

Faculté des bioingénieurs

# Caractérisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain par télédétection spatiale

Le cas de six villes belges

Auteur : Thomas Gielen

Promoteurs : Pierre Defourny & Julien Radoux

Lecteurs : Patrick Bogaert & Quentin Ponette

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

## Remerciement

À travers ces quelques lignes, je tiens à remercier les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je veux remercier avant tout mes deux promoteurs, le Pr. Pierre Defourny, pour sa confiance et ses conseils, et le Dr. Julien Radoux pour sa disponibilité et ses recommandations.

Aussi, je souhaite remercier chaleureusement le Pr. Patrick Bogaert et le Pr. Quentin Ponette qui ont accepté d'être les relecteurs de ce mémoire.

Je tiens à remercier les membres du laboratoire de Géomatique de la faculté des bioingénieurs pour leur conseil. Merci particulièrement à Baptiste Delhez, Nicolas Deffense pour l'aide apportée sur les questions techniques de ce mémoire et l'utilisation des outils informatiques. Merci à Benjamin Goffart pour son aide et sa patience et à Audric Bos dont le mémoire et les conseils ont été les bases me permettant d'aborder mon propre mémoire.

Merci tout particulièrement à Sarah Depasse, ma mère, Nathalie Van Huffelen, et mon père, Pierre Gielen, pour leur œil avisé, les nombreux conseils et les corrections sans lesquels je ne serais pas arrivé au bout de ce mémoire.

Je tiens à remercier le Pr. Xavier Draye et Eric Gielen, dont les conseils m'ont amené jusqu'à cette dernière année de bioingénieur.

Je veux aussi remercier ma sœur, Claire, ma famille et mes amis, dont la présence tout au long de ces 6 ans d'étude a été un moteur poussant à me dépasser et un réconfort dans les périodes plus difficiles.

# Table des matières

<b>TABLE DES FIGURES</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS</b> .....	<b>8</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>1. ÉTAT DE L'ART</b> .....	<b>11</b>
1.1. LES ILOTS DE CHALEUR URBAINS.....	11
1.1.1. <i>Concept de base</i> .....	11
1.1.2. <i>Situation et considérations climatiques</i> .....	12
1.1.3. <i>L'impact des vagues de chaleur urbaines</i> .....	13
1.1.3.1. Impact sur l'environnement.....	13
1.1.3.2. Impact sur la santé publique .....	14
1.1.3.3. Impact sur l'économie et la consommation d'énergie .....	14
1.1.4. <i>Les vagues de chaleur urbaines en Belgique : historique et plan d'action</i> .....	15
1.2. FACTEURS .....	17
1.2.1. <i>Facteurs météorologiques</i> .....	18
1.2.1.1. Rayonnement.....	18
1.2.1.2. Température.....	18
1.2.1.3. Vitesse du vent .....	19
1.2.2. <i>Facteurs morphologiques</i> .....	20
1.2.2.1. Localisation et topographie .....	20
1.2.2.2. Occupation du sol.....	20
1.2.2.3. Structure du bâti .....	22
1.2.2.4. Présence de végétation.....	23
1.2.2.5. Présence de point d'eau.....	24
1.2.3. <i>Facteurs aggravants</i> .....	24
1.2.3.1. Densité de population .....	24
1.2.3.2. Production de chaleur additionnelle .....	25
1.3. MESURE DE L'INTENSITÉ DES ICU.....	25
1.3.1. <i>Mesure de la température de l'air</i> .....	25
1.3.2. <i>Relation entre la température de l'air et la LST</i> .....	26
1.3.3. <i>Mesure de la LST par télédétection</i> .....	26
1.3.3.1. Généralités.....	26
1.3.3.2. Concept de base.....	26
1.3.3.3. Capteurs et outils .....	30
<b>2. OBJECTIFS</b> .....	<b>32</b>

<b>3. ZONE D'ÉTUDE.....</b>	<b>33</b>
<b>4. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....</b>	<b>33</b>
4.1. STRUCTURE GÉNÉRALE DE LA MÉTHODOLOGIE .....	34
4.2. CHOIX DES DIFFÉRENTES DATES ET IMAGES .....	35
4.2.1. 26 juillet 2018 .....	36
4.2.2. 27 juin 2019 .....	36
4.2.3. 31 juillet 2020 .....	36
4.3. DESCRIPTIF DES DIFFÉRENTES VILLES .....	36
4.3.1. Antwerpen .....	36
4.3.2. Bruxelles .....	37
4.3.3. Charleroi.....	37
4.3.4. Leuven.....	38
4.3.5. Liège .....	38
4.3.6. Namur .....	39
4.4. DONNÉES.....	39
4.4.1. Série d'images Landsat 8 .....	39
4.4.2. LifeWatch – Ecotope.....	40
4.4.3. Copernicus Urban .....	40
4.5. LOGICIELS .....	42
4.5.1. Système d'information géographique .....	42
4.5.2. Langage et outils de programmation .....	42
4.5.2.1. LANDARTs .....	42
4.5.2.2. Python .....	42
4.5.2.3. Microsoft Excel .....	43
4.6. TRAITEMENT .....	43
4.6.1. Estimation de la LST.....	43
4.6.2. Définition de la température rurale .....	44
4.6.3. Cartographie des ICU.....	45
4.6.4. Mise en relation des différentes données .....	46
4.6.5. Occurrence des ICU .....	47
4.6.6. Analyse.....	48
<b>5. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>49</b>
5.1. RÉPARTITION SPATIALE DE LA LST .....	49
5.2. CARACTÉRISATION DES DIFFÉRENTES ANNÉES .....	51
5.3. INFLUENCE DE L'OCCUPATION DU SOL SUR LA LST .....	51
5.3.1. Tissu urbain .....	51
5.3.2. Installations industrielles, commerciales, publiques, militaires et privées .....	52

5.3.3.	<i>Autres valeurs d'ICU importante</i> .....	52
5.3.4.	<i>Forêt et végétation herbacée</i> .....	53
5.3.5.	<i>Eau</i> .....	53
5.3.6.	<i>Espace vert urbain</i> .....	53
5.3.7.	<i>Classes d'occupation du sol non discutées</i> .....	54
5.4.	ANALYSE PAR VILLES EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL .....	55
5.4.1.	<i>Antwerpen</i> .....	55
5.4.2.	<i>Bruxelles</i> .....	59
5.4.3.	<i>Charleroi</i> .....	62
5.4.4.	<i>Leuven</i> .....	65
5.4.5.	<i>Liège</i> .....	68
5.4.6.	<i>Namur</i> .....	71
5.5.	ANALYSE CROISÉE EN FONCTION DE LA LOCALISATION.....	74
5.6.	DISCUSSION.....	76
	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>78</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>80</b>
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>86</b>

## Table des figures

Figure 1 : Les différents types d'ICU (Fabrizi et al., 2010).....	12
Figure 2 : Prédiction concernant l'augmentation du nombre de jours considérés comme des vagues de chaleur en Europe. (EEA, 2020).....	13
Figure 3 : Augmentation de la température moyenne en été depuis 1840 (IRM, 2022) .....	15
Figure 4 : Augmentation de la température moyenne annuelle depuis 1840 (IRM, 2022) .....	15
Figure 5 : Augmentation du nombre de jours chauds depuis 1901 (IRM, 2022) .....	16
Figure 6 : Différence de température entre les jours de vague de chaleur (HW) et les jours sans vague de chaleur (Founda and Santamouris, 2017) .....	19
Figure 7 : Effet de la vitesse du vent sur l'intensité des ICU à Chambly, Marieville, et St. Basile-Le Grand (T-W Lee et al., 2014) .....	20
Figure 8 : Relations entre la LST et les types d'occupation du sol : bâti (A), sol nu (B), végétation basse (C), végétation haute(D), plans d'eau (E) (Adulkongkaew et al., 2020).....	21
Figure 9 : Phénomène de piège des radiations (Choi et al., 2018) .....	22
Figure 10 : Principe du facteur de vue du ciel (SVF) (Choi et al., 2018).....	23
Figure 11 : Représentation de la rugosité et de la porosité du milieu urbain (Choi et al., 2018) .....	23
Figure 12 : Transmittance de l'atmosphère standard en fonction de la longueur d'onde (Antoine & Lopez, 2020).....	27
Figure 13 : Localisation de la zone d'étude. ....	33
Figure 14 : Démarche générale de l'étude .....	35
Figure 15 : Comment définir une ville ? (Dijkstra & Poelman, s. d.) .....	42
Figure 16 : Produit brut issu de LANDARTs pour l'année 2020 avec l'estimation pour (a) la scène 198/24 et (b) la scène 198/25 .....	44
Figure 17 : Définition de la zone rurale sur base de l'artificialisation. ....	45
Figure 18 : Valeur des ICU (Turb -Trur) sur la zone d'étude (2020). ....	46
Figure 19 : Valeur moyenne des ICU par polygone à Bruxelles (2020). ....	47
Figure 20 : LST pour l'année 2020.....	49
Figure 21 : Occurrence et répartition de la population pour la ville d'Antwerpen .....	57
Figure 22 : Occurrence et répartition de la population pour la ville d'Antwerpen (Centre-ville).....	58
Figure 23 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Bruxelles.....	61
Figure 24 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Charleroi.....	64
Figure 25 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Leuven.....	67
Figure 26 : Occurrence et répartition de la population impactée pour la ville de Liège .....	70
Figure 28 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Namur.....	73

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Effet des caractéristiques urbaines sur la balance énergétique (IUAC, 2004).....	18
Tableau 2 : Facteurs clés de la compréhension des ilots de chaleur urbains (EEA, 2012).....	18
Tableau 3 : Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat 8 (Landsat 8   U.S. Geological Survey, s. d.).....	40
Tableau 4 : Statistiques de la LST chaque année pour chaque ville.....	50
Tableau 5 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Antwerpen, d'habitant pour les classes de tissus urbains. ....	55
Tableau 6 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Bruxelles, d'habitant pour les classes de tissus urbains. ....	59
Tableau 7 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Charleroi, d'habitant pour les classes de tissus urbains ....	62
Tableau 8: Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Leuven, d'habitant pour les classes de tissus urbains ....	65
Tableau 9: Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Liège, d'habitant pour les classes de tissus urbains ....	68
Tableau 10 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Namur, d'habitant pour les classes de tissus urbains. ....	71
Tableau 11 : Surface en fonction des catégories d'ICU.....	74
Tableau 12 : Pourcentage de la population en fonction des classes d'occupation. ....	75
Tableau 13 : Population impactée par les différentes catégories d'ICU en nombre d'habitant et ramener sur le nombre total de la ville .....	75

