégés 4 à 4 en vue de passer d'une résolution de 15 m à 30 m afin de revenir à la résolution de la LST. L'addition des pixels se fait selon le même découpage que les pixels de la LST. Finalement, afin d'obtenir des pixels avec des valeurs entre 0 et 1, la valeur des pixels est divisée par 900. Ces 9 rasters sont visibles à l'Annexe 1.

4.7 Caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST

Les rasters de la LST et ceux de l'occupation du sol avec et sans prise en compte de la PSF permettent d'évaluer combien la proportion d'un type d'occupation du sol constitue une variable expliquant la valeur de la LST.

Il est possible de caractériser l'influence de l'occupation du sol sur la LST via un modèle statistique, et ce, lorsque la PSF n'est pas prise en compte dans les rasters d'occupation du sol et lorsqu'elle est prise en considération. Ce modèle de régression linéaire cherche à établir une relation linéaire entre une variable expliquée et une ou plusieurs variables explicatives. Dans ce travail, la variable expliquée est la LST alors que les variables explicatives sont, dans un cas, l'occupation du sol sans PSF et, dans l'autre cas, l'occupation du sol avec la PSF. Afin de déterminer la qualité de prédiction, le coefficient de détermination peut être calculé pour chaque occupation du sol avec et sans prise en considération de la PSF. Ce coefficient varie entre 0, lorsque le pouvoir prédictif du modèle est nul, et 1 lorsque la variable explicative décrit entièrement la variable expliquée. Cette analyse statistique ne prend pas en considération les 5 premiers pourcents de chaque occupation du sol. En effet, aucun lien ne peut être attendu entre la LST et l'occupation du sol lorsque celle-ci est absente ou en très faible proportion. Un seuil de 5 % a donc été choisi. Le résultat escompté est la caractérisation de l'influence des 9 occupations du sol sur la LST ainsi que l'influence des 9 occupations du sol en considérant la PSF du capteur TIRS sur la LST.

4.8 Modèle linéaire mixte

Pour répondre au deuxième objectif, un résultat désiré est la prédiction de la présence des SHI. Le but est de prédire la LST pour chaque pixel à une date x connaissant la LST moyenne pour cette date ainsi que les proportions d'occupation du sol du pixel.

Pour ce faire, des modèles linéaires mixtes peuvent être construits. Ce type de modèle permet de modéliser les effets fixes et les effets aléatoires. Un modèle de la combinaison linéaire des pixels purs prédits via la régression linéaire, expliquée ci-avant, aurait pu être utilisé. Cependant, ce type de modèle produit des prédictions moins fiables que le modèle linéaire mixte.

4.8.1 Construction de modèles linéaires mixtes

Deux modèles vont être créés afin de répondre à cet objectif. Un modèle est calculé via les proportions d'occupation du sol sans tenir compte de la résolution effective et un autre modèle via les proportions d'occupation du sol en tenant compte de la résolution effective (PSF).

Les deux modèles vont être calibrés avec l'entièreté des pixels car lorsque la PSF est prise en compte peu de classes possèdent des pixels purs.

Sans considérer la PSF du capteur TIRS dans la donnée d'occupation du sol, pour chaque date, un système d'équations est créé. Ce système de 75 802 équations (voir équation 4.2), en relation avec le nombre de pixels par raster est résolu via la méthode des moindres carrés. La résolution de ce système d'équations aboutit à la connaissance des valeurs de LST si le pixel était entièrement occupé par une occupation du sol ($LST_{Occupation\ du\ sol}$). Chaque système d'équations produit donc 9 valeurs en sortie. Celles-ci correspondent à $LST_{Occupation\ du\ sol}$ pour les 9 occupations du sol. Cette démarche est exécutée pour les 11 différentes dates.

$$\begin{aligned}
 LST_{pixel} = & LST_{Construction} \times Proportion_{Construction} \\
 & + LST_{Eau} \times Proportion_{Eau} \\
 & + LST_{Feuillus} \times Proportion_{Feuillus} \\
 & + LST_{Couvertherbactoutel'anne} \times Proportion_{Couvertherbactoutel'anne} \\
 & + LST_{Couvertherbacenrotationtoutel'anne} \times Proportion_{Couvertherbacenrotationtoutel'anne} \\
 & + LST_{Rseauferroviaire} \times Proportion_{Rseauferroviaire} \\
 & + LST_{Rsineux} \times Proportion_{Rsineux} \\
 & + LST_{Revetementartificiel} \times Proportion_{Revetementartificiel} \\
 & + LST_{Solsnus} \times Proportion_{Solsnus}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Avec :

LST_{pixel} , la LST du pixel considéré ;

$LST_{Occupation\ du\ sol}$, la LST si le pixel était entièrement occupé par cette occupation-là, valeur inconnue avant le modèle ;

$Proportion_{Occupation\ du\ sol}$, la part du pixel occupée par cette occupation, avec et sans PSF en fonction du modèle, allant de 0 à 1.

Une généralisation entre les 11 dates des $LST_{Occupation\ du\ sol}$ est réalisée pour les 9 occupations du sol afin d'avoir un modèle robuste d'estimation de la LST. Pour chaque occupation du sol et chaque date, la LST moyenne de la zone d'étude est soustraite de la $LST_{Occupation\ du\ sol}$ puis le résultat est divisé par la LST moyenne de la zone d'étude. Ensuite, la moyenne des 11 valeurs produites par occupation du sol est calculée. Cette généralisation aboutit à la connaissance de l'augmentation ou de la diminution de LST que produit la classe pour chaque degré moyen pour la zone d'étude entière ($\Delta LST_{Occupation\ du\ sol}$). Cette normalisation a été choisie car elle semble la plus stable dans le temps.

Dans le cas de la prise en considération de la PSF pour l'occupation du sol, la même méthodologie est pratiquée. Cependant, la proportion pour chaque occupation du sol est celle où la PSF est considérée. Un second modèle est donc produit.

4.8.2 Utilisation des modèles linéaires mixtes

Par ces modèles, il est possible de produire des rasters estimant la LST de chaque pixel lorsque la LST moyenne pour la zone d'étude et l'occupation du sol sont connues à la date étudiée. Le modèle ayant comme paramètres : la LST moyenne pour la date, les 9 valeurs calibrées de $\Delta LST_{Occupation\ du\ sol}$ et les 9 proportions d'occupation du sol, est utilisé via l'équation 4.3. Le produit est un raster avec les LST estimées pour chaque pixel.

En fonction du modèle utilisé, la LST_{pixel} sera différente puisque les $\Delta LST_{Occupation\ du\ sol}$ et les proportions d'occupation du sol sont différentes pour les deux modèles.

$$\begin{aligned}
 LST_{pixel} = & LST_{moyenpourladate} + LST_{moyenpourladate} \times \\
 & \left(\Delta LST_{Construction} \times Proportion_{Construction} \right. \\
 & + \Delta LST_{Eau} \times Proportion_{Eau} \\
 & + \Delta LST_{Feuillus} \times Proportion_{Feuillus} \\
 & + \Delta LST_{Couvertherbactoutel'anne} \times Proportion_{Couvertherbactoutel'anne} \\
 & + \Delta LST_{Couvertherbacenrotationtoutel'anne} \times Proportion_{Couvertherbacenrotationtoutel'anne} \\
 & + \Delta LST_{Rseauferroviaire} \times Proportion_{Rseauferroviaire} \\
 & + \Delta LST_{Rsineux} \times Proportion_{Rsineux} \\
 & + \Delta LST_{Revetementartificiel} \times Proportion_{Revetementartificiel} \\
 & \left. + \Delta LST_{Solsnus} \times Proportion_{Solsnus} \right)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Avec :

LST_{pixel} , la LST estimée du pixel ;

$\Delta LST_{Occupationdusol}$, l'augmentation ou la diminution que produirait la classe pour chaque degré moyen de la zone si le pixel était entièrement occupé par cette occupation-là, valeur trouvée via la généralisation du modèle ;

$Proportion_{Occupationdusol}$, la part du pixel occupée par cette occupation avec et sans PSF en fonction du modèle allant de 0 à 1.

4.8.3 Validation des modèles linéaires mixtes

De façon à valider les deux modèles linéaires, pour chaque modèle, la normalisation expliquée auparavant pour calculer $\Delta LST_{Occupationdusol}$ est réalisée à 11 reprises en excluant chaque fois une des 11 dates. Le modèle estimé avec dix dates est utilisé sur la 11e date (voir équation 4.3) et produit un raster avec les LST estimées pour chaque pixel. Ensuite, le raster de la LST estimée pour cette date est soustrait du raster de la LST trouvé par LANDARTs. De cette manière, il est possible de repérer les zones où le modèle n'explique pas bien la variation de température.

Cette démarche est réalisée pour le modèle avec prise en compte de la PSF et pour le modèle calibré sans considération de la PSF.

CHAPITRE

5

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre vise à présenter les différents résultats obtenus. Certaines représentations ne concernent qu'une des 11 dates. Dans ce cas, les résultats pour les autres dates sont proches. Par la suite, une discussion sur les différents résultats sera menée.

5.1 Répartition spatiale de la LST

L'outil LANDARTs permet d'estimer la LST des images du capteur TIRS embarqué sur le satellite Landsat 8. Il en ressort les LST du tissu urbain et des eaux fluviales présentes sur la zone étudiée. L'image de la LST à la date du 27 juin 2019 est visible à la Figure 5.1. La même visualisation est disponible pour les 10 autres dates analysées (voir Annexe 2).

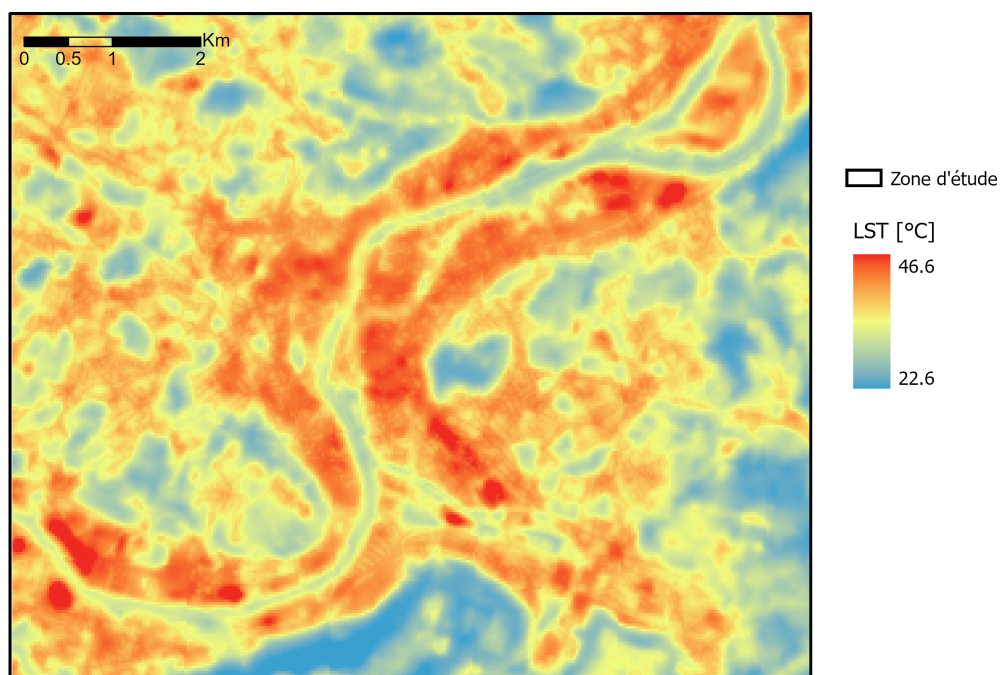


FIGURE 5.1 – LST à la date du 27 juin 2019 sur la zone étudiée à une résolution de 30 m.

Pour les dates étudiées, il est possible de visualiser au Tableau 5.1 la LST maximale, moyenne et minimale pour la ville de Liège. L’amplitude maximale (Δ) y est calculée en degré Celsius de même que l’écart-type (σ). Il y figure également les différences de températures entre les extrema de LST et la LST moyenne ($\Delta\overline{LST}$) pour chaque image.

Les LST moyennes vont de 16,56 à 41,24 °C en fonction des dates. L’amplitude maximale de la LST varie, pour les 11 dates, entre 16,41 et 26,84 °C. Une telle amplitude peut s’expliquer par l’hétérogénéité de la zone d’étude. En effet, celle-ci reprend aussi bien le centre urbain de la ville de Liège que l’environnement rural avoisinant. L’écart-type, lui, atteint 4,05 °C pour la date du 27 juin 2019 et ne descend en aucun cas sous les 2,44 °C.

TABLEAU 5.1 – Statistiques de la LST pour chaque date.