## Liste des abréviations

BLHI	Boundary Layer Heat Island (Ilot de chaleur de la couche limite)
CLHI	Canopy Layer Heat Island (Ilot de chaleur de la couche de canopée)
EEA	European Environment Agency (Agence environnementale européenne)
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Intergovernmental Panel on Climate Change ou IPCC en anglais)
ICU	Ilot de Chaleur Urbain (Urban Heat Island ou UHI en anglais)
LANDARTs	Landsat Automatic Retrieval of Surface Temperatures
LST	Land Surface Temperature (Température de surface)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (L'indice de végétation de différence normalisée)
SHI	Surface Heat Island (Ilot de chaleur de surface)
SIG	Système d'Information Géographique
SVF	Sky View Factor (Facteur de vue du ciel)
TIRS	Thermal Infrared Sensor (Capteur infrarouge thermique)

## Introduction

La situation climatique, d'un point de vue global, inquiète et soulève de nombreuses questions quant à la manière d'endiguer ses effets. Selon le rapport de 2021 du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'activité humaine est un moteur des perturbations climatiques actuelles. Un effet bien connu de ces perturbations est le réchauffement global observé. Selon le GIEC, ce réchauffement pourrait pour la fin du siècle dans le meilleur des cas atteindre entre 1°C et 1,8°C de plus qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle contre 3,3°C à 5,7°C pour le pire cas envisagé. Ce réchauffement pourrait avoir comme conséquence majeure d'augmenter la fréquence de phénomènes climatiques extrêmes comme les ouragans, les pluies diluviennes, les sécheresses ou les vagues de chaleur. (IPCC, 2021)

En Europe, selon les scénarii, le nombre de jours de vague de chaleur pourrait augmenter drastiquement jusqu'à la fin du siècle. L'intensité de ses vagues de chaleur est évaluée à la hausse. Ces vagues de chaleur ont une série d'impact sur l'environnement, notre économie et la santé humaine difficile à négliger : perte de biodiversité, consommation accrue d'énergie nécessaire au refroidissement, augmentation du taux de mortalité particulièrement pour les personnes âgées et les enfants.

L'impact en Belgique de ces vagues de chaleur est déjà perceptible. À Uccle, la température moyenne en été ne fait qu'augmenter ainsi que le nombre de jours avec des maximas supérieurs à 25°C. Ces jours chauds ont un impact d'autant plus important sur les villes. En effet, le phénomène d'ilots de chaleur urbain est un phénomène consistant en l'augmentation de la température du milieu urbain en comparaison au milieu rural. Les raisons de ces différences de température sont diverses : structure de la ville favorisant le piège des rayons solaires, matériaux de construction absorbant la chaleur ou absence de végétation et d'eau, etc. Il y a de nombreux facteurs influençant la formation d'ilots de chaleur urbain. Un des facteurs les plus importants est la température. Ainsi, l'écart entre le milieu urbain et rural augmente d'autant plus lors des vagues de chaleur. C'est de ce cas précis que traitera ce travail et de la quantification de ces impacts via la télédétection.

Premièrement, un état des connaissances scientifiques sur le sujet est réalisé. Celui-ci a pour but de rendre compte d'abord de la nature des ilots de chaleur urbain, leurs impacts et enjeux, et de la situation actuelle de certaines villes belges par rapport à ce phénomène. Les facteurs influençant les ilots de chaleur urbain sont ensuite développés. Enfin, la mesure de l'intensité du phénomène est étudiée à travers la mesure de la température de l'air, sa relation avec la

température du sol et les concepts de base, capteurs et outils permettant de mesurer cette température du sol.

Les objectifs sont abordés en second temps sur base des connaissances scientifiques et permettent de développer les questions qui guideront la recherche et le développement de ce mémoire.

Troisièmement, la zone de l'étude est définie.

Le développement de la méthodologie, les données, les outils, les programmes et les traitements réalisés sur ces données sont explicités au point « Matériels et Méthodes ».

Le point suivant aura pour but de mettre en avant les résultats obtenus et de présenter une première analyse et discussion les concernant.

Le dernier point conclut ce travail avec une synthèse de la démarche et de ces résultats, les réponses aux questions de recherches, les pistes d'amélioration quant au travail réalisé ainsi que les perspectives pour le sujet présenté tout le long du mémoire.

# 1. État de l'art

L'objectif de cette section est de réaliser un état de l'art des connaissances scientifiques concernant les îlots de chaleur urbains (ICU). La connaissance de ce phénomène passe entre autres par la compréhension, la mesure et la modélisation des enjeux actuels liés au climat et à la croissance urbaine notamment en Belgique. Cette section abordera la définition du phénomène d'ICU, les facteurs influençant ce phénomène et les méthodes permettant de mesurer l'intensité de cet effet.

## 1.1. Les îlots de chaleur urbains

### 1.1.1. Concept de base

Dans son rapport de mars 2012 (EEA, 2012), l'Agence Européenne de l'Environnement, ou European Environment Agency (EEA), décrit le phénomène d'îlots de chaleur urbains comme une augmentation de température de l'air en ville par rapport aux alentours ruraux. Ce principe permet dès lors de déterminer une unité de mesure commune aux ICU. Celle-ci s'exprime sous la forme de l'équation suivante :

$$ICU = T_{urb} - T_{rur}$$

avec :

$T_{urb}$  , la température de l'air en milieu urbain ;

$T_{rur}$  , la température de l'air en milieu rural.

Il convient d'abord de décrire le phénomène. Dans un article, Fabrizi et al. (2010) décrit trois types d'ICU : Canopy Layer Heat Island (CLHI) ; Boundary Layer Heat Island (BLHI); Surface Heat Island (SHI). Ces différents types dépendent de la couche qu'ils concernent c'est-à-dire la surface pour les SHI et l'atmosphère urbaine pour les CLHI et les BLHI. Ces différents types d'ICU sont représentés à la Figure 1

Le phénomène d'ICU a longtemps été étudié grâce à des stations au sol, outils précis et fiables mais dont la représentativité spatiale est limitée. L'arrivée de la télédétection a permis une étude plus représentative sur de larges surfaces. Fabrizi et al. (2010) confirment cette affirmation dans leur travail en étudiant la ville de Rome à l'aide de ces deux méthodes. À l'aide de la télédétection, 634 scènes ont été analysées mettant en évidence les CLHI durant le jour et la nuit. L'effet est d'autant plus important que l'étude du phénomène durant la nuit montre l'impact sur le long terme des CLHI. En effet, les valeurs de températures observées atteignent

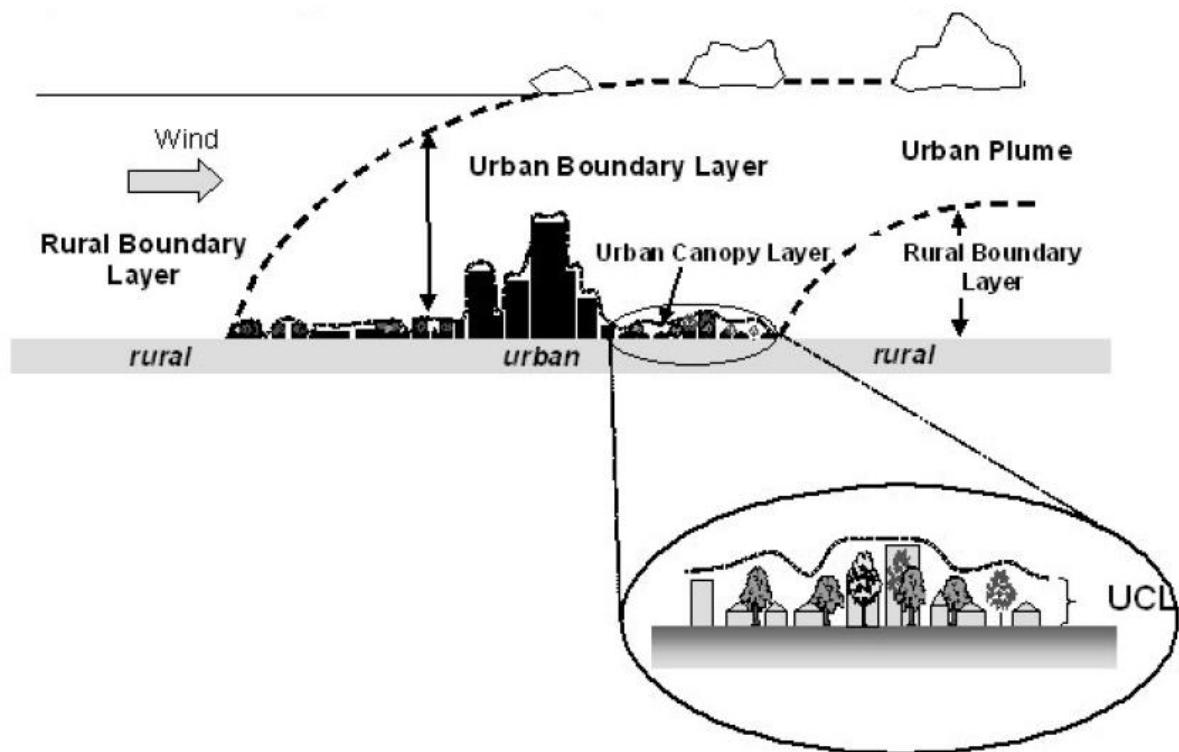


Figure 1 : Les différents types d'ICU (Fabrizi et al., 2010)

entre 2 et 3°C jusqu'à 4h du matin. Les CLHI sont les ICU dont les effets sur le confort humain sont les plus négatifs. Dès lors, le fait que l'impact des ICU soit ressenti en journée mais aussi durant la nuit témoigne de l'importance de la compréhension du phénomène.

### 1.1.2. Situation et considérations climatiques

Afin de situer le contexte global de rédaction de ce travail et avant de rentrer dans les détails, un état des lieux de la situation climatique est présenté ci-dessous, basé sur le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : le rapport de 2021 traitant des éléments scientifiques du changement climatique. L'état du système climatique peut se résumer comme suit : d'abord, il est indéniable que l'influence humaine réchauffe les océans, l'atmosphère et les terres. Aussi, l'activité humaine est une cause importante de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES). L'augmentation de la température de surface, ou land surface temperature (LST) à l'échelle globale, l'augmentation des précipitations sur les terres, la fonte des glaciers et la réduction de la mer de glace en Arctique, l'élévation de la température des océans, de leur niveau et les changements de la biosphère terrestre sont des éléments observés, mesurés et corrélés à l'activité humaine et à son influence depuis maintenant des décennies. Cet impact est d'autant plus important ces 20 dernières années, l'occurrence d'événements climatiques extrêmes comme des sécheresses, précipitations importantes ou cyclones tropicaux augmente et touchent l'ensemble du globe (IPCC, 2021).

### 1.1.3. L'impact des vagues de chaleur urbaines

Dans le cadre de ce travail, l'intérêt se portera sur les vagues de chaleur et notamment en milieu urbain dont le nombre ne diminue pas. Ceci est particulièrement visible sur la Figure 2, issue du rapport de 2020 de l'EEA (EEA., 2020).

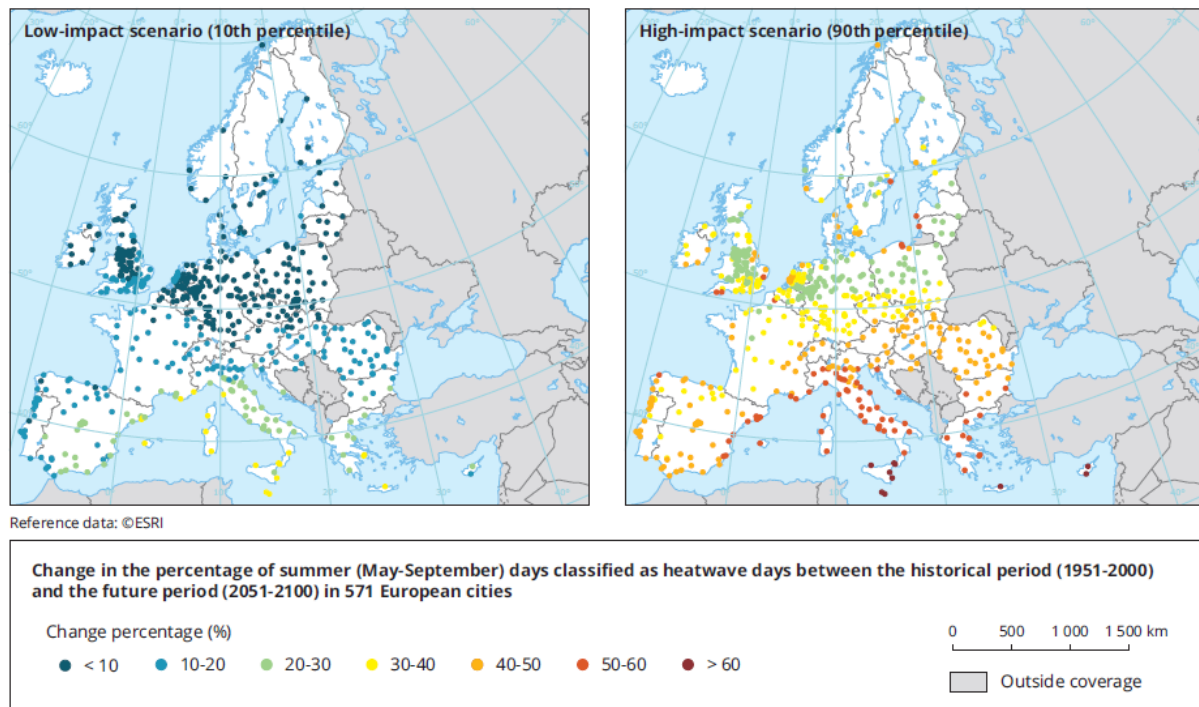


Figure 2 : Prédiction concernant l'augmentation du nombre de jours considérés comme des vagues de chaleur en Europe. (EEA, 2020)

#### 1.1.3.1. Impact sur l'environnement

Les vagues de chaleur ont de nombreux impacts, parmi lesquels la menace vis-à-vis de la faune et de la flore.

En effet, en Europe, l'augmentation des fortes chaleurs et des sécheresses impacte la physiologie et le métabolisme des plantes et de facto leur croissance et reproduction avec deux possibilités pour ces espèces si des actions ne sont pas mises en place : l'adaptation ou l'extinction (Abeli et al., 2014).

Le constat pour la faune n'est pas positif. Certaines espèces comme les abeilles ont une sensibilité à la chaleur assez élevée. Dès lors, l'augmentation du nombre et de l'intensité des vagues de chaleur et du phénomène d'ICU est une menace directe pour ces espèces dont les taux de mortalité peuvent augmenter drastiquement lors d'augmentations de la température (Hamblin et al., 2017). Une autre étude de ce type fait état de l'impact des vagues de chaleur sur la reproduction des mésanges charbonnières. Le résultat qui en découle est que sur une

période d'étude de 6 ans, les oisillons sont de plus petite taille et connaissent une mortalité accrue lorsqu'ils font face à un nombre élevé de jours chauds. Cependant, les populations les plus affectées ne sont pas celles des milieux urbains mais celles des milieux forestiers. Il est suggéré que la disponibilité en nourriture et un début d'adaptation comme une taille plus petite et des couvées réduites sont favorisés dans les populations des milieux urbains face aux effets des vagues de chaleur (Pipoly et al., 2022).

#### *1.1.3.2. Impact sur la santé publique*

L'augmentation des vagues de chaleur urbaines a un impact important sur la santé publique. Selon l'EEA, sans adaptation, le nombre de décès dus à des vagues de chaleur pourrait augmenter jusqu'à 2700 décès supplémentaires par an en Europe pour un total entre 30 000 et 50 000 en 2050 avec un réchauffement global respectif de 1,5°C ou 2°C (EEA., 2020).

Les populations à risque sont diverses et dépendent de l'âge, du milieu social et des conditions de vie. Les personnes âgées et jeunes enfants, par exemple, ont de moins bonnes capacités de thermorégulation et supportent moins bien les vagues de chaleur. Entre 2004 et 2018, aux États-Unis, 39% des décès dus à de fortes chaleurs étaient des personnes ayant 65 ans ou plus. Cependant, cette catégorie de la population, bien que plus vulnérable, n'est pas la plus exposée au phénomène (Hsu et al., 2021).

Cependant, il est à noter qu'en milieu urbain, même si cet effet est plus limité, les ICU peuvent être considérés comme ayant un impact positif sur la santé en diminuant le nombre de décès dus au froid (Heaviside et al., 2017).

#### *1.1.3.3. Impact sur l'économie et la consommation d'énergie*

Dans leur article, Estrada et al. (2017) mettent en évidence le fait que les changements climatiques et spécifiquement les îlots de chaleur peuvent avoir un impact économique important dans les villes selon les plans de gestion. Cet impact économique est dû à la consommation d'énergie nécessaire pour refroidir les milieux urbains. Cette étude est basée sur différents scénarii d'augmentation des émissions de GES et sur différentes politiques de gestion des ICU, certaines étant plus coûteuses et efficaces que d'autres. La quantification de l'impact économique des ICU est un levier essentiel dans les négociations politiques d'autant plus que la consommation d'énergie pour le refroidissement est responsable elle-même d'émission de GES créant un cercle vicieux de consommation et émissions de plus en plus importantes.

#### 1.1.4. Les vagues de chaleur urbaines en Belgique : historique et plan d'action

La Belgique est le troisième pays le plus dense d'Europe en ne tenant pas compte des micro-États, après Malte, les Pays-Bas (index mundi, s. d.). Cette densification a pour conséquence une artificialisation importante notamment au nord du sillon Sambre et Meuse. Aussi, le réchauffement climatique impacte nettement le pays comme le témoignent les relevés de la station de Uccle, la station de référence dans le suivi de l'évolution du climat belge (Figure 3 et Figure 4).

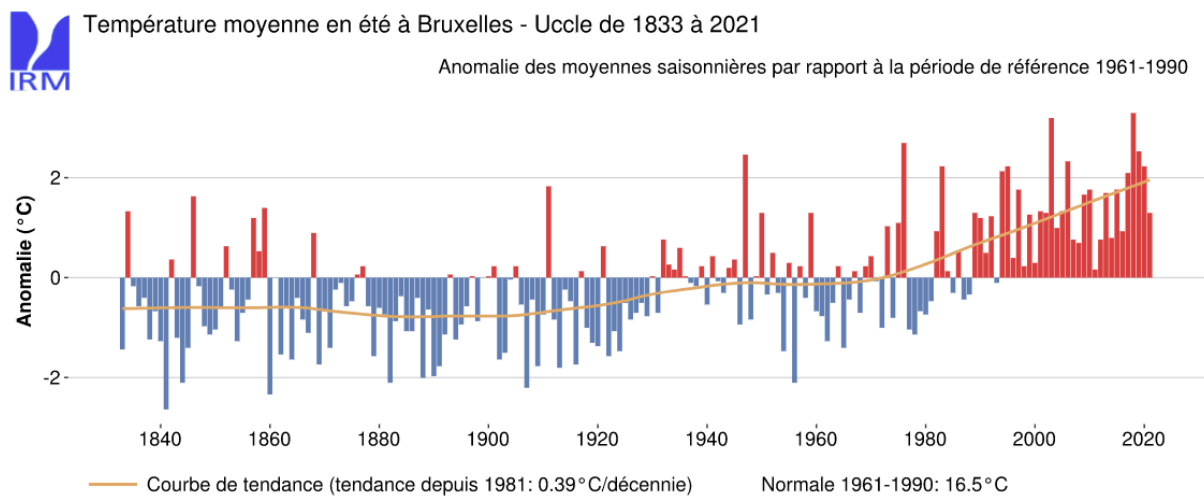


Figure 3 : Augmentation de la température moyenne en été depuis 1840 (IRM, 2022)