Dates	LST maximale ($\Delta\overline{LST}$) (°C)	LST moyenne (°C)	LST minimum ($\Delta\overline{LST}$) (°C)	Δ (°C)	σ (°C)
13 septembre 2021	26,71 (+10, 15)	16,56	8,92 (-7,64)	+17,79	2,94
04 septembre 2021	41,48 (+13, 48)	28,00	20,31 (-7,69)	+21,17	3,23
17 septembre 2020	33,58 (+8, 61)	24,97	17,17 (-7,80)	+16,41	2,44
31 juillet 2020	53,09 (+12, 74)	40,35	29,68 (-10,67)	+23,41	3,31
30 août 2019	44,15 (+14, 87)	29,28	17,31 (-11,97)	+26,84	3,52
23 août 2019	47,26 (+15, 44)	31,82	21,67 (-10,15)	+25,59	3,61
27 juin 2019	46,60 (+13, 74)	32,86	22,60 (-10,26)	+24,00	4,05
4 août 2018	48,19 (+11, 62)	36,57	22,65 (-13,92)	+25,54	3,53
26 juillet 2018	54,52 (+13, 28)	41,24	30,97 (-10,27)	+23,55	3,58
7 mai 2018	46,87 (+14, 76)	32,11	22,68 (-9,43)	+24,19	4,00
21 avril 2018	40,37 (+12, 21)	28,16	20,57 (-7,59)	+19,80	3,25

5.2 Cartographie des SHI

À la section 4.4.2, un raster est créé. Chacun de ses pixels présente comme valeur l’écart-type moyen (σ_{moyen}) pour ce pixel. L’écart-type moyen est la moyenne pour les 11 dates de l’écart-type de la LST de ce pixel à chacune des dates par rapport à la LST moyenne à cette date. Ce raster permet la cartographie des SHI dans la ville de Liège (Figure 5.2). Les quartiers souffrant fréquemment de SHI sont représentés en orange ($+1 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen}) \leq +2$) et rouge ($+2 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen})$) alors que ceux jouissant d’îlots de fraîcheur de surface durant les vagues de chaleur figurent en bleu clair ($-2 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen})$) et bleu foncé (valeur du pixel ($\sigma_{moyen}) \leq -2$). Les pixels blancs, quant à eux, représentent les régions où en moyenne pour les 11 dates la LST ne s’écarte pas de la moyenne par plus d’un écart-type ($-1 < \text{valeur du pixel } (\sigma_{moyen}) \leq 1$).

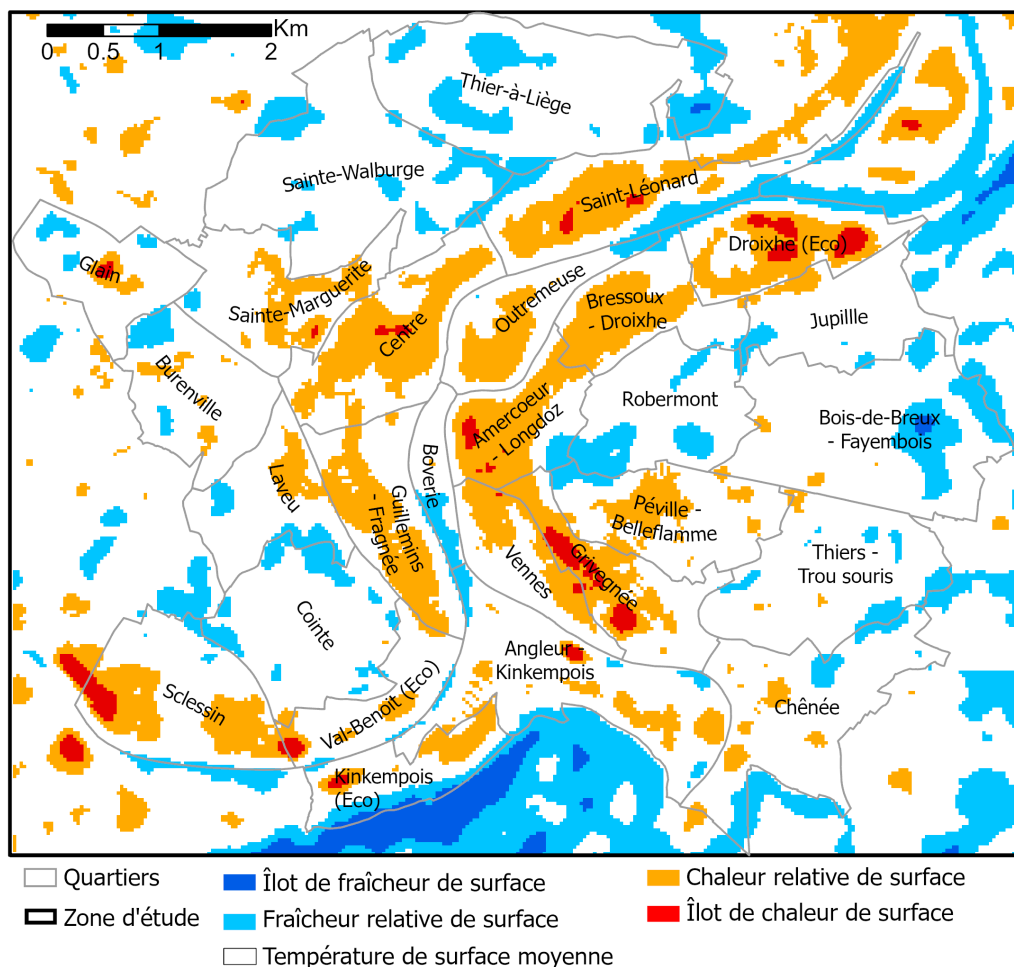


FIGURE 5.2 – Cartographie des SHI pour la zone étudiée.

Dans le centre-ville de Liège, une partie conséquente de la surface des quartiers Centre, Saint-Léonard, Outremeuse, Droixhe, Bressoux, Amercéeur-Longdoz, Grivegnée, Guillemins-Fragnées et Sclessin présente des SHI. Les zones qui présentent des SHI ont comme occupation principale « Constructions artificielles hors sol » avec 47 % et 40 % de ces zones sont en « Revêtement artificiel au sol ». Ces zones de SHI sont, en moyenne par rapport à la zone d'étude entière, 2,5 fois plus construites et 1,5 fois plus occupées par des revêtements artificiels au sol. En revanche, les feuillus y sont 6 fois moins présents et les couverts herbacés durant toute l'année 3,5 fois moins présents. La part d'eau passe, elle, de 4,7 % pour la zone d'étude à 0 % dans ces quartiers.

Un îlot de fraîcheur de surface considérable est visible dans le quartier du Sart-Tilman qui est fortement boisé. D'autres régions boisées ou fluviales présentent des îlots de fraîcheur de surface plus restreints. De fait, les quartiers jouissant d'îlots de fraîcheur de surface sont couverts à 65 % de feuillus ainsi qu'à 12 % d'eaux de surface. Proportionnellement, ces quartiers présentent 2,5 fois plus de surfaces occupées par des eaux de surface ou des feuillus que la zone d'étude. Inversement, ces îlots de fraîcheur de surface sont 6 fois moins occupés par de revêtements artificiels et presque 20 fois moins occupés par des constructions.

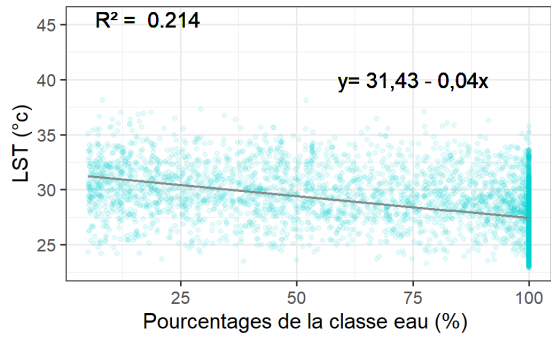
Les zones ayant des LST proches de la LST moyenne ont des occupations mixtes. En effet, dans ce cas, à part pour les couverts herbacés, aucune occupation isolée n'est visible sur une zone conséquente. Pour cette catégorie, les occupations du sol sont fortement mélangées. Le pourcentage de chacune des occupations du sol pour cette catégorie est très semblable aux pourcentages de la zone d'étude entière. En effet, aucune différence notable n'est visible. Cependant, la classe « Herbacé durant l'année » est un peu plus présente avec une occupation de 28 % pour cette catégorie contre 23 % pour la zone entière. Les classes « Constructions » et « Feuillus » sont moins présentes avec un pourcentage respectif de 16 % et 19 % contre 19 % et 24 % pour la zone d'étude entière.

5.3 Caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST

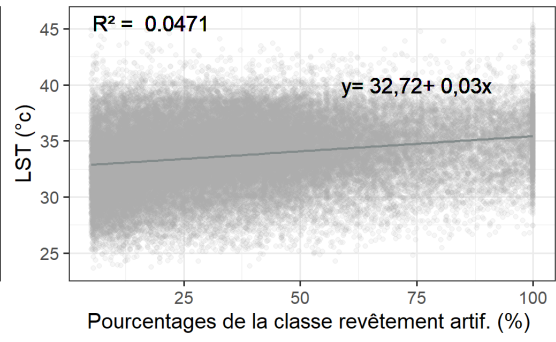
5.3.1 Influence de l'occupation du sol sur la LST

Les graphiques de la Figure 5.3 représentent les relations entre la LST à la date du 07 mai 2018 et la proportion de chaque occupation du sol pour chacun des pixels de l'image où la proportion de l'occupation du sol considérée est supérieure à 5 %. Les coefficients de détermination (R^2) sont faibles. Cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine peu la distribution des points. En effet, les 9 coefficients de détermination ont des valeurs entre $9,715 \times 10^{-06}$ et 0,372. La corrélation entre la LST et les classes : « Eaux de surface », « Constructions artificielles », « Herbacée durant toute l'année » et « Feuillus » s'élève respectivement à 0,214 ; 0,272 ; 0,114 et 0,372 alors qu'elle ne dépasse pas 0,0543 pour les 5 autres occupations du sol. La corrélation avec la classe « Eau de surface », « Herbacée durant toute l'année » et « Feuillus » est négative alors qu'elle est positive pour la classe « Constructions artificielles ».

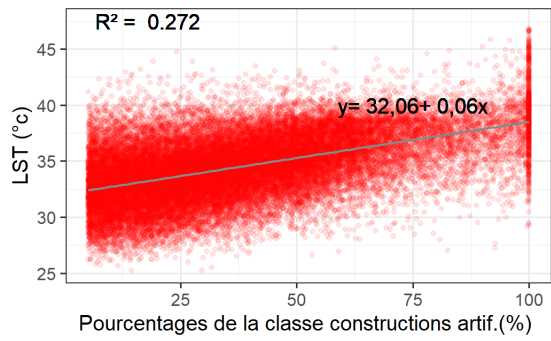
Selon ce modèle, une augmentation par pixel de 5 % à 100 % de la classe « Feuillus », « Couvert herbacé toute l'année » et « Eaux de surface » permet de diminuer la LST respectivement de 6 °C, 3,7 °C et 3,5 °C. Tandis qu'une augmentation par pixel de 5 % à 100 % de la classe « Constructions artificielles » provoque une augmentation de la LST de 6 °C. Le coefficient de détermination entre la LST et les classes : « Revêtement artificiel », « Réseau ferroviaire », « Sol nu », « Herbacée en rotation » et « Résineux » est proche de 0. Cela indique l'absence de relation linéaire entre les variables.



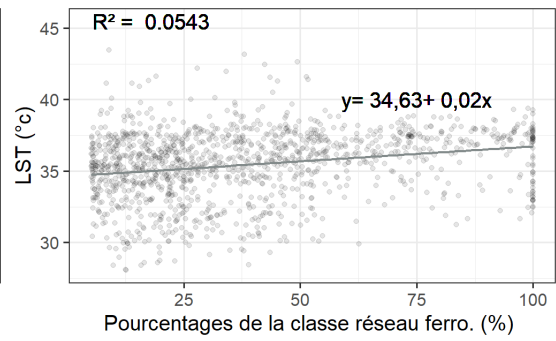
(a)



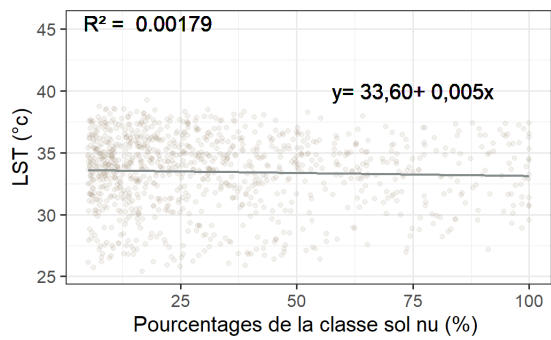
(b)



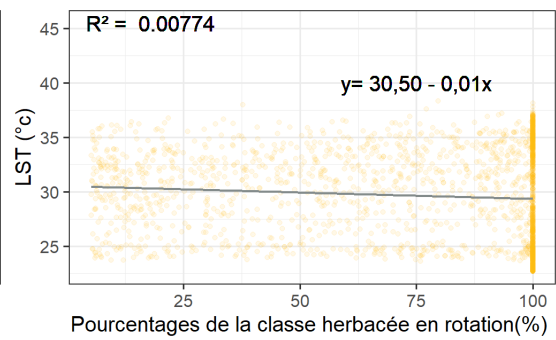
(c)



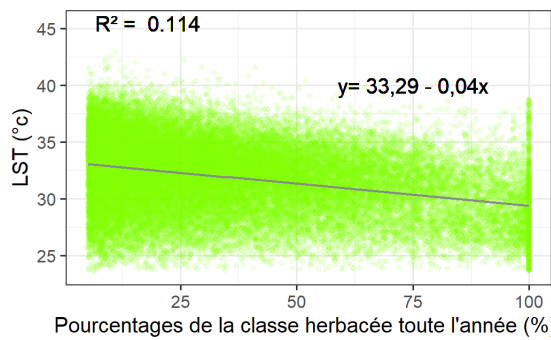
(d)



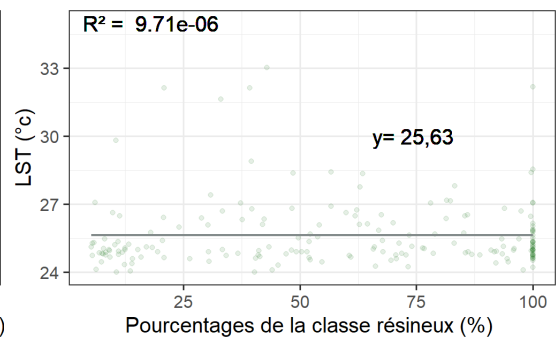
(e)



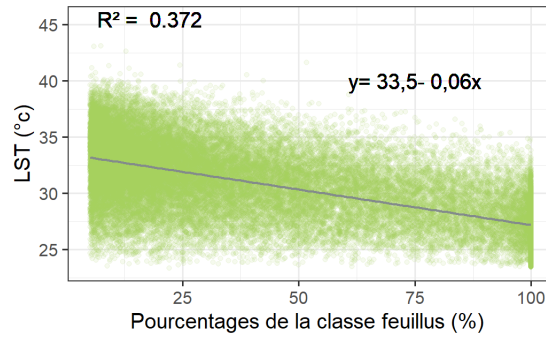
(f)



(g)



(h)



(i)

FIGURE 5.3 – Comparaison de la LST aux pourcentages des différentes occupations du sol à la date du 07 mai 2018.

L'analyse réalisée pour la date du 07 mai 2018 est très semblable à ce qui pourrait être effectué pour les 10 autres dates (voir Annexe 3). En effet, comme il est possible de le voir à la Figure 5.4, les coefficients de détermination sont très faibles pour les 11 dates et pour les 9 occupations du sol. Et ce, bien que les coefficients de détermination des classes : « Feuillus », « Constructions artificielles » et « Eaux de surface » témoignent de l'existence d'une relation linéaire entre ces classes et la LST.

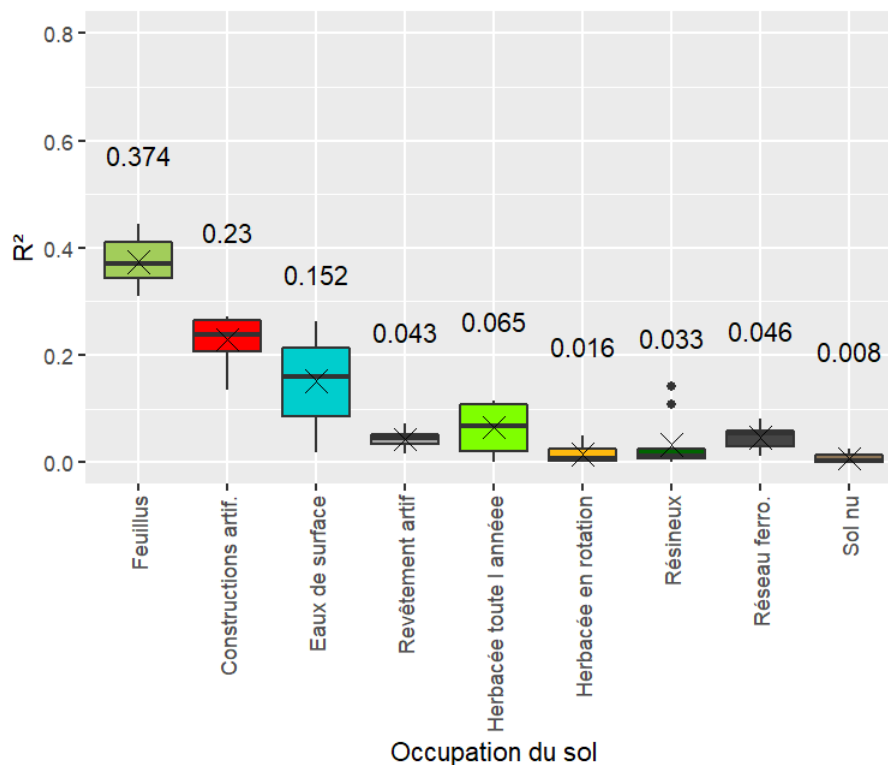


FIGURE 5.4 – Boîte à moustaches des coefficients de détermination pour les 11 dates entre la LST et l'occupation du sol. Les croix représentent les moyennes et leurs valeurs sont indiquées sur le graphe.

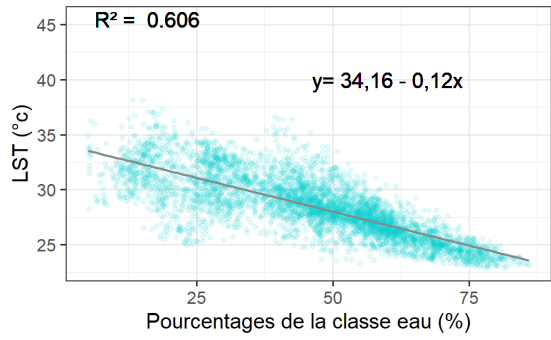
5.3.2 Influence de l'occupation du sol considérant la PSF sur la LST

Des régressions linéaires ont également été effectuées afin d'appréhender les changements dans les relations entre la LST et les occupations du sol lorsque la PSF est prise en considération. La Figure 5.5 montre les relations entre la LST à la date du 07 mai 2018 et le pourcentage de chaque classe en considérant la PSF. Les coefficients de détermination plus élevés signifient que les équations des droites de régression sont mieux capables de déterminer la distribution des points lorsque les proportions d'occupation du sol considérées sont celles tenant compte de la résolution effective du capteur TIRS. En effet, les 9 coefficients de détermination ont des valeurs oscillant entre 0,0128 et 0,673. Ces valeurs sont plus élevées que lorsque la PSF n'était pas considérée. La corrélation entre la LST et les classes : « Eaux de surface », « Constructions artificielles » et « Feuillus » est assez significative avec des valeurs respectives de 0,606 ; 0,673 et 0,611. Les 6 autres coefficients de détermination ne dépassent pas 0,285.

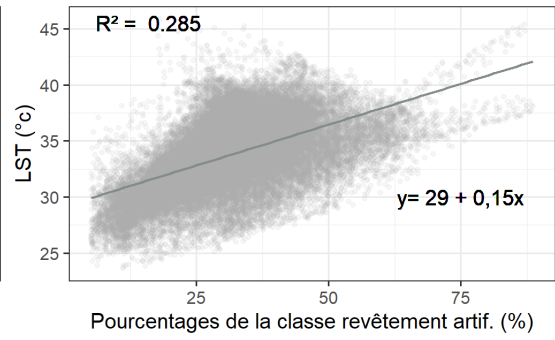
Selon ce modèle, une augmentation par pixel de 5 % à 100 % de la classe « Eaux de surface », « Herbacée en rotation », « Herbacé durant toute l'année » et « Feuillus » permettrait de diminuer la LST respectivement de 11,7 °C ; 8,2 °C ; 8,2 °C et 11,4 °C pour cette date. Tandis qu'une augmentation par pixel de 5 % à 100 % de la classe « Revêtement artificiel », « Constructions artificielles » et « Réseau ferroviaire » provoquerait, pour cette date, une augmentation de la LST de 13,8 °C ; 17 °C et 6,4 °C. Les coefficients de détermination proches de 0 entre la LST et les classes : « Sol nu » et « Résineux » indiquent l'absence de relation linéaire entre les occupations du sol et la LST. Une différence de LST de presque 29 °C peut donc apparaître lorsque l'occupation du sol considérée pour les pixels est entièrement « Feuillus » pour un pixel et entièrement « Constructions artificielles » pour l'autre. Cependant, aucun pixel n'est considéré comme entièrement de la classe « Eaux de surface », « Revêtement artificiel », « Constructions artificielles », « Réseau ferroviaire », « Sol nu » ou « Résineux » lorsque la PSF est prise en compte. C'est pourquoi, à la date du 07 mai 2018, l'amplitude maximale n'est que de 24,2 °C.

Il est possible de voir pour les graphiques (b), (f) et (g) de la Figure 5.5 que deux tendances se dessinent. Il serait donc intéressant d'étudier ces 3 classes afin de comprendre les raisons qui provoquent ces observations.

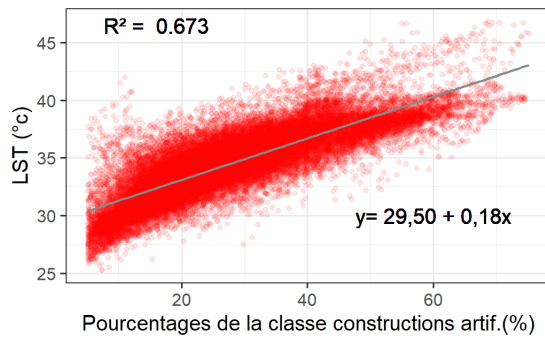
De plus, les nuages de points lorsque les proportions d'occupation du sol tiennent compte de la résolution effective sont plus resserrés que lorsque les proportions d'occupation du sol n'en tiennent pas compte. Cela est dû à l'emprise de la PSF du capteur TIRS qui équivaut à presque 0,4 km². En effet, sur la zone d'étude plus rares sont les occupations du sol présentes sur l'entièreté de l'emprise de la PSF, soit 0,4 km². Une même occupation du sol est par contre plus souvent présente sur l'emprise d'un pixel de 900 m².



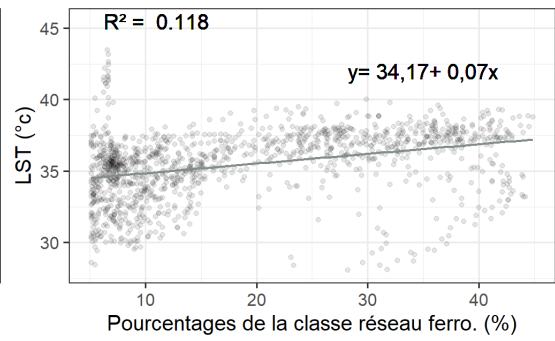
(a)



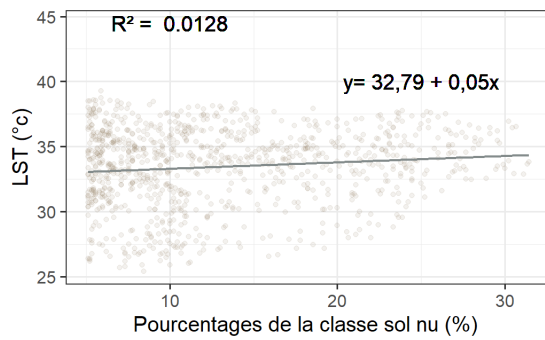
(b)



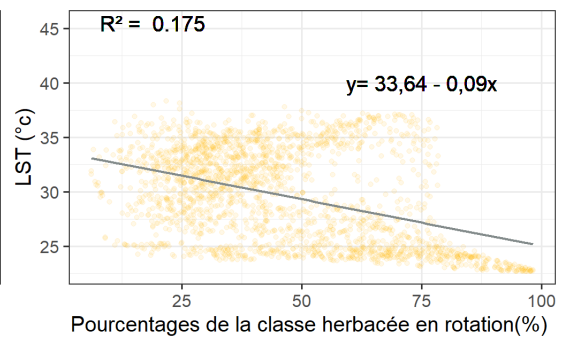
(c)



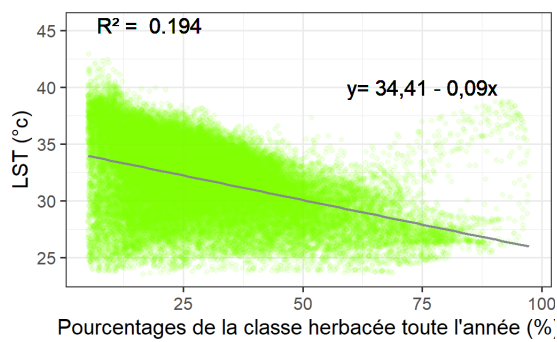
(d)



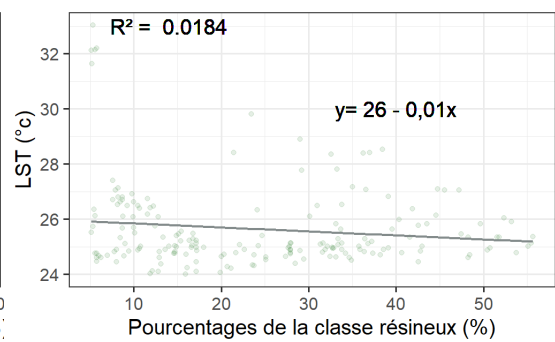
(e)



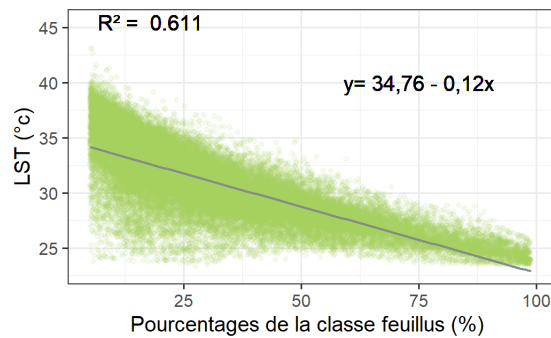
(f)



(g)



(h)



(i)

FIGURE 5.5 – Comparaison de la LST aux pourcentages des différentes occupations du sol en considérant la PSF à la date du 07 mai 2018.