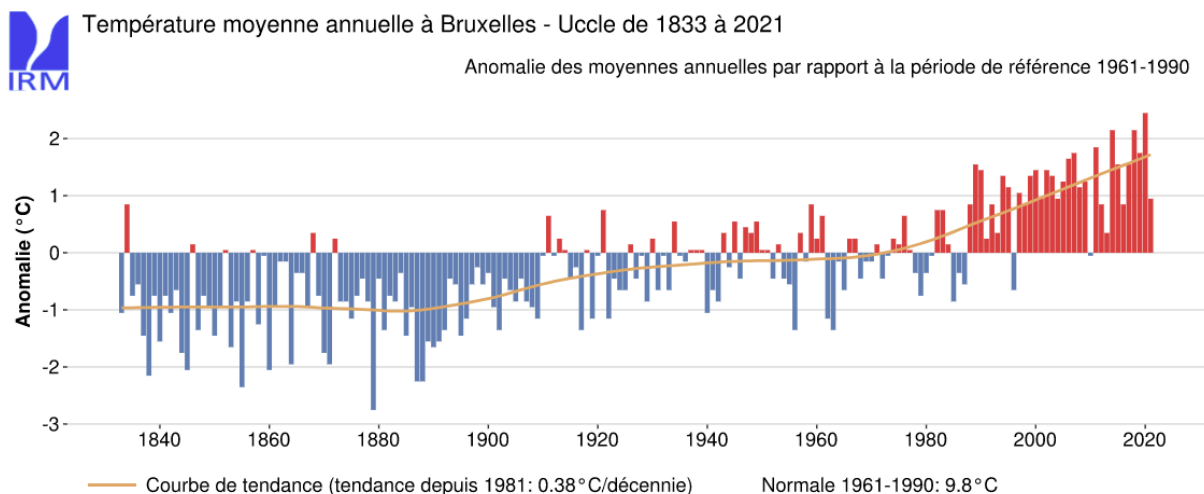


Figure 4 : Augmentation de la température moyenne annuelle depuis 1840 (IRM, 2022)

À cette augmentation se joint une augmentation du nombre de jours de forte chaleur comme le montre la Figure 5 (IRM, s. d.).



Nombre annuel de jours avec un maximum supérieur ou égal à 25°C à Uccle de 1901 à 2021

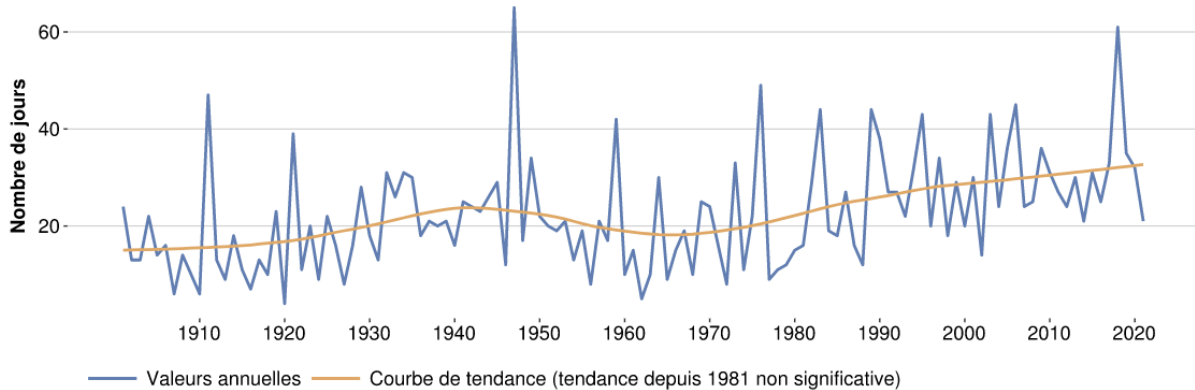


Figure 5 : Augmentation du nombre de jours chauds depuis 1901 (IRM, 2022)

Le phénomène d'îlots de chaleur étant associé aux milieux urbains, la Belgique ne devrait pas être épargnée. Celle-ci devrait donc être un terrain d'étude favorable.

Certaines villes ont déjà pris des actions pour contrer cet effet.

La ville d'Antwerpen, par exemple, a mis en place un système de prime climatique. À travers ce système, la ville rémunère certaines actions privées telles que la végétalisation des toits et la réutilisation de l'eau de pluie (*Antwerpen.be*, s. d.).

La ville de Liège quant à elle, se dote d'un plan canopée avec pour but de planter, d'ici 2030, 24.000 arbres afin de rendre la ville plus verte à l'horizon 2050. À travers ce programme, la ville de Liège a entre autres réalisé un diagnostic des avantages d'un tel plan et les difficultés de sa mise en œuvre. Ces dernières sont notamment la faible disponibilité d'espaces verts dans les lieux déjà sensibles aux vagues de chaleur. Ce programme vise donc à préserver et à étendre la canopée de la ville de Liège en mettant, entre autres, les citoyens à contribution grâce à une sensibilisation, des campagnes de parrainage ou d'information et de recensement via des outils tels qu'une application dédiée (*Plan Canopée — Liège*, s. d.).

La ville de Bruxelles s'est, elle aussi, dotée d'un plan canopée mettant en évidence, tout comme la ville de Liège, la conservation et le développement de son patrimoine arboré actuel en favorisant la mobilisation citoyenne. Ces différents éléments nécessitent un inventaire complet du patrimoine arboré, un monitoring de l'état phytosanitaire des arbres, une diversification des espèces en réponse aux changements climatiques, une sensibilisation auprès du public et la promotion des initiatives privées de plantation d'arbres (*Bruxelles*, s. d.).

## 1.2. Facteurs

Les facteurs déterminant l'intensité des ICU sont nombreux et de différentes natures. Ceux-ci seront présentés dans la section qui suit mais avant il est nécessaire d'aborder un concept : la balance énergétique.

Le bilan énergétique est un concept clé dans la compréhension de la formation des ICU. Inter University Accelerator Center décrit l'équation de balance énergétique (*IUAC Teaching Resources*, s. d.).

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS$$

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow = K^* + L^*$$

avec :

$Q^*$  : Rayonnement net ;

$QF$  : Chaleur ajoutée par l'activité humaine ;

$QH$  : Flux radiatif turbulent sensible ;

$QE$  : Flux radiatif turbulent latent ;

$QS$  : Energie stockée ou prélevée depuis le substrat ;

$K^*$  : Flux radiatif net à onde de courte fréquence ;

$L^*$  : Flux radiatif net à onde de longue fréquence ;

$\downarrow$  : Rayonnement absorbé par une surface ;

$\uparrow$  : Rayonnement émis par une surface.

Chaque terme est dépendant de caractéristiques de la ville en question et aura des effets différents que l'on peut retrouver dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.****Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Tableau 1 : Effet des caractéristiques urbaines sur la balance énergétique (IUAC, 2004)

Energy Balance term	Urban features	Urban effect
Increased $K^*$	Canyon geometry	Increased surface area and multiple reflection
Increased $L_{\downarrow sky}$	Air pollution	Greater absorption and re-emission
Decreased $L^*$	Canyon geometry	Reduced sky view factor
$Q_F$	Buildings & traffic	Direct addition of heat
Increased $\Delta Q_S$	Construction materials	Increased thermal admittance
Decreased $Q_E$	Construction materials	Increased water-proofing
Decreased $(Q_H+Q_E)$	Canyon geometry	Reduced wind speed

Ce tableau montre que les causes des ICU sont diverses.

EEA. (2012) classe ces différents facteurs influençant l'intensité des ICU comme ceci : les facteurs météorologiques, morphologiques et humains. Ces facteurs sont listés dans le Tableau 2 et détaillés dans la section qui suit.

Tableau 2 : Facteurs clés de la compréhension des îlots de chaleur urbains (EEA, 2012)

<b>Meteorological factors</b>	<b>Morphological factors</b>	<b>Human factors aggravating heat impacts</b>
Radiation Temperature Wind speed	Geographical location and topography Vegetation and water areas High building mass Presence of impervious cover Structure that hinders ventilation	Urbanisation with a high share of built-up land and impervious areas Population density Little shadowing Insufficient building insulation Additional heat production due to production processes, transport, heating etc.

### 1.2.1. Facteurs météorologiques

Le climat est un facteur dont l'impact sur la formation des ICU a largement été démontré dans la littérature. Dépendant de la position sur le globe ou de la saisonnalité du climat, les ICU auront, ou non, plus tendance à se former et leur intensité va varier en fonction de différents éléments.

#### 1.2.1.1. Rayonnement

Le rayonnement est considéré comme un facteur majeur dans l'augmentation de la température de l'air en journée. En fonction de l'albédo et d'autres facteurs dépendant de la structure du bâti, Choi et al. (2018) montrent que l'incidence du rayonnement solaire est fortement corrélée à la durée des fortes chaleurs en milieu urbain.

#### 1.2.1.2. Température

Tout comme pour le rayonnement, de nombreuses études mettent en évidence la forte corrélation entre la température et l'intensité des îlots de chaleurs. Founda & Santamouris

(2017) ont quantifié cette corrélation durant les vagues de chaleur qui ont fortement touché Athènes en 2012. Leur étude présente l'impact des vagues de chaleur sur l'intensité du phénomène d'îlots de chaleur urbaine. Comme le présente la Figure 6, la différence de température mesurée entre le milieu urbain et la côte atteint entre 3,9°C et 5,7°C pour les périodes sans vague de chaleur et une différence de température de 7,5°C et 8,2°C pour les périodes de vagues de chaleur.