Comme dans le cas sans PSF, l'analyse réalisée pour la date du 07 mai 2018 pourrait être effectuée pour les 10 autres dates (voir Annexe 3). Comme il est possible de le voir à la Figure 5.6, les coefficients de détermination moyens des classes : « Feuillus », « Constructions artificielles hors sol » et « Eaux de surface » sont assez conséquents. Pour la classe « Sol nu », même si la PSF est prise en considération, il n'existe pas de relation linéaire entre les variables.

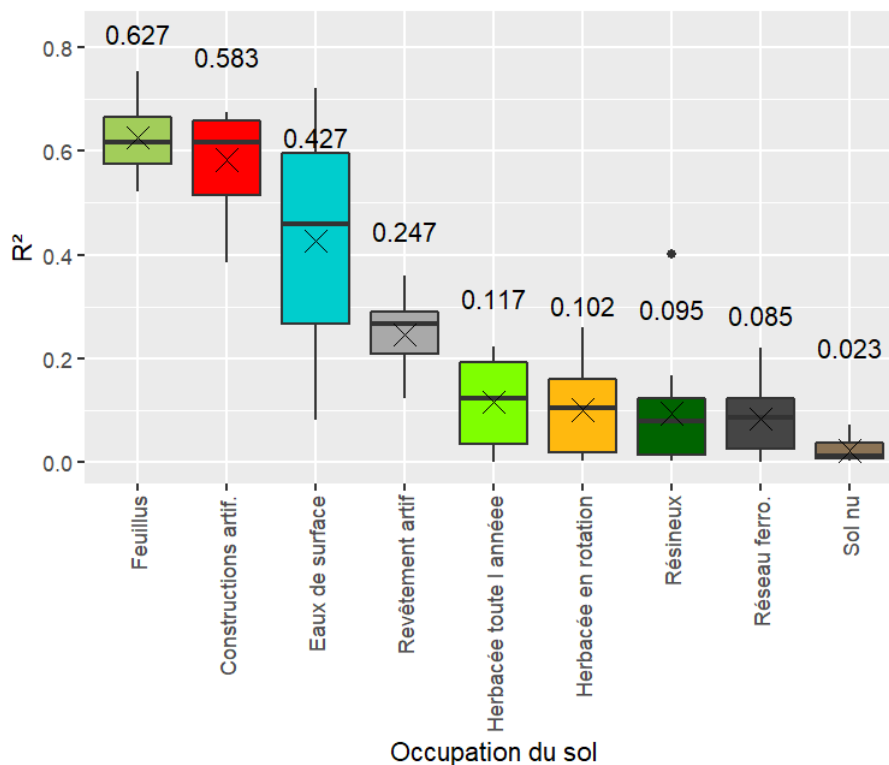


FIGURE 5.6 – Boîte à moustaches des coefficients de détermination pour les 11 dates entre la LST et l'occupation du sol considérant la PSF du capteur TIRS. Les croix représentent les moyennes et leurs valeurs sont indiquées sur le graphe.

5.3.3 Effet de la prise en considération de la PSF

Prendre en compte la PSF pour l'occupation du sol permet d'avoir une relation linéaire plus importante entre la PSF et chaque classe d'occupation du sol (voir Figure 5.7). Le coefficient de détermination entre la LST et chacune des 9 occupations du sol se voit augmenté lorsque la PSF est considérée. En effet, ce coefficient augmente pour chacune des occupations de 40 à 85 % et en moyenne pour toutes les classes d'environ 60 % lorsque la PSF est prise en compte. La prise en considération d'une telle fonction est donc bénéfique à la prédiction de la LST en connaissance de l'occupation du sol.

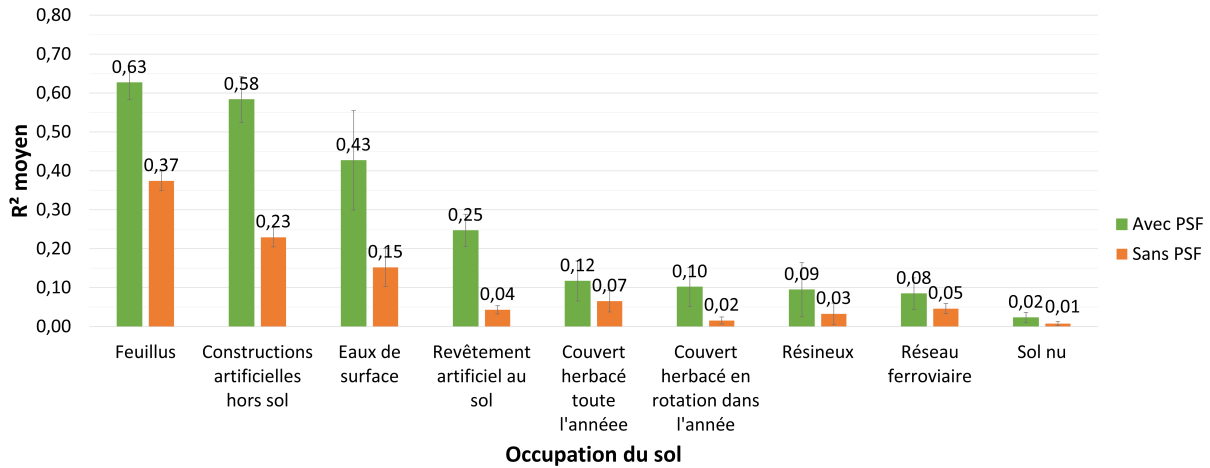


FIGURE 5.7 – Coefficients de détermination moyens entre la LST et les proportions de chaque occupation du sol avec (vert) et sans PSF (orange) et intervalles de confiance de 95%.

5.4 Modèles linéaires mixtes

De tels modèles ont été développés dans le but de comprendre dans quelle mesure un modèle prédictif peut expliquer localement la LST ainsi que les SHI sur base de l'occupation du sol et de la LST moyenne sur la zone. Un modèle se doit d'être précis de façon à permettre une prédiction. Celui-ci doit également être robuste de manière à être réutilisable dans d'autres situations.

La comparaison entre les deux modèles peut également permettre de mieux appréhender la qualité spatiale de l'instrument de télédétection TIRS.

5.4.1 Valeurs des modèles linéaires mixtes

Pour chaque date ainsi que pour l'occupation du sol avec et sans PSF, la résolution du système de 75 802 équations permet d'obtenir 9 valeurs de $LST_{Occupation\ du\ sol}$. Celles-ci ont été soustraites puis divisées par la LST moyenne de chacune des dates et sont représentées dans la partie gauche des Figures 5.8 et 5.9. Dans la partie droite de ces figures, les $\Delta LST_{Occupation\ du\ sol}$ obtenues, via une normalisation pour les 11 dates, sont présentées.

Les $\Delta LST_{Occupation\ du\ sol}$ pour le modèle sans prise en compte de la PSF équivalent en moyenne à 60 % de la valeur de $\Delta LST_{Occupation\ du\ sol}$ pour le modèle avec prise en compte de la PSF. Seuls $\Delta LST_{Couvert\ herbacé\ en\ rotation\ tout\ l'annee}$ et $\Delta LST_{Résineux}$ ont des valeurs plus négatives sans PSF. Cela signifie que les différentes occupations ont un impact plus fort sur la LST pour le modèle avec prise en compte de la PSF. La même fraction pour une occupation du sol provoque une augmentation ou une diminution de la LST plus considérable pour le modèle avec PSF.

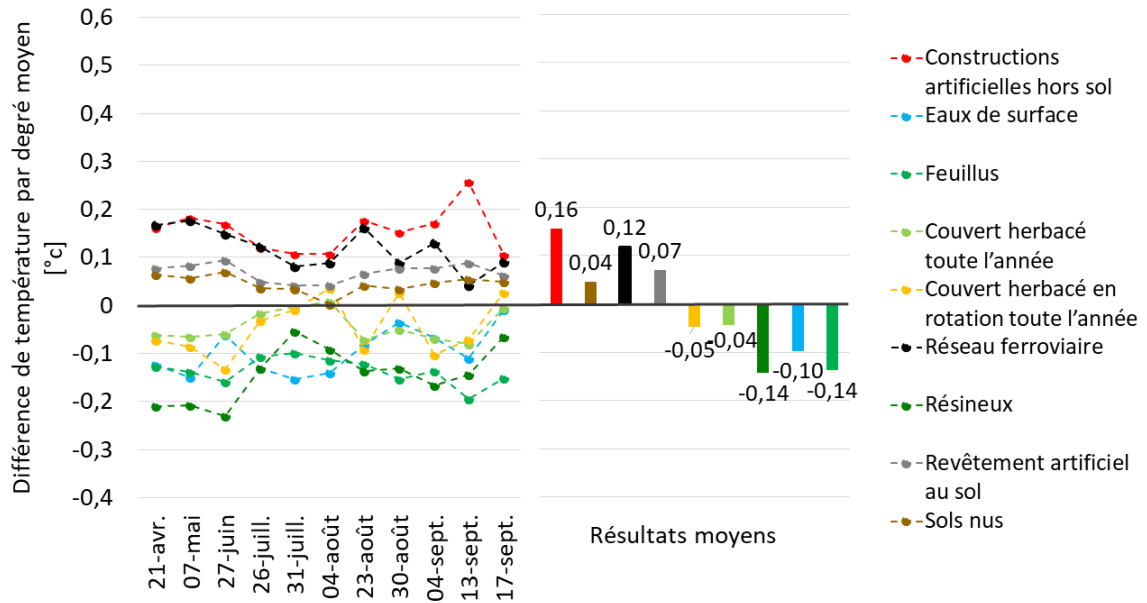


FIGURE 5.8 – Valeurs calibrées du modèle linéaire mixte sans PSF.

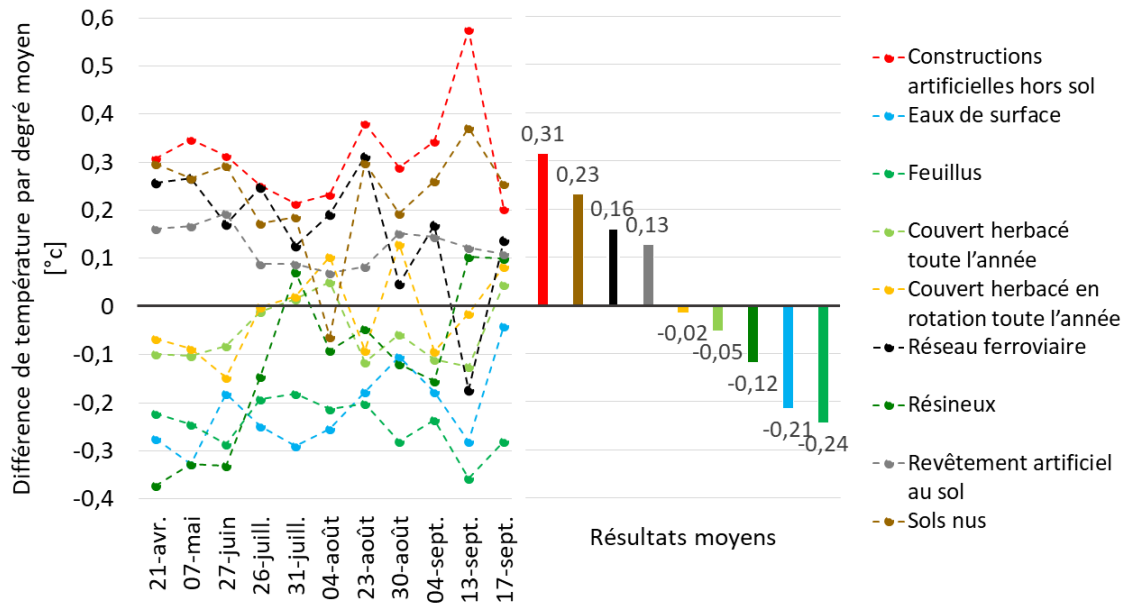


FIGURE 5.9 – Valeurs calibrées du modèle linéaire mixte avec PSF.

5.4.2 Application des modèles linéaires mixtes

La Figure 5.10 met en contraste l'estimation de la LST par les deux modèles à la date du 4 août 2018 par rapport à la LST calculée via LANDARTs à la même date. Sur la zone étudiée, selon LANDARTs, la LST fluctue entre 22,6 et 48 °C.