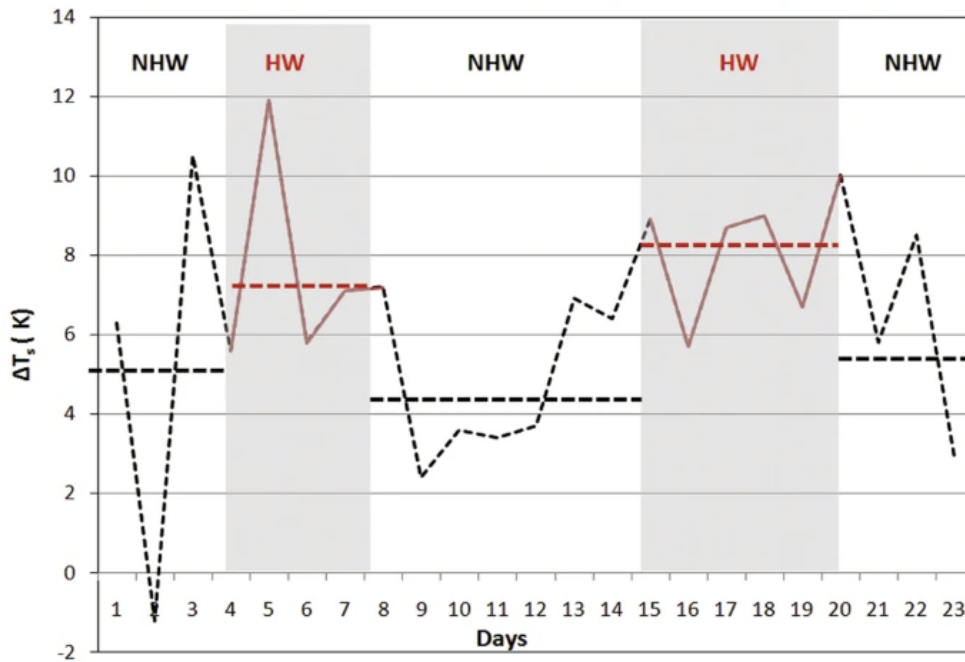


Figure 6 : Différence de température entre les jours de vague de chaleur (HW) et les jours sans vague de chaleur (Founda and Santamouris, 2017)

### 1.2.1.3. Vitesse du vent

En se basant sur les données d'une étude précédente (Oke, s. d.), Lee et al. (2014) ont démontré grâce à un calcul de la balance énergétique de plusieurs villes du Canada que la vitesse du vent était un facteur ayant un impact négatif sur les ICU. En effet, la Figure 7 montre le fait que lorsque la vitesse du vent diminue, l'intensité des ICU augmente de jusqu'à 2°C à 3°C selon les villes.

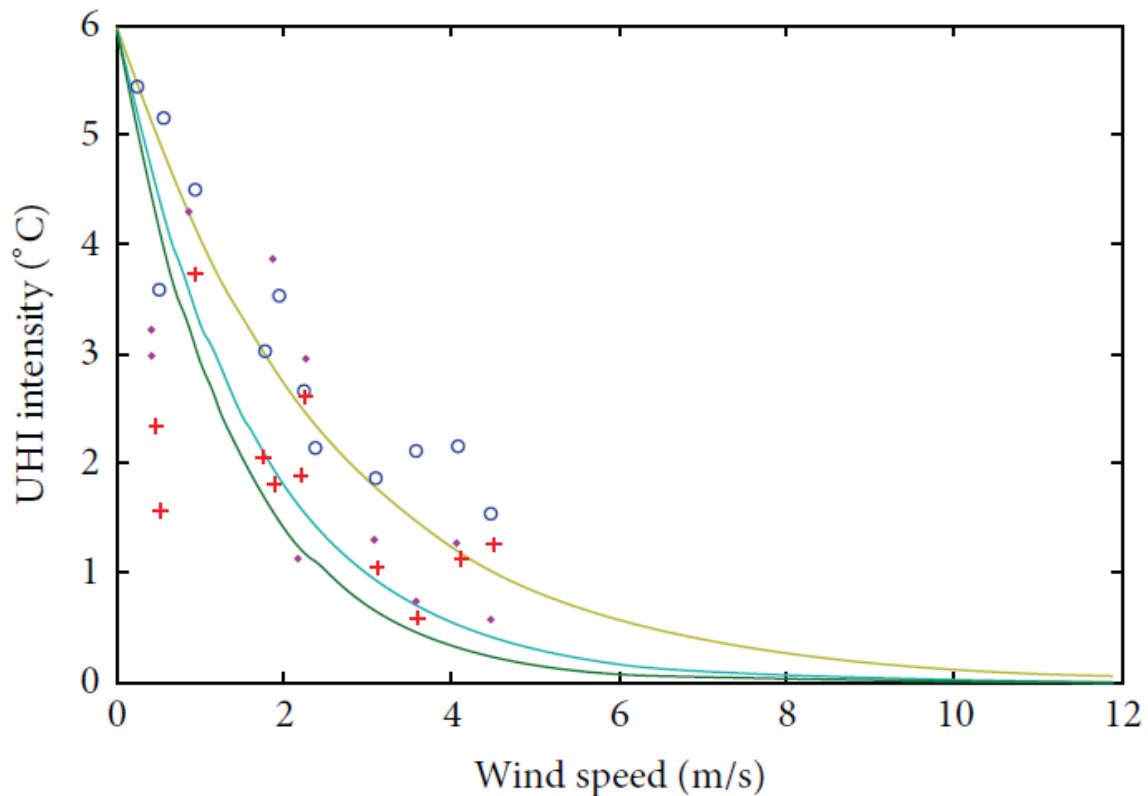


Figure 7 : Effet de la vitesse du vent sur l'intensité des ICU à Chambly, Marieville, et St. Basile-Le Grand (T-W Lee et al., 2014)

### 1.2.2. Facteurs morphologiques

Toutes les villes ne captent pas le rayonnement de la même manière. Ainsi en fonction de la structure de la ville en elle-même, le phénomène d'ICU peut être complètement différent.

#### 1.2.2.1. Localisation et topographie

La localisation de la ville est un facteur déterminant. À travers leur étude, Peng et al. (2019) ont observé l'influence de la position géographique sur une période de 30 ans, et ce sur 155 villes chinoises différentes. La position et la topographie amènent des différences d'ensoleillement et d'incidence du rayonnement. Ils montrent aussi l'influence des précipitations et de l'humidité relative sur la réduction de l'intensité des ICU.

#### 1.2.2.2. Occupation du sol

L'urbanisation est un phénomène largement répandu et étudié lors des dernières décennies dû à son intensité. Bangkok et son aire métropolitaine font partie de ces zones impactées par une urbanisation importante. Ceci induit une augmentation des îlots de chaleur urbains. Adulkongkaew et al. (2020) ont étudié ce constat et ils présentent notamment la relation entre la LST et la couverture au sol/occupation du sol. Leurs résultats présentent l'impact des sols

construits et nus sur l'augmentation de la LST et à contrario l'impact des zones d'espace vert et les étendues d'eau sur une diminution de la LST. Ces résultats sont présentés dans la Figure 8 ci-dessous.

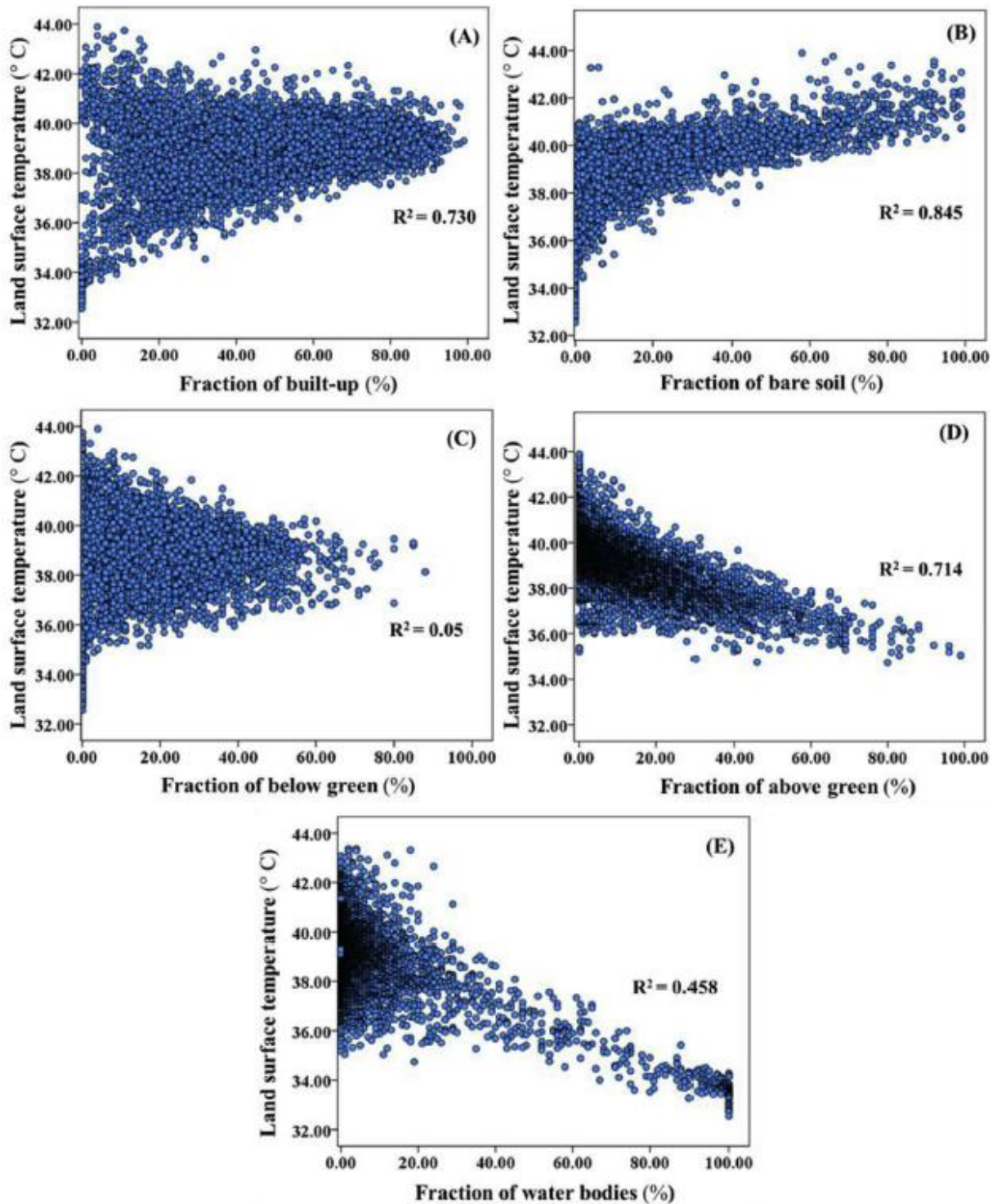


Figure 8 : Relations entre la LST et les types d'occupation du sol : bâti (A), sol nu (B), végétation basse (C), végétation haute(D), plans d'eau (E) (Adulkongkaew et al., 2020).