Comme il est possible de voir sur la gauche de la Figure, le résultat du modèle sans prise en compte de la PSF présente une amplitude de LST réduite avec des valeurs allant de 31,2 à 42,4 °C. De plus, les transitions entre LST sont assez abruptes et dépeignent assez fidèlement l'occupation du sol. Bien qu'il existe des ressemblances entre ce raster et la LST à la date étudiée, le modèle ne produit pas des valeurs de LST semblables aux valeurs de LST obtenues via LANDARTs.

Le raster de la LST résultant du modèle avec considération de la PSF met en avant que les valeurs de LST sont plus étendues; de 27,6 à 46,5 °C. Les variations de LST sont plus fidèles aux variations de LST obtenues via le satellite. Cependant, des différences entre les deux rasters sont visibles. Par exemple, les quartiers de bord de Meuse apparaissent plus chauds.

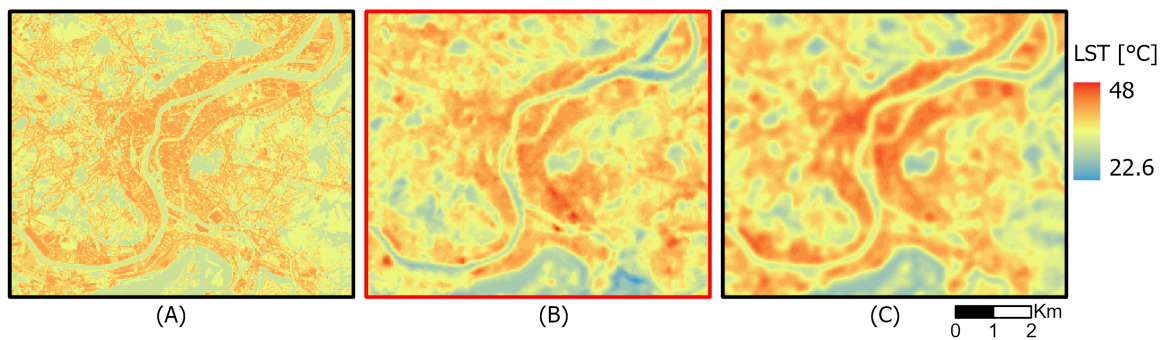


FIGURE 5.10 – Application des modèles linéaires mixtes à la date du 04 août 2018.
(A) LST estimée via le modèle sans PSF, (B) LST calculée via LANDARTs, (C) LST estimée via le modèle avec PSF.

Pour les 11 dates, les plages de LST sont plus étendues via le calcul réalisé par LANDARTs alors que le modèle sans PSF a les valeurs extrêmes les plus proches (voir Annexe 4). Le modèle sans prise en compte de la PSF présente des transitions très marquées de LST qui concordent avec l'occupation du sol. Les résultats obtenus via le modèle avec prise en compte de la PSF sont plus fidèles à l'allure de la LST calculée via LANDARTs.

5.4.3 Validation des modèles linéaires mixtes

La Figure 5.11 affiche le résultat moyen de la soustraction de la LST calculée via LANDARTs par la LST estimée via le modèle sans PSF. La Figure 5.12 affiche, quant à elle, le résultat moyen de la soustraction de la LST calculée via LANDARTs par la LST estimée via le modèle avec PSF.

En moyenne, pour le modèle sans PSF, la LST de la majorité des pixels situés au Sart-Tilman est surestimée. De même, la LST des pixels de la Meuse est généralement considérée comme plus chaude que ce que LANDARTs a calculé. En revanche, le modèle sous-estime la température dans le centre-ville.

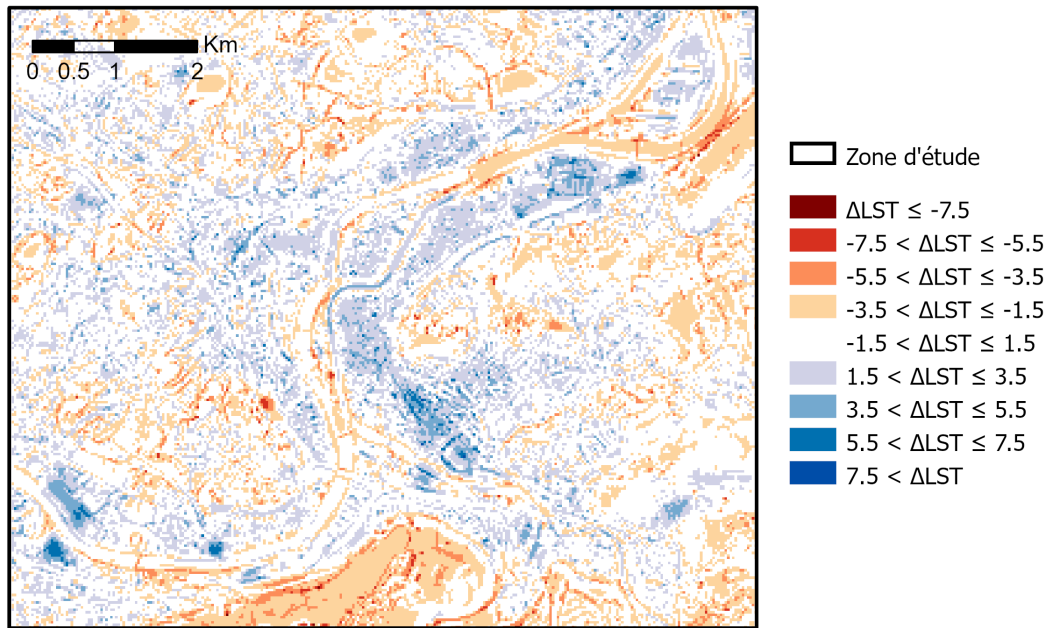


FIGURE 5.11 – Cartographie des erreurs générées par le modèle sans PSF.

$$\Delta LST = LST_{LANDARTs} - LST_{modele}.$$

Le modèle avec prise en compte de la PSF donne des estimations plus fidèles aux mesures de la LST réalisées via LANDARTs.

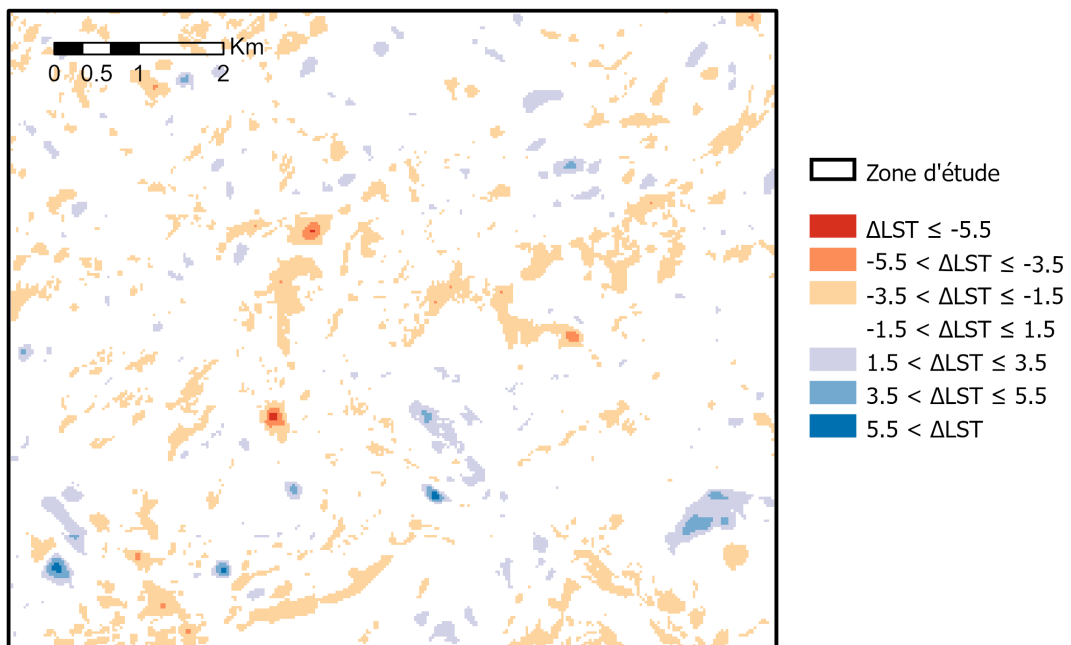


FIGURE 5.12 – Cartographie des erreurs générées par le modèle avec prise en compte de la PSF.

$$\Delta LST = LST_{LANDARTs} - LST_{modele}.$$

Les Figures 5.13 et 5.14 illustrent les répartitions des erreurs réalisées en moyenne par le modèle sans prise en compte de la PSF et par le modèle avec considération de la PSF.

En moyenne pour les 11 dates, 20,5 % des pixels estimés pour la zone d'étude, via le modèle sans prise en compte de la PSF, présentent une erreur inférieure à 0,5 °C. Une erreur supérieure à 2,5 °C est visible sur 18,8 % des pixels alors que 2 % des pixels renferment plus de 4,5 °C d'erreur. La dispersion des données s'étend de -8,5 à 10,5 °C en moyenne. L'écart type est de 1,9 °C. Cependant, aucun biais n'est visible.

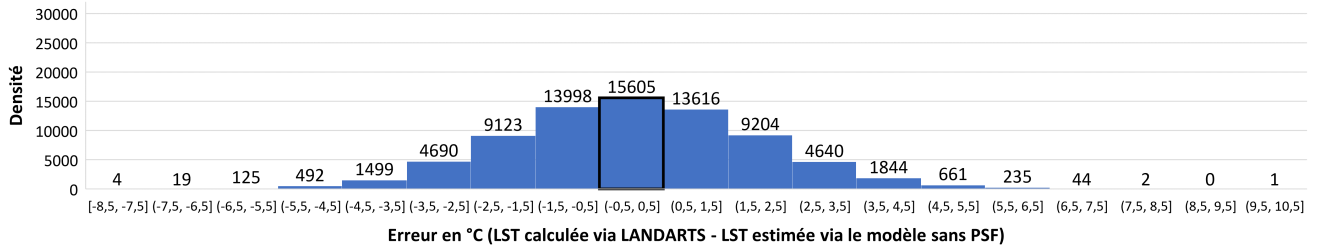


FIGURE 5.13 – Histogramme des erreurs moyennes d'estimation de la LST via le modèle sans PSF.

Pour le modèle avec PSF, plus d'un pixel sur trois a une erreur inférieure à 0,5 °C. En moyenne, 85 % des pixels présentent une erreur inférieure à 1,5 °C. Seuls 2 % des pixels incluent plus de 2,5 °C d'erreur. Les erreurs s'étendent de -6,5 à 6,5 °C. L'écart type est assez faible avec une valeur de 1 °C. Néanmoins, il existe un biais. Dans ce cas, la Figure met en évidence l'asymétrie à droite des données. Cela témoigne qu'en moyenne le modèle surestime la LST. La moyenne dévie de 0,4 °C.

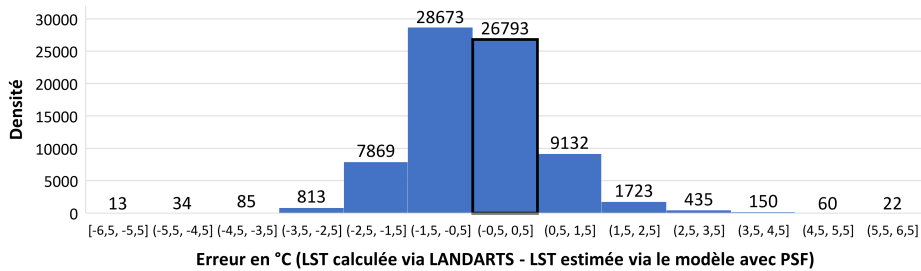


FIGURE 5.14 – Histogramme des erreurs moyennes d'estimation de la LST via le modèle avec PSF.

5.5 Discussion

Au regard des résultats exprimés à la section précédente, des interprétations peuvent être tirées tant sur la LST et les SHI pour la zone d'étude que sur la résolution spatiale du capteur TIRS.

5.5.1 Cartographie des SHI

La cartographie des SHI met en évidence que les îlots de chaleur de surface et les îlots de fraîcheur de surface sont tout deux présents dans des régions où les occupations du sol sont presque exclusivement sur de grandes régions des éléments renforçant la LST pour l'un et la diminuant pour l'autre. Deux explications peuvent être données.

Premièrement, l'environnement d'un pixel peut avoir une influence sur la LST de celui-ci. En effet, la LST est influencée par l'irradiation solaire mais également par la température de l'air et la conduction de la surface. Les pixels voisins peuvent donc provoquer une augmentation ou une diminution de la température de l'air. De même, si un pixel possède une surface fortement conductrice et présente une LST élevée, cela peut faire augmenter la LST des pixels voisins. L'occupation du sol voisine peut également introduire de l'ombre sur le pixel étudié à certaines périodes de la journée. Cela peut impacter l'irradiation solaire et donc la LST. Les pixels voisins peuvent, dès lors, jouer un effet de renforcement ou d'abaissement de la LST. Les SHI sont donc susceptibles de se former dans de vastes régions ayant des occupations renforçant la LST. À l'inverse, les îlots de fraîcheur de surface se produisent lorsque le sol est occupé, sur de grandes étendues, par des éléments induisant une diminution de la LST.

Ce fait peut également être expliqué par l'effet de la PSF. Pour ces données de télédétection, en réalité, le signal des 441 pixels voisins est pris en considération afin de donner la valeur du pixel central. La LST d'un pixel de 30 m sur 30 m reprend en fait, selon une certaine pondération, la LST de 0,4 km² environnant. Les îlots de chaleur et de fraîcheur de surface sont donc localisés principalement par le capteur TIRS dans des régions où les 0,4 km² environnant ont une occupation dans un cas renforçant la LST et dans l'autre la diminuant. Il existe donc certainement d'autres petits îlots de chaleur ou de fraîcheur de surface. Cependant, en raison de la PSF, la LST à ces endroits va tendre erronément vers la moyenne.

La PSF joue incontestablement un rôle dans cette observation. Cependant, ce travail ne permet pas de comprendre si l'environnement du pixel joue sur sa LST. La première explication ne peut donc pas être prouvée via ce mémoire. Afin d'étudier l'impact du voisinage des pixels, il serait opportun d'analyser la LST au regard de la disposition des occupations du sol avoisinantes.

5.5.2 Caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST

Concernant la caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST, les résultats prouvent la nécessité de prendre en considération la PSF. Le but étant de mieux appréhender les données obtenues via LANDARTs. De fait, les occupations du sol avec prise en considération de la PSF sont plus corrélées à la LST que les occupations du sol seules. Cela est dû à la manière dont le satellite acquiert les données.

Comme avancé par la littérature scientifique, la classe « Constructions artificielles » provoque une augmentation de la LST. En prenant la moyenne des 11 dates, le modèle estime qu'une augmentation de la présence de cette classe de 0 % à 100 % de la superficie d'un pixel produirait une augmentation de la LST de 9,3 °C. De même, comme évoqué dans l'état de l'art, les classes « Eaux de surface » et « Feuillus » provoquent une diminution de la température au sol. Une augmentation de 0 à 100 % de la présence de ces classes dans un pixel produirait une diminution

de la LST respectivement de 6,8 °C et 7,3 °C.

L'analyse des images de la ville de Liège démontre que la relation entre la LST et les classes d'occupation du sol « Résineux », « Réseau ferroviaire » et « Sol nu » est faible. Les coefficients de détermination de ces classes sont les plus faibles avec une valeur moyenne pour les 11 dates ne dépassant pas 0,1. Pour chacun des pixels, ces occupations du sol sont présentes au maximum sur une proportion de 56 % de la surface considérée. En revanche, les autres occupations du sol présentent un certain nombre de pixels avec une proportion de plus de 70 % de la surface considérée constituée par ces occupations. Dans le cas de ces trois occupations du sol, une agrégation avec pour certains pixels des occupations augmentant la LST et pour d'autres des occupations diminuant la LST semble compromettre l'obtention d'une relation forte entre la LST et ces occupations du sol. L'augmentation de la part de ces occupations du sol sur la surface considérée pour chacun des pixels produirait peut-être une relation plus forte entre ces occupations du sol et la LST.

Néanmoins, il est possible d'avancer au vu de la zone d'étude qu'une augmentation de la présence de ces classes de 0 à 100 % par pixel produirait une augmentation de la LST de 5,5 °C pour la classe « Réseau ferroviaire », une augmentation de 6,7 °C pour la classe « Sols nus » et une diminution de la LST de 3,9 °C pour la classe « Résineux ».

Bien que les occupations du sol « Revêtement artificiel », « Couvert herbacé en rotation dans l'année » et « Couvert herbacé toute l'année » possèdent des pixels presque entièrement recouverts de ces occupations du sol, leurs coefficients de détermination oscillent entre 0,1 et 0,25. Une explication plausible dans le cas de la classe « Revêtement artificiel » consiste en l'hétérogénéité des surfaces reprises dans cette classe. Cela va des réseaux routiers aux terrains de sports synthétiques en passant par les terrasses. Dans le cas des couverts herbacés durant toute l'année, à la suite de hausses de températures prolongées, le couvert peut mourir ou non en fonction du substrat. Cela peut donc provoquer des dissimilitudes dans cette occupation du sol. Finalement, la classe « Couvert herbacé en rotation dans l'année » présente également des caractéristiques diverses liées à la période de semence et de récolte ainsi qu'à la diversité d'espèces. Ces différentes périodes et espèces peuvent influencer de manière tout à fait distincte la LST.

Les faibles coefficients de détermination des classes « Couvert herbacé en rotation dans l'année » et « Couvert herbacé toute l'année » pourraient donc être expliqués par un indice de végétation tel que le NDVI. Pour comprendre cela, le NDVI à la date du 31 juillet 2020 a été calculé à partir des images de Sentinel 2. Le coefficient de détermination entre la LST et le NDVI à cette date est de 0,25. Une augmentation du NDVI de 0 à 1 produirait une diminution de la LST de 6 °C à cette date. Il existe donc un lien entre la LST et le NDVI. Au vu du faible coefficient de détermination, la déduction de la LST connaissant le NDVI n'est pas possible.

Lorsque seuls les pixels couverts à plus de 5 % par la classe « Couvert herbacé toute l'année » sont examinés le coefficient de détermination entre la LST et le NDVI passe à 0,34. Le coefficient de détermination entre la LST et le NDVI lorsqu'au moins 5 % du pixel est couvert par la classe « Couvert herbacé en rotation dans l'année » est de 0,66. Le NDVI est donc certainement un des éléments pouvant expliquer le faible coefficient de détermination pour ces deux classes. L'augmentation du NDVI de 0 à 1 produirait une diminution de 9,5 °C pour cette classe et une diminution de 6,5 °C pour la classe « Couvert herbacé toute l'année ».

Le lien est plus important entre le NDVI et la LST pour la classe « Couvert herbacé en rotation dans l'année ». La relation entre la LST et le NDVI pour la classe « Couvert herbacé en rotation dans l'année » à la date du 31 juillet 2020 est visible à l'œil nu à la Figure 5.15. Au vu des résultats sur la zone d'étude, une séparation de cette classe en fonction du NDVI est profitable afin de mieux appréhender la LST.

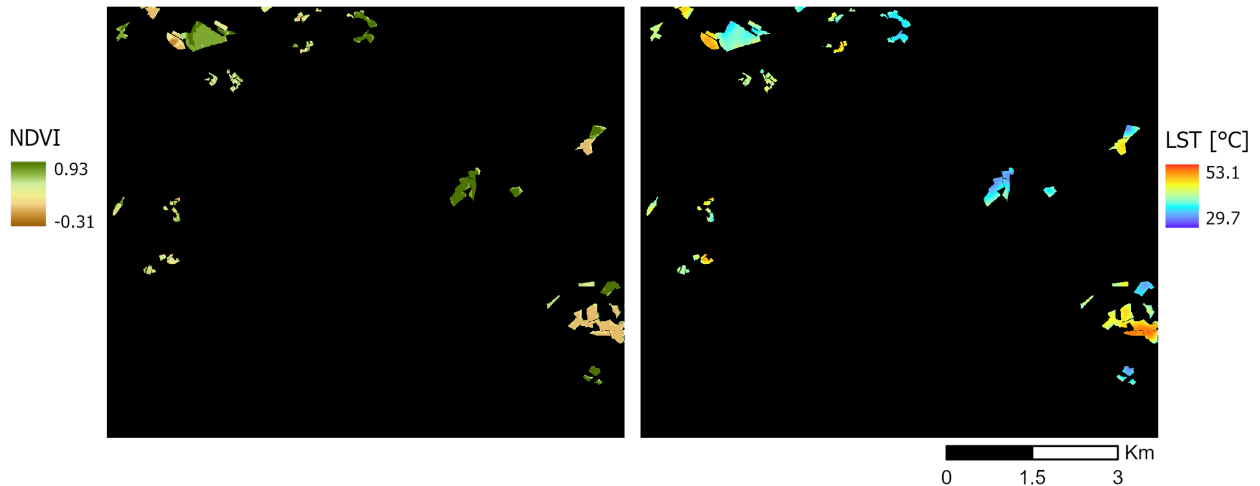


FIGURE 5.15 – Cartographie de la LST et du NDVI pour la classe « Couvert herbacé en rotation dans l'année » à la date du 31 juillet 2020.

Comme avancé, la hausse prolongée des températures peut induire des perturbations pour les plantations dans la classe « Couvert herbacé toute l'année ». L'impact de ces hausses de températures sur la végétation et donc la LST pourrait être étudié via un indice de stress hydrique, comme l'indice de stress hydrique (Moisture stress index, MSI) ou l'indice de l'eau par différence normalisée (Normalized Difference Water Index, NDWI). Ces indices pourraient être plus en relation avec les variations de LST pour cette classe par rapport au NDVI.

Il ressort du modèle que la modification de la présence de la classe « Couvert herbacé en rotation toute l'année » dans un pixel n'impacte pas considérablement la LST. En effet, le passage de la présence de cette classe dans un pixel de 0 % à 100 % produirait une diminution de la LST de moins de 0,5 °C. Cela s'explique par l'effet de diminution de la LST de cette classe lorsque le champ est végétalisé (NDVI élevé) et une augmentation de celle-ci lorsque le champ est récolté ou labouré (NDVI faible). Une modification de la présence de la classe « Revêtement artificiel » et « Couvert herbacé toute l'année » de 0 à 100 % par pixel produirait pour la première classe une augmentation de la LST de 3,8 °C alors qu'une diminution de la LST de 1,5 °C serait constatée pour la seconde classe.

5.5.3 Prédiction des SHI

Les erreurs réalisées par le modèle avec considération de la PSF ne sont pas liées à certaines occupations en particulier ni aux zones d'îlots de fraîcheur de surface. Bien que les pixels où la LST est sous-évaluée sont en partie en relation avec les SHI de Sclessin, Grivegnée et Droixhe. Le modèle avec prise en compte de la PSF produit des estimations plus en adéquation avec les images obtenues par le satellite. Cette affirmation ne signifie pas que le modèle prédit mieux la LST sur le territoire étudié. Cela atteste que la prise en compte de la PSF pour l'occupation du sol permet de produire des données qui collent mieux avec la manière dont la LST est acquise par le capteur TIRS. Néanmoins, un biais est produit via ce modèle. Une correction du modèle pourrait peut-être être faite afin de corriger ce biais. Une étude doit être réalisée afin

de comprendre si ce biais a été produit en raison d'une certaine occupation du sol mal calibrée ou d'une certaine date faussant le modèle. Ce biais peut également avoir été introduit en raison d'une région sur la zone d'étude ayant des caractéristiques différentes du reste de la zone d'étude.

Le modèle développé sans prise en compte de la PSF produit des erreurs lorsque l'occupation du sol est semblable sur de grandes étendues. En comparant la Figure 5.11 avec la Figure 5.2, les endroits référencés comme îlots de chaleur de surface et îlots de fraîcheur de surface, dans la Figure 5.2, sont mal estimés via le modèle sans PSF. Les régions qui présentent des SHI conséquents voient leur LST sous-estimée par le modèle. Alors que les régions jouissant d'îlots de fraîcheur de surface considérables ont leur LST surestimée par le modèle. Cela est certainement dû au fait que ce modèle ne considère pas l'occupation des pixels voisins contrairement au capteur TIRS.

Néanmoins, les erreurs observées entre ce modèle et les images LANDARTs ne correspondent peut-être pas à la réalité de terrain. Étant donné la relation forte entre l'occupation du sol et la LST lorsque la résolution effective est semblable, le modèle développé sans prise en compte de la PSF pourrait être une méthode de démixage spatial. Afin de comprendre dans quelle mesure ce modèle sans PSF est capable de prédire la LST locale, il serait intéressant de comparer cette méthode de démixage spatial à d'autres méthodes de démixage ainsi qu'à des relevés de LST sur le terrain sur la même zone à la même période.

CHAPITRE

6

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail trouve son sens dans le désir de plus en plus de villes de se doter d'un plan canopée afin de réduire l'intensité des ICU. La bonne réalisation de ces plans passe par une meilleure compréhension des ICU. Il est également important de comprendre la relation entre les ICU et l'occupation du sol. Pour ce faire, ce mémoire s'est focalisé sur la ville de Liège.

En conclusion, le capteur TIRS permet de localiser les SHI. Néanmoins, en raison de la résolution spatiale de ce capteur, la localisation de ces SHI est certainement approximative. En effet, dans les données obtenues par le capteur TIRS, l'effet de la PSF provoque que le signal du pixel observé n'est pas seulement déterminé par la signature thermique du champ du pixel mais également par celle des pixels voisins. Ce capteur a une PSF d'une largeur d'environ 10 pixels, ce qui mélange les signatures spectrales de l'extérieur du champ de vision avec celles du pixel d'intérêt. La LST obtenue via LANDARTs pour chaque pixel est donc en réalité le résultat des signatures spectrales du pixel étudié, mais également des 440 pixels voisins dans une proportion définie par la PSF. La PSF impose une limite à la qualité de l'information capturée par le capteur TIRS. Dès lors, il serait intéressant d'utiliser une méthode de démixage spatial afin de diminuer le mélange spatial. Cela permettrait d'éliminer le brouillage spatial du signal présent. Une telle opération permettrait de mieux comprendre la LST locale. Des études complémentaires doivent être réalisées afin de comprendre dans quelle mesure le modèle sans PSF permet de jouer ce rôle de démixage spatial. (FRANS & SCHOWENGERDT, 1997 ; WANG et al., 2018). L'augmentation de la précision de la LST serait particulièrement bénéfique pour l'étude des SHI et la localisation de ceux-ci au sein de la ville de Liège.