### 1.2.2.3. Structure du bâti

L'organisation, la géométrie, l'agencement des bâtiments d'une ville sont des composantes largement étudiées aujourd'hui dues aux nombreux impacts de celles-ci sur le phénomène d'ICU notamment celui de canyon urbain. Ce phénomène peut être décrit comme l'impact de la configuration des bâtiments et des rues sur la température en leur sein (Choi et al., 2018). En effet, certaines configurations amènent à la création de ce phénomène en piégeant le rayonnement, en limitant la ventilation ou en gardant l'air chaud (Figure 9).

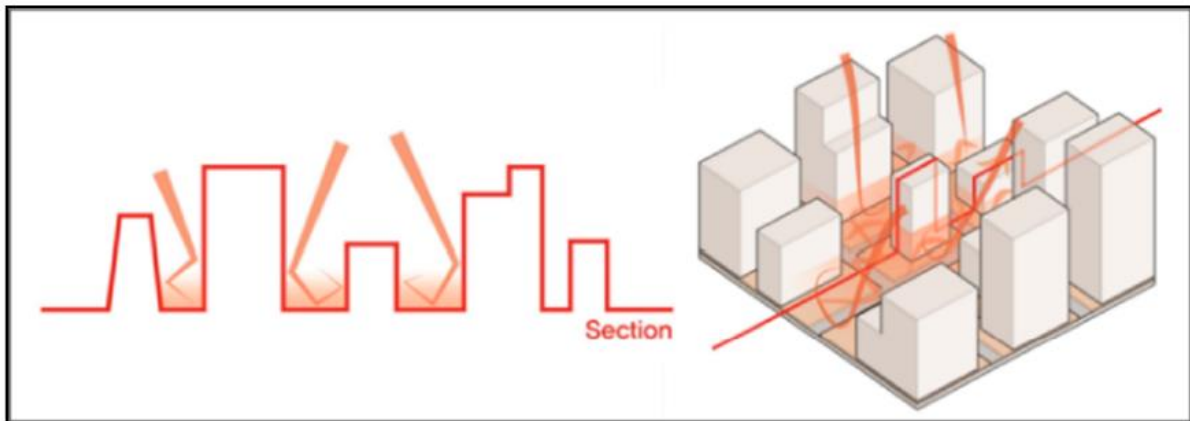


Figure 9 : Phénomène de piège des radiations (Choi et al., 2018)

Différentes caractéristiques permettent d'étudier le phénomène d'ICU comme le facteur de vue du ciel (sky view factor ou SVF), la porosité ou la rugosité de la surface urbaine. Dans leur étude, Choi et al. (2018) expliquent que ces 3 facteurs sont souvent considérés comme majeurs dans l'étude de l'environnement urbain. En effet, le SVF permet de décrire l'effet journalier durant lequel les canyons urbains enferment le rayonnement et l'air chaud. Plus que pour la structure du bâti, le SVF permet de décrire, comme le présente la Figure 10 l'ouverture au-dessus du sol, que ce soit pour des bâtiments ou des arbres. L'impact de cet effet a été démontré par exemple par régression linéaire où une augmentation de 50% de celle-ci peut amener une réduction de la température moyenne annuelle minimum de 1,75°C à 2,18°C (Colunga et al., 2015).

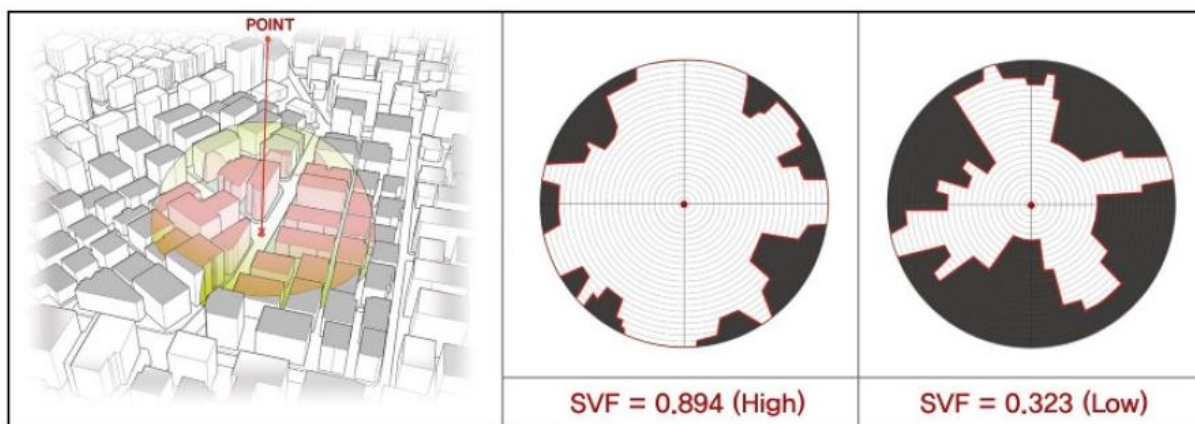


Figure 10 : Principe du facteur de vue du ciel (SVF) (Choi et al., 2018)

La rugosité et la porosité vont quant à eux influencer la ventilation du milieu urbain en créant des corridors amenant des conditions environnementales plus supportables pour le confort humain (circulation de l'air et réduction de la température).

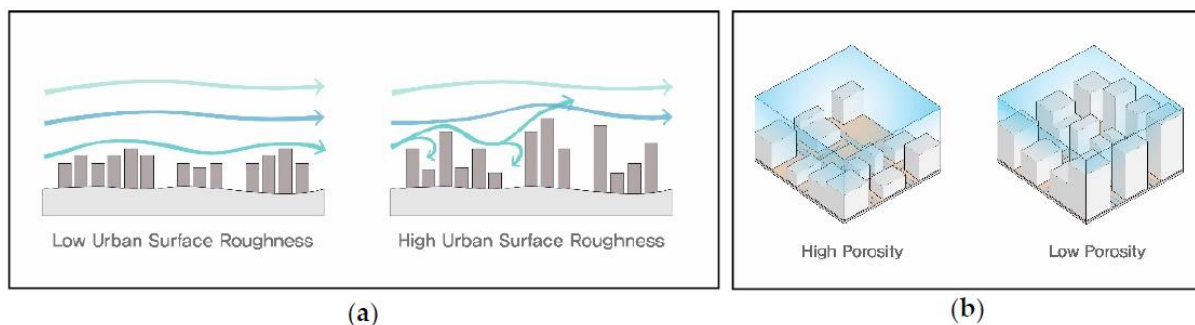


Figure 11 : Représentation de la rugosité et de la porosité du milieu urbain (Choi et al., 2018)

#### 1.2.2.4. Présence de végétation

Parmi les facteurs considérés comme ayant un impact positif sur les ICU, la végétation est de ceux les plus cités pour son rôle dans l'effet de rafraîchissement des milieux urbains. En effet, parmi les nombreux services rendus à la société, la végétation et particulièrement la végétation arborée, apporte de l'ombre et l'humidité via l'évapotranspiration (Li & Norford, 2016).

Des études telles que celle présentée par Colunga et al. (2015) mettent en évidence cet impact positif et montrent que l'augmentation de la couverture arborée de la ville de Queretaro de 50% pourrait réduire les ICU des 2,05°C. Ceci peut évidemment être mis en relation avec le SVF. La végétation arborée réduit le SVF et augmente donc l'effet d'ombre. L'évapotranspiration aussi apporte cet effet de refroidissement. L'effet de l'eau sur la réduction de la température sera cependant détaillé dans le point suivant.

Bien que cela puisse paraître trivial, il est pertinent de préciser que l'effet de rafraîchissement de la végétation dépend du type de végétation en elle-même, de la surface que cette végétation couvre et de la saison (Qiu et al., 2013).

Parmi la végétation, un aparté concernant les « toits verts » est un élément qui dans le futur pourrait avoir encore plus d'impact. En effet, la végétation ayant un albédo plus élevé, les « toits verts » permettent de réduire l'absorption de l'énergie solaire (Li & Norford, 2016).

Enfin, la végétation est un élément amenant un confort autre que celui de réduction de la température comme la réduction du bruit, la création d'un environnement agréable et une amélioration de la qualité de l'air (Li & Norford, 2016).

#### *1.2.2.5. Présence de point d'eau*

L'eau, par ses propriétés physiques, est un élément important dans le cadre de la réduction des ICU. L'eau absorbe la chaleur, ce transfert d'énergie amène l'eau à se réchauffer et parfois s'évaporer. L'énergie ainsi absorbée n'est pas absorbée par d'autres surfaces. L'évaporation n'a cependant pas une grande influence dans la balance énergétique, ce sont les conséquences de celle-ci qui amènent un effet de refroidissement important. En effet, indirectement, l'évaporation extrait de l'énergie des masses d'eau et les refroidie. La masse d'eau évaporée, quant à elle continue à absorber de la chaleur (Jacobs et al., 2020).

Les masses d'eau telles que les mares et étangs ont leurs surfaces naturellement plus fraîches que les sols (Qiu et al., 2013). Cet air plus frais peut avoir un impact positif dans l'effet de refroidissement de l'environnement alentour mais nécessite cependant d'autres facteurs comme le vent pour déplacer cet air plus frais (Jacobs et al., 2020).