De manière à étudier les SHI par télédétection, il est impératif de s'intéresser à la façon dont les informations sont acquises par les satellites. Pour ce travail, la caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sur la LST passe par l'étude de la résolution spatiale du capteur TIRS. La donnée occupation du sol doit subir un traitement en vue de renfermer, au sein de chaque pixel, une information spatialement comparable à la donnée LST. De fait, il ressort une corrélation plus forte entre la LST et l'occupation du sol lorsque la résolution effective du capteur TIRS (PSF) est ajoutée aux données d'occupation du sol. Cette relation devrait par ailleurs être étudiée entre les données de LANDARTs ayant subi un démixage spatial et les données d'occupation du sol brutes.

Concernant l'impact des différentes occupations du sol sur la LST, l'étude montre que les classes « Feuillus » et « Eaux de surface » provoquent une forte diminution de la LST. En revanche, la classe « Constructions artificielles hors sol » augmente considérablement la LST. L'effet des classes « Réseau ferroviaire », « Sol nu », « Revêtement artificiel », « Couvert herbacé en rotation dans l'année », « Couvert herbacé toute l'année » et « Résineux » est moins évident sur cette zone d'étude. Cependant, il semblerait que les trois premiers ont un effet réchauffant et les trois derniers un effet refroidissant.

L'impact de ces occupations du sol sur la LST pourrait être obtenu si d'autres villes étaient étudiées. Pour cela, ces occupations du sol devraient être présentes sur des zones étendues. Il serait intéressant d'étudier des villes présentant des forêts de résineux, un réseau ferroviaire encore plus dense et de grandes étendues mises à nu. De plus, afin d'augmenter la compréhension entre la LST et les occupations du sol, il serait intéressant de regarder plus en détail les valeurs de certains indices tels que le NDVI et le MSI de chacune des classes et le lien avec la LST. Cela permettrait peut-être de réaliser des distinctions entre les classes afin de mieux comprendre les éléments qui permettent une diminution de la LST. Finalement, la PSF du capteur TIRS pourrait être appliquée sur les données de NDVI afin de mieux comprendre la relation entre la LST et le NDVI.

Le modèle linéaire mixte, avec prise en compte de la PSF pour l'occupation du sol, montre que la prédiction de la LST et donc des emplacements des SHI est possible via l'occupation du sol. En effet, ce modèle produit des données proches des données de LST obtenues via LANDARTs. Cependant, dans le but d'augmenter la précision du modèle, d'autres paramètres pourraient être ajoutés tels que l'altitude, l'exposition du sol, le vent, la disposition des occupations du sol entre elles et la hauteur des bâtiments. Une attention doit être apportée car le modèle doit certes être le plus précis possible mais il se doit également d'être robuste.

De plus, il serait intéressant d'utiliser ce modèle sur d'autres villes afin de comprendre si celui-ci est toujours aussi adapté. La prise en compte d'autres villes et d'autres dates dans la calibration du modèle permettrait également certainement de le rendre plus robuste. Il produirait, de ce fait, de meilleures prédictions pour d'autres zones d'étude.

Le modèle avec prise en compte de la PSF produit des prédictions proches des données obtenues via LANDARTs. Ce modèle permet d'affirmer que l'occupation du sol est une bonne variable pour prédire la LST. Cela permet de conclure que le premier modèle produit peut-être des valeurs de LST très proche de la réalité de terrain. Il serait dès lors opportun de comparer les valeurs obtenues par ce modèle avec des valeurs de LST estimées via une autre méthode de démixage spatial des données LANDARTs ou grâce à des relevés sur le terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCY, E. E. (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe : Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. en. Publication 2/2012. URL : <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-to-climate-change> (visité le 12/10/2021).
- (2015). *Vivre sous un climat changeant*. fr. Publication. URL : <https://www.eea.europa.eu/fr/publications/signaux-de-laee-2015-vivre> (visité le 23/05/2022).
- ALBERTI, M. (2008). *Advances in urban ecology : integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*. en. OCLC : ocn190796595. New York : Springer.
- AMINOU, D. M. A. (2002). “MSG’s SEVIRI Instrument”. en. In : p. 3.
- ANTOINE, R. et T. LOPEZ (juin 2020). “Télédétection dans l’infrarouge thermique”. fr. In : p. 48.
- APUR (déc. 2012). *Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier n°1*. fr. URL : <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/ilots-chaleur-urbains-paris-cahier-1> (visité le 18/10/2021).
- AZEVEDO, J. A., L. CHAPMAN et C. L. MULLER (fév. 2016). “Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK : A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations”. en. In : *Remote Sensing* 8.2. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 153. DOI : 10.3390/rs8020153. URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/2/153> (visité le 04/12/2021).
- BOUSBAINÉ, A. (fév. 2020). “Ville et agriculture face à l’émergence des systèmes agro-alimentaires innovants. Etudes de cas dans deux agglomérations wallonnes : Charleroi et Liège.” French. In : Publisher : ULiège - Université de Liège. URL : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/246026> (visité le 09/04/2022).
- BRUNO, R., P. BEVILACQUA et N. ARCURI (jan. 2021). “10 - Green roofs as passive system to moderate building cooling requirements and UHI effects : Assessments by means of experimental data”. en. In : *Eco-efficient Materials for Reducing Cooling Needs in Buildings and Construction*. Sous la dir. de F. PACHECO-TORGAL et al. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, p. 205-245. DOI : 10.1016/B978-0-12-820791-8.00010-9. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128207918000109> (visité le 28/11/2021).
- CANTAT, O. (juin 2004). “L’îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps”. In : *Norois*. DOI : 10.4000/norois.1373.

- CAO, X. et al. (juin 2010). “Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data”. en. In : *Landscape and Urban Planning* 96.4, p. 224-231. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2010.03.008. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920461000054X> (visité le 06/12/2021).
- CHEN, J., S. JIN et P. DU (juill. 2020). “Roles of horizontal and vertical tree canopy structure in mitigating daytime and nighttime urban heat island effects”. en. In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 89, p. 102060. DOI : 10.1016/j.jag.2020.102060. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243419308037> (visité le 06/12/2021).
- CHEN, X. et al. (juill. 2019). “Canopy transpiration and its cooling effect of three urban tree species in a subtropical city- Guangzhou, China”. en. In : *Urban Forestry & Urban Greening* 43, p. 126368. DOI : 10.1016/j.ufug.2019.126368. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866718307507> (visité le 21/11/2021).
- CHUN, B. et J. -. GULDMANN (mai 2014). “Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities”. en. In : *Landscape and Urban Planning* 125, p. 76-88. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2014.01.016. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204614000243> (visité le 07/04/2022).
- DUBREUIL, V. et al. (2011). “Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes”. fr. In : Publisher : Presses Universitaires de Rennes, p. 105. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00653080> (visité le 16/10/2021).
- EUROPÉENNE, A. spatiale (jan. 2011). *MetOp*. FR. Publisher : European Space Agency. URL : https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_FR/SEMNR6SXIG_0.html (visité le 09/06/2022).
- FABRIZI, R., S. BONAFONI et R. BIONDI (mai 2010). “Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome”. en. In : *Remote Sensing* 2.5. Number : 5 Publisher : Molecular Diversity Preservation International, p. 1400-1415. DOI : 10.3390/rs2051400. URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/2/5/1400> (visité le 16/10/2021).
- FOUNDA, D. et M. SANTAMOURIS (sept. 2017). “Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012)”. en. In : *Scientific Reports* 7.1. Bandiera_abtest : a Cc_license_type : cc_by Cg_type : Nature Research Journals Number : 1 Primary_atype : Research Publisher : Nature Publishing Group Subject_term : Climate change; Natural hazards Subject_term_id : climate-change; natural-hazards, p. 10973. DOI : 10.1038/s41598-017-11407-6. URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-017-11407-6> (visité le 20/11/2021).
- FRANS, E. P. et R. A. SCHOWENGERDT (oct. 1997). “Spatial-spectral unmixing using the sensor PSF”. In : *Imaging Spectrometry III*. T. 3118. SPIE, p. 241-249. DOI : 10.1117/12.283830. URL : <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3118/0000/Spatial-spectral-unmixing-using-the-sensor-PSF/10.1117/12.283830.full> (visité le 22/05/2022).
- GIEC (2021). “Climate Change 2021 : The Physical Science Basis”. en. In : p. 32.
- GILL, S. E. et al. (jan. 2013). “Modelling water stress to urban amenity grass in Manchester UK under climate change and its potential impacts in reducing urban cooling”. en. In : *Urban Forestry & Urban Greening* 12.3, p. 350-358. DOI : 10.1016/j.ufug.2013.03.005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866713000319> (visité le 21/11/2021).
- HAMBLIN, A. L. et al. (juin 2017). “Physiological thermal limits predict differential responses of bees to urban heat-island effects”. In : *Biology Letters* 13.6. Publisher : Royal Society, p. 20170125. DOI : 10.1098/rsbl.2017.0125. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsbl.2017.0125> (visité le 02/12/2021).
- HEAVISIDE, C., H. MACINTYRE et S. VARDOULAKIS (sept. 2017). “The Urban Heat Island : Implications for Health in a Changing Environment”. eng. In : *Current Environmental Health Reports* 4.3, p. 296-305. DOI : 10.1007/s40572-017-0150-3.

- HOEVEN, F. van der et A. WANDL (jan. 2015). “Amsterwarm : cartographier les implications de l’ilot de chaleur urbain d’Amsterdam sur l’utilisation des sols, la santé et l’efficacité énergétique”. en. In : *Building Services Engineering Research and Technology* 36.1. Publisher : SAGE Publications Ltd STM, p. 67-88. DOI : 10.1177/0143624414541451. URL : <https://doi.org/10.1177/0143624414541451> (visité le 26/11/2021).
- HOLBEN, B. N. (avr. 2007). “Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data”. In : *International Journal of Remote Sensing* 7.11. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/01431168608948945>, p. 1417-1434. DOI : 10.1080/01431168608948945. URL : <https://doi.org/10.1080/01431168608948945> (visité le 06/12/2021).
- HULLEY, M. E. (jan. 2012). “5 - The urban heat island effect : causes and potential solutions”. en. In : *Metropolitan Sustainability*. Sous la dir. de F. ZEMAN. Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, p. 79-98. DOI : 10.1533/9780857096463.1.79. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090461500059> (visité le 18/10/2021).
- HWANG, R.-L., T.-P. LIN et F.-Y. LIN (nov. 2020). “Evaluation and mapping of building overheating risk and air conditioning use due to the urban heat island effect”. en. In : *Journal of Building Engineering* 32, p. 101726. DOI : 10.1016/j.jobe.2020.101726. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710220333593> (visité le 28/11/2021).
- IRM (2022a). *Les vagues de chaleur à Uccle*. fr. URL : <https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/a-uccle/temperature-de-lair/indices-estivaux/vagues-de-chaleur/les-vagues-de-chaleur-a-uccle> (visité le 24/05/2022).
- (2022b). *Vague de chaleur*. fr. URL : <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/vague-de-chaleur> (visité le 24/05/2022).
- JIANG, H. et al. (mars 2020). “Space-variant point spread function measurement and interpolation at any depth based on single-pixel imaging”. EN. In : *Optics Express* 28.7. Publisher : Optica Publishing Group, p. 9244-9258. DOI : 10.1364/OE.386366. URL : <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-28-7-9244> (visité le 05/04/2022).
- JOCHNER, S. et al. (2013). “Using phenology to assess urban heat islands in tropical and temperate regions”. en. In : *International Journal of Climatology* 33.15. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.3651>, p. 3141-3151. DOI : 10.1002/joc.3651. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.3651> (visité le 01/12/2021).
- KERAMITSOGLU, I. et al. (nov. 2012). “Evaluation of satellite-derived products for the characterization of the urban thermal environment”. In : *Journal of Applied Remote Sensing* 6, p. 061704-061704. DOI : 10.1117/1.JRS.6.061704.
- KIERAT, J. et al. (août 2017). “The thermal environment of the nest affects body and cell size in the solitary red mason bee (*Osmia bicornis* L.)” eng. In : *Journal of Thermal Biology* 68.Pt A, p. 39-44. DOI : 10.1016/j.jtherbio.2016.11.008.
- KIM, S. W. et R. D. BROWN (sept. 2021). “Urban heat island (UHI) variations within a city boundary : A systematic literature review”. en. In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148, p. 111256. DOI : 10.1016/j.rser.2021.111256. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121005438> (visité le 20/11/2021).
- KLEEREKOPER, L., M. van ESCH et T. B. SALCEDO (juill. 2012). “How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect”. en. In : *Resources, Conservation and Recycling. Climate Proofing Cities* 64, p. 30-38. DOI : 10.1016/j.resconrec.2011.06.004. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001303> (visité le 21/11/2021).
- KLOK, L. et al. (juill. 2012). “The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics”. en. In : *Resources, Conservation and Recycling. Climate Proofing Cities* 64, p. 23-29. DOI : 10.1016/j.resconrec.2012.01.009. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912000110> (visité le 05/12/2021).

- KOTOPOULEAS, A. et al. (déc. 2021). “Experimental investigation of the impact of urban fabric on canyon albedo using a 1 :10 scaled physical model”. en. In : *Solar Energy* 230, p. 449-461. DOI : 10.1016/j.solener.2021.09.074. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21008318> (visité le 20/11/2021).
- LENNERT, M. et al. (août 2019). “Creating Wallonia’s new very high resolution land cover maps : combining grass gis obia and otb pixel)based resultats”. In : *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W14*, p. 151-157. DOI : 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-151-2019.
- LI, X.-X. et L. K. NORFORD (juin 2016). “Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore”. en. In : *Urban Climate* 16, p. 59-74. DOI : 10.1016/j.uclim.2015.12.002. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095515300390> (visité le 28/11/2021).
- LI, X. et al. (mai 2019). “Urban heat island impacts on building energy consumption : A review of approaches and findings”. en. In : *Energy* 174, p. 407-419. DOI : 10.1016/j.energy.2019.02.183. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219303895> (visité le 28/11/2021).
- LIANG, Z. et al. (nov. 2020). “Seasonal and Diurnal Variations in the Relationships between Urban Form and the Urban Heat Island Effect”. In : *Energies* 13, p. 5909. DOI : 10.3390/en13225909.
- LIÈGE, V. de (2022). *Plan Canopée - Liège*. fr. Dossier. URL : <https://canopee.liege.be> (visité le 01/05/2022).
- LILLEY, K. D. (jan. 2009). “Urban Morphology”. en. In : *International Encyclopedia of Human Geography*. Sous la dir. de R. KITCHIN et N. THRIFT. Oxford : Elsevier, p. 66-69. DOI : 10.1016/B978-008044910-4.01093-2. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080449104010932> (visité le 20/11/2021).
- LOPEZ-CABEZA, V. P. et al. (juin 2022). “Albedo influence on the microclimate and thermal comfort of courtyards under Mediterranean hot summer climate conditions”. en. In : *Sustainable Cities and Society* 81, p. 103872. DOI : 10.1016/j.scs.2022.103872. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722001998> (visité le 09/06/2022).
- LOWE, S. A. (jan. 2016). “An energy and mortality impact assessment of the urban heat island in the US”. en. In : *Environmental Impact Assessment Review* 56, p. 139-144. DOI : 10.1016/j.eiar.2015.10.004. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925515001043> (visité le 26/11/2021).
- MAURER, J. (déc. 2002). *Récupération de l'albédo de surface depuis l'espace*. URL : <http://www2.hawaii.edu/~jmaurer/albedo/> (visité le 09/06/2022).
- MÉRENNE-SCHOUMAKER, B. (sept. 2010). *Liège, Ville et Région, documents cartographiques (5è éd.)*
- MIRZAEI, P. A. (déc. 2015). “Recent challenges in modeling of urban heat island”. en. In : *Sustainable Cities and Society* 19, p. 200-206. DOI : 10.1016/j.scs.2015.04.001. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670715000414> (visité le 07/04/2022).
- MIRZAEI, P. A. et F. HAGHIGHAT (oct. 2010). “Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations”. en. In : *Building and Environment* 45.10, p. 2192-2201. DOI : 10.1016/j.buildenv.2010.04.001. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132310001083> (visité le 07/04/2022).
- ODLI, Z. S. M. et al. (2016). “Green Roof Technology- Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effect”. en. In : *MATEC Web of Conferences* 78. Publisher : EDP Sciences, p. 01100. DOI : 10.1051/mateconf/20167801100. URL : https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2016/41/mateconf_icongdm2016_01100/mateconf_icongdm2016_01100.html (visité le 28/11/2021).
- OKE, T. R. (1982). “The energetic basis of the urban heat island”. en. In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108.455. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.100>

- 2/qj.49710845502, p. 1-24. DOI : 10.1002/qj.49710845502. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49710845502> (visité le 20/11/2021).
- (1987). “Boundary layer climates”. en. In : *American Journal of Climate Change* Vol.3 No.1. DOI : 10.1002/qj.49711448412. (Visité le 21/11/2021).
- OLIVEIRA, V. (2016). *Urban Morphology*. en. The Urban Book Series. Cham : Springer International Publishing. DOI : 10.1007/978-3-319-32083-0. URL : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32083-0> (visité le 20/11/2021).
- PENG, S. et al. (2019). “Spatial-temporal pattern of, and driving forces for, urban heat island in China”. English. In : *Ecological indicators*. Publisher : Elsevier Ltd. URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.059> (visité le 20/11/2021).
- PERRIN, G. (sept. 2020). *Rafraîchissement urbain et confort d’été : Lutter contre les canicules*. fr. France : Dunod. URL : <https://www.dunod.com/sciences-techniques/rafraichissement-urbain-et-confort-d-ete-lutter-contre-canicules> (visité le 18/10/2021).
- PETTORELLI, N. et al. (sept. 2005). “Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change”. en. In : *Trends in Ecology & Evolution* 20.9, p. 503-510. DOI : 10.1016/j.tree.2005.05.011. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016953470500162X> (visité le 14/04/2022).
- RADOUX, J. et al. (juin 2016). “Sentinel-2’s Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection”. en. In : *Remote Sensing* 8.6. Number : 6 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 488. DOI : 10.3390/rs8060488. URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/488> (visité le 04/04/2022).
- RAKOTO, P. Y. et al. (sept. 2021). “Revisiting the cooling effects of urban greening : Planning implications of vegetation types and spatial configuration”. en. In : *Urban Forestry & Urban Greening* 64, p. 127266. DOI : 10.1016/j.ufug.2021.127266. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866721002934> (visité le 28/11/2021).
- RIZWAN, A. M., L. Y. C. DENNIS et C. LIU (2007). “A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island”. en. In : *Journal of Environmental Sciences* 20.1, p. 120-128. DOI : 10.1016/S1001-0742(08)60019-4. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074208600194> (visité le 18/10/2021).
- SHENG, L. et al. (jan. 2017). “Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China”. en. In : *Ecological Indicators* 72, p. 738-746. DOI : 10.1016/j.ecolind.2016.09.009. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X16305404> (visité le 12/10/2021).
- SPW et al. (2018). *Occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2018*. en. URL : <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/a0ad23a1-1845-4bd5-8c2f-0f62d3f1ec75.html> (visité le 09/04/2022).
- TARDY, B. et al. (sept. 2016). “A Software Tool for Atmospheric Correction and Surface Temperature Estimation of Landsat Infrared Thermal Data”. en. In : *Remote Sensing* 8.9. Number : 9 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 696. DOI : 10.3390/rs8090696. URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/9/696> (visité le 14/04/2022).
- THOME, K. (2021). *ASTER / Terra*. Publisher : 610 WebDev. URL : <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster> (visité le 06/12/2021).
- TOPARLAR, Y. et al. (oct. 2018). “Impact of urban microclimate on summertime building cooling demand : A parametric analysis for Antwerp, Belgium”. en. In : *Applied Energy* 228, p. 852-872. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.06.110. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918309814> (visité le 28/11/2021).
- TRAN, H. et al. (jan. 2006). “Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities”. en. In : *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8.1, p. 34-48. DOI : 10.1016/j.jag.2005.05.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243405000565> (visité le 06/12/2021).
- USGS (2022a). *EarthExplorer*. URL : <https://earthexplorer.usgs.gov/> (visité le 15/04/2022).

- USGS (2022b). *Landsat 8*. URL : <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (visité le 15/04/2022).
- (2021). *What are the band designations for the Landsat satellites?* URL : https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products (visité le 06/12/2021).
- VAN DER PERRE, V. d. P. et al. (2015). “La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières”. fr. In : p. 12.
- WALLONIE, S. public de (2022). *Occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2018*. en. URL : <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/a0ad23a1-1845-4bd5-8c2f-0f62d3f1ec75.html> (visité le 10/06/2022).
- WALTHER, G.-R. (juill. 2010). “Community and ecosystem responses to recent climate change”. In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 365.1549. Publisher : Royal Society, p. 2019-2024. DOI : 10.1098/rstb.2010.0021. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2010.0021> (visité le 02/12/2021).
- WANG, Q., W. SHI et P. M. ATKINSON (déc. 2018). “Enhancing spectral unmixing by considering the point spread function effect”. en. In : *Spatial Statistics*. One world, one health 28, p. 271-283. DOI : 10.1016/j.spasta.2018.03.003. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221167531730324X> (visité le 22/05/2022).
- WENG, Q. (juill. 2009). “Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies : Methods, applications, and trends”. en. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64.4, p. 335-344. DOI : 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092427160900046X> (visité le 05/12/2021).
- WENNY, B. N. et al. (fév. 2015). “Pre- and Post-Launch Spatial Quality of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor”. en. In : *Remote Sensing* 7.2. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 1962-1980. DOI : 10.3390/rs70201962. URL : ir (visité le 04/04/2022).
- WITTICH, K.-P. (nov. 1997). “Some simple relationships between land-surface emissivity, greenness and the plant cover fraction for use in satellite remote sensing”. en. In : *International Journal of Biometeorology* 41.2, p. 58-64. DOI : 10.1007/s004840050054. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s004840050054> (visité le 09/06/2022).
- ZHAO, J. et al. (déc. 2020). “Assessing the thermal contributions of urban land cover types”. en. In : *Landscape and Urban Planning* 204, p. 103927. DOI : 10.1016/j.landurbplan.2020.103927. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204619311971> (visité le 21/11/2021).
- ZHAO, L. et al. (juill. 2014). “Strong contributions of local background climate to urban heat islands”. en. In : *Nature* 511.7508. Bandiera_abtest : a Cg_type : Nature Research Journals Number : 7508 Primary_atype : Research Publisher : Nature Publishing Group Subject_term : Atmospheric science;Climate sciences Subject_term_id : atmospheric-science;climate-sciences, p. 216-219. DOI : 10.1038/nature13462. URL : <https://www.nature.com/articles/nature13462> (visité le 28/11/2021).
- ZHAO, Y. et al. (nov. 2021). “Buoyancy effects on the flows around flat and steep street canyons in simplified urban settings subject to a neutral approaching boundary layer : Wind tunnel PIV measurements”. en. In : *Science of The Total Environment* 797, p. 149067. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2021.149067. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721041395> (visité le 20/11/2021).
- ZUO, W. et al. (mai 2012). “A general model for effects of temperature on ectotherm ontogenetic growth and development”. In : *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences* 279.1734. Publisher : Royal Society, p. 1840-1846. DOI : 10.1098/rspb.2011.2000. URL : <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2011.2000> (visité le 02/12/2021).

Impact de la résolution spatiale du capteur TIRS dans l'étude des îlots de chaleur urbains

Effet de l'occupation du sol dans la ville de Liège

Margot DOMINIQUE

En raison du réchauffement climatique, il est fort probable que les vagues de chaleur soient amenées à augmenter en fréquence et en intensité. Or, celles-ci sont encore plus accablantes en ville à cause du phénomène microclimatique des îlots de chaleur urbains (ICU). C'est pourquoi différentes villes, dont celle de Liège, ont décidé de se munir d'un plan canopée. Ce dernier vise à augmenter le couvert arboré de manière à refroidir la ville lors des vagues de chaleur.

Ce mémoire a pour but principal l'amélioration de la compréhension des ICU afin d'aider les décideurs. Cela a été réalisé via le traitement des données obtenues à partir du capteur TIRS à bord du satellite Landsat 8. À cet effet, la résolution spatiale du capteur TIRS est appréhendée par la Point Spread Function (PSF). Celle-ci révèle que la valeur de la LST d'un pixel de 900 m² tient compte de la LST des pixels environnants sur une surface de 0,4 km². Plus spécifiquement, le premier objectif de ce travail est de comprendre l'impact des différentes occupations du sol sur la température à la surface du sol (LST) au sein de la ville de Liège. Le second objectif est d'analyser la précision de la prédiction d'un type d'ICU, appelé îlot de chaleur de surface (SHI), connaissant l'occupation du sol.

D'après les résultats, il est possible de localiser les SHI via le capteur TIRS bien que cette cartographie soit impactée par la résolution spatiale. Afin de comprendre la relation entre la LST et l'occupation du sol, ces deux données doivent avoir la même résolution spatiale. Pour ce faire, la PSF du capteur TIRS a été appliquée à l'occupation du sol. La prise en compte de la PSF du capteur TIRS dans la donnée d'occupation du sol montre une forte corrélation entre l'occupation du sol et la LST. La présence des occupations « Eaux de surface » et « Feuillus » réduit de manière conséquente la LST alors que la classe « Constructions artificielles hors sol » accroît la LST. Finalement, le modèle linéaire mixte calibré, avec l'occupation du sol considérant la PSF, produit des données de LST semblables à ce que le capteur TIRS révèle. L'occupation du sol semble donc pouvoir prédire la présence de SHI.