### **1.2.3. Facteurs aggravants**

Parmi les facteurs influençant le phénomène d'îlot de chaleur, certains n'en sont pas à l'origine mais amènent une variation, positive ou négative, de l'impact des ICU ou y sont fortement corrélés.

#### *1.2.3.1. Densité de population*

La densité de population peut être associée à l'urbanisation, particulièrement pour des villes nouvelles ou dont la population augmente rapidement. Par exemple, Bangkok a connu une croissance importante ces dernières décennies. Entre 2008 et 2012, la valeur maximale d'ICU a montré une corrélation avec l'augmentation de la densité de population dans différents quartiers de la ville (Arifwidodo & Chandrasiri, 2015).

### 1.2.3.2. *Production de chaleur additionnelle*

Différentes sources de chaleur existent en ville. Celles-ci peuvent dès lors amplifier le phénomène d'ICU.

L'une d'entre elles est le trafic routier qui à travers ses émissions et l'utilisation de moteurs thermiques, peut induire une augmentation de l'effet d'ICU. Les restrictions sanitaires liées au COVID-19 ont dans de nombreux pays réduit la circulation. Ces restrictions ont permis à Teufel et al., 2021 d'étudier l'impact du confinement à Montréal sur la LST de grands axes routiers comparé aux quartiers voisins. Durant le mois de mars 2020, le trafic routier a été réduit de 80%. La LST a diminué de 1°C durant cette période. Le modèle construit sur base de cet événement, quant à lui, montre une réduction de 20% du nombre d'heures où les températures sont supérieures à 30°C lorsqu'une réduction du trafic a lieu. La réduction du trafic n'est donc pas la solution au phénomène d'ICU mais une des solutions permettant de rendre l'environnement bordant les routes plus viables pour les piétons, cyclistes et personnes à risque (Teufel et al., 2021).

## 1.3. Mesure de l'intensité des ICU

### 1.3.1. Mesure de la température de l'air

La température de l'air est un facteur clé dans la compréhension des ICU. En effet, celle-ci permet de mesurer les CLHI et BLHI. Les CLHI sont les ICU ayant le plus d'impact sur le confort en ville. Des facteurs précédemment présentés, les CLHI sont particulièrement affectés par la géométrie urbaine, les échanges d'énergie propres à la consommation et l'activité locale (Azevedo et al., 2016).

La température de l'air est, pour le cas des CLHI, mesuré à l'aide de station météo ou de relevés ponctuels. Ce type de relevé souffre d'une résolution spatiale assez faible rendant les CLHI plus difficiles à mesurer. Les BLHI rencontrent le même problème puisque leur mesure passe par des relevés ponctuels de ballons captifs, de radiosondes ou de techniques de télédétection au sol (Azevedo et al., 2016).

Dès lors, la modélisation est devenue populaire dans le domaine de la climatologie urbaine et de nombreux modèles permettent d'estimer la température et les variations de température. Ces modèles se précisent et se développent à l'aide d'outils de plus en plus précis et performants (Azevedo et al., 2016).

### 1.3.2. Relation entre la température de l'air et la LST

Bien que corrélé, la LST est en général, plus haute en journée que la température de l'air et ce particulièrement quand le ciel est clair. Dans ces conditions, la variabilité augmente. Le rayonnement est un élément important dans la relation entre la LST et la température de l'air tout comme la vitesse du vent, l'heure d'observation de la température de l'air et de la LST, la saison, la présence de précipitations au moment de l'observation et les valeurs de l'indice de végétation de différence normalisée (NDVI) (Gallo et al., 2011).

### 1.3.3. Mesure de la LST par télédétection

#### 1.3.3.1. Généralités

Depuis les années 60, l'évolution de la télédétection ouvre le champ des possibles notamment au niveau de l'étude des milieux urbains. Une des applications de la télédétection pour les milieux urbains est la mesure de la LST. La LST permet de mesurer les SHI avec l'avantage pour la plupart des cas d'avoir une information dont la couverture temporelle et spatiale et la disponibilité sont importantes (Azevedo et al., 2016).

La LST n'est pas le facteur ayant le plus d'impact négatif pour le confort humain. Cependant son influence sur d'autres facteurs à travers des échanges d'énergies par exemple entre la surface chauffée et l'air est significative et de plus en plus de modèles quantifient les SHI mais aussi les CLHI puisque ces derniers sont corrélés. Les BLHI quant à eux, la couche en question n'est pas en contact avec la surface contrairement à la couche de canopée (Azevedo et al., 2016).

#### 1.3.3.2. Concept de base

À travers ce point, l'objectif est de fournir les bases de compréhension du fonctionnement des capteurs embarqués par exemple dans les satellites.

« *Le rayonnement électromagnétique est émis par les objets, en fonction de leur température. Kirchhoff (1860) définit un corps idéal, appelé "corps noir", pour lequel la surface absorberait l'ensemble du spectre électromagnétique incident, c'est-à-dire un corps sans transmission ni réflexion. Dans ce cas, le rayonnement électromagnétique total à une certaine longueur d'onde provenant d'un objet ne dépend que de la température de la surface (Planck, 1901).* » (Antoine & Lopez, s. d.)

En ramenant ce flux à une surface unitaire, Planck définit la luminance énergétique spectrale :

$$B_{obs} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} [Wm^{-2}sr^{-1}m^{-1}]$$

Avec :

$h$  , la constante de Planck ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  [J s]) ;

$c$  , la vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8$  [m s<sup>-1</sup>]) ;

$k$  , la constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  [J K<sup>-1</sup>]) ;

$T$  , la température [ K ] ;

$\lambda$  , la longueur d'onde du rayonnement [ m ]

Dès lors, il est visible dans cette équation que la luminance énergétique spectrale est fonction de la température et de la longueur d'onde. Pour une longueur d'onde spécifique, il existe un maximum d'énergie appelé pic d'énergie radiatif ( $\lambda_{\max}$ ). Cette valeur est inversement proportionnelle à la température. Cette relation est définie à travers la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

avec  $b$  , la constante de Wien qui vaut  $2,898 \cdot 10^{-3}$  m K. En prenant par exemple la Terre comme corps, sachant que la température de surface de celle-ci est d'environ 300 K,  $\lambda_{\max}$  est égale à  $9,7 \mu\text{m}$ , cela étant proche de la limite inférieure du domaine de l'infrarouge.

L'avantage de l'infrarouge thermique dans le cas de la télédétection, est la faible absorption de ce domaine par l'atmosphère, comme représenté sur la Figure 12.

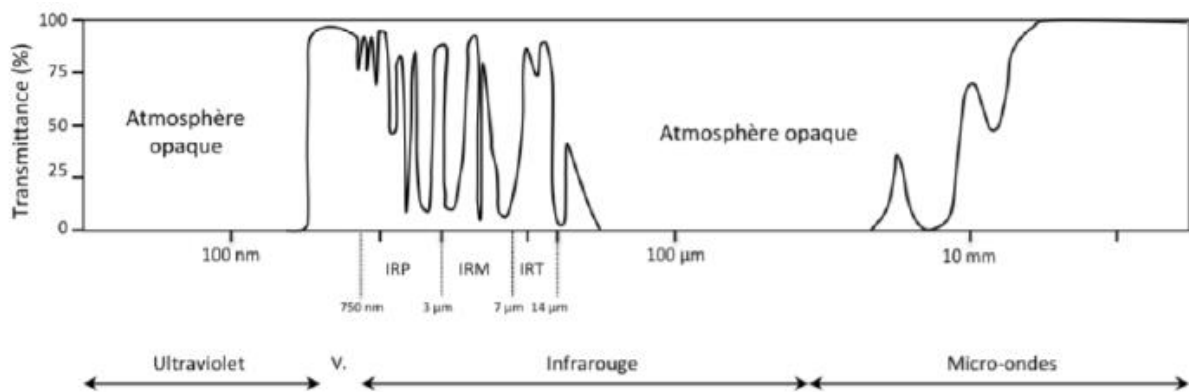


Figure 12 : Transmittance de l'atmosphère standard en fonction de la longueur d'onde (Antoine & Lopez, 2020).

Dès lors, en combinant le résultat de la loi de Planck et de Wien, c'est-à-dire en connaissant la luminance énergétique spectrale et la longueur d'onde, il est possible de mesurer la température de brillance de l'objet correspondant en réalité à sa température de brillance si le corps était un corps noir. L'équation est la suivante :

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

avec :

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

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

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

$\lambda$ , la longueur d'onde [m].

La surface terrestre n'est cependant pas un corps noir. En effet, l'émissivité définit l'efficacité avec laquelle un corps émet de l'énergie :

$$\varepsilon = \frac{M(\text{corps})}{M(\text{corps noir})}$$

avec :

$M$ , la quantité d'énergie émise par un corps à une température  $T$ [K], 1 étant la valeur maximale, c'est-à-dire l'émissivité d'un corps noir et les valeurs entre 0 et 1, celle de corps qui ne sont pas considérés comme noir. Dans cette gamme de valeur, la terre est proche de 1 (Antoine & Lopez, s. d.).

Une méthode classique d'estimation de l'émissivité sur un pixel mixte est l'utilisation du NDVI. L'indice de végétation normalisé mesure la quantité de lumière proche infrarouge et infrarouge réfléchi par les objets. Il est défini comme ceci :

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

avec : NIR, la réflectance spectrale du proche infrarouge et RED, la réflectance spectrale du rouge (Tardy et al., 2016).

Cet indice, dont les valeurs sont comprises entre -1 et +1, permet notamment de mettre en évidence la biomasse et particulièrement la végétation verte. Celle-ci a une valeur comprise entre 0,2 et 1 (les valeurs les plus faibles font référence à de simples arbustes et les plus élevées font référence à des végétations denses comme les forêts tropicales) à la différence par exemple

des sols nus dont la valeur est inférieure à 0,1. L'eau, la neige et les nuages ont des valeurs négatives (*ArcGIS Pro / Documentation*, s. d.).

Dès lors, Tardy et al. (2016) présente une méthode d'estimation se basant sur l'équation suivante :

$$\varepsilon\lambda = \varepsilon v\lambda - (\varepsilon v\lambda - \varepsilon s\lambda) \left( \frac{NDVI - NDVIv}{NDVI_s - NDVIv} \right)^k$$

avec :

$\lambda$ , la bande spectrale ;

$\varepsilon v$ , l'émissivité de la végétation ;

$\varepsilon s$ , l'émissivité du sol nu ;

$NDVIv$ , le NDVI maximum pour la végétation ;

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

$k$ , un paramètre arbitrairement choisi dont la valeur est entre 2 et 3.

Un effet important à enlever pour la mesure de la LST est l'effet de l'atmosphère. Pour cela, l'utilisation d'un modèle radiatif est nécessaire. Celui-ci se présente comme ceci :

$$L_{\lambda, sen}(T) = \tau_{\lambda} \varepsilon_{s,\lambda} B_{\lambda} + L_{u,\lambda, atm} + \tau_{\lambda}(1 - \varepsilon_{s,\lambda})L_{d,\lambda, atm}$$

avec :

$L_{\lambda, sen}$ , la luminance spectrale au niveau du capteur [ $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ] ;

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

$\tau_{\lambda}$ , la transmission de l'atmosphère pour une longueur d'onde ;

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

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

$\varepsilon_{s,\lambda}$ , l'émissivité spectrale de surface.

La correction faite et l'émissivité estimée, l'inversion de l'équation simplifiée de Planck permet de trouver la LST pour luminance spectrale à une longueur d'onde donnée :

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

$LST$  , la température de surface [K] ;

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

$K_1$  , la constante de calibration [ $\text{W m}^2 \text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$ ] ;

$K_2$  , la constante de calibration [K].

C'est sur ce principe que se basent les capteurs de différents satellites et ce sont ces outils qui seront utilisés dans le cadre de ce travail.

### 1.3.3.3. Capteurs et outils

#### 1.3.3.3.1 Landsat 8

Le capteur utilisé dans le cadre de ce travail est celui embarqué à bord de Landsat 8. Cette mission a été lancée le 11 février 2013. À son bord, le Thermal Infrared Sensor (TIRS), est un capteur qui mesure la température dans deux bandes thermales. Landsat 8 effectue une orbite héliosynchrone et quasi polaire toutes les 99 minutes. Ainsi, le satellite a un cycle de répétition de 16 jours avec une heure de passage équatoriale à 10h environ (*Landsat 8 / U.S. Geological Survey*, s. d.).

Les deux bandes du TIRS sont la bande 10 (TIRS 1) avec une gamme de longueurs d'onde de 10.6 - 11.19  $\mu\text{m}$ , une résolution spatiale de 100 m et la bande 11 (TIRS 2) avec une gamme de longueurs d'onde de 11.5 - 12.51  $\mu\text{m}$  et aussi une résolution spatiale de 100 m. La résolution spatiale du capteur est ré-échantillonnée par LANDSARTS à 30m (*Landsat 8 / U.S. Geological Survey*, s. d.).

#### 1.3.3.3.2 Autres capteurs

D'autres capteurs existent aussi. À travers ce point, l'objectif est de présenter ces outils et les raisons pour lesquelles Landsat 8 est le choix fait pour ce travail.

ASTER est un capteur dont les bandes d'acquisitions vont notamment dans l'infrarouge thermique (bande 13 et 14). Sa résolution spatiale est de 90 mètres avec aussi une fréquence d'acquisition de 16 jours. L'acquisition d'image se fait de nuit ce qui peut être aussi intéressant

pour les ICU si l'on veut observer le refroidissement de certaines surfaces. C'est la résolution spatiale qui lui porte préjudice par rapport à la résolution de Landsat 8 (Tardy et al., 2016).

MODIS est un capteur embarqué à bord des satellites Terra/Aqua. Il enregistre des données dans 36 bandes avec une résolution temporelle de 1 à 2 jours. Parmi ces bandes, la bande 31 et 32 sont celles de l'infrarouge thermique. Le défaut de MODIS est sa résolution spatiale de 1000m, ce qui est bien en deçà de la résolution de Landsat 8 malgré son excellente résolution temporelle (Azevedo et al., 2016; *MODIS Web*, s. d.).

#### 1.3.3.3.3. LANDARTs

Landarts (Landsat Automatic Retrieval of Surface Temperatures) est l'outil utilisé dans ce travail pour passer de l'imagerie infrarouge thermique à une température absolue. Cet outil Python permet d'obtenir sur base de l'imagerie de Landsat 5, 7 et 8. L'avantage de cet outil est entre autres le ré-échantillonnage d'une résolution de 100 m à 30 m (Tardy et al., 2016). Son fonctionnement sera détaillé dans la section matériel et méthode.

## 2. Objectifs

Les ICU sont une problématique de plus en plus récurrente. Leur compréhension, leur cartographie et la recherche quant à des solutions de gestion de ceux-ci sont dès lors importantes dans la lutte contre ce phénomène. Ce mémoire s'inscrit dans le prolongement du plan canopée mis en place par la ville de Liège. Ce plan vise à agir contre les canicules urbaines et à améliorer la qualité de l'air en plantant vingt mille arbres d'ici 2030.

À travers ce travail, le but est, sur base de données en libre accès, de mettre en évidence de manière systématique le phénomène d'ICU dans différentes villes belges. Deux objectifs seront poursuivis dans ce mémoire afin d'y parvenir.

Premièrement, l'objectif est de rendre compte de l'étendue de ce phénomène sur différentes villes belges, et ce à l'aide de l'imagerie de Landsat 8. La question de recherche peut dès lors être exprimée comme ceci : *"Quelle est l'étendue du phénomène d'ilot de chaleur pour différentes villes belges ?"*. Les images utilisées permettent d'estimer la LST qui, comparée à la température du milieu rural, permet de mesurer le phénomène d'ICU. En étudiant le phénomène à partir de dates différentes, une autre question est : *"Quelle est la récurrence du phénomène d'ilot de chaleur ?"*.

La récurrence du phénomène est un mauvais signe pour la santé humaine particulièrement pour certaines parts de la population. Dès lors, en se basant sur les résultats précédemment obtenus et des données de population, il est possible de répondre à la question suivante : *"Quelle part de la population est impactée de manière récurrente par le phénomène d'ilot de chaleur de manière ?"*.

### 3. Zone d'étude

Dans le cadre de ce mémoire, la zone d'étude nécessite l'intégration de plusieurs villes. La zone d'étude porte sur une région allant de Charleroi à Antwerpen et de Bruxelles à Liège. Cette vaste zone forme dès lors un carré de plus de 125 kilomètres de côté soit 16.200 km<sup>2</sup> regroupant différentes villes belges comme celles citées plus tôt mais aussi Namur et Leuven.

Ces villes se trouvent toutes sur l'axe de passage de Landsat 8. Ceci permet de visualiser ces villes le même jour de l'année grâce aux scènes 198/24 et 198/25. L'utilisation de scènes prises le même jour est essentielle pour pouvoir comparer ces villes aux morphologies et localisations différentes. Aussi, cette zone pourra permettre de déceler une influence ou non de la proximité avec la côte ou de mettre en évidence une relation avec l'altitude de ces villes.

Pour correspondre aux objectifs de ce travail et pouvoir se concentrer sur différentes villes belges, chaque ville a été délimitée sur base de périmètres fournis par la ressource Copernicus Urban. Ces différents périmètres seront dans le cadre de l'étude de chaque ville, la limite effective d'étude. Celles-ci sont visibles à la Figure 13.

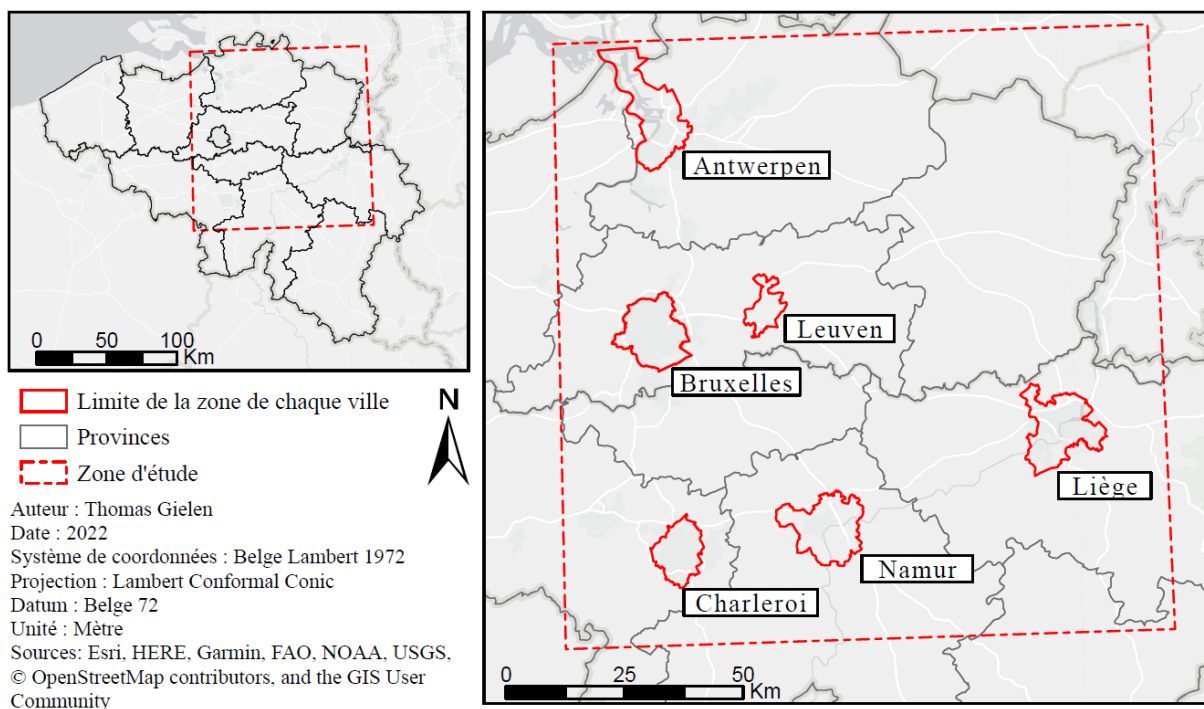


Figure 13 : Localisation de la zone d'étude.

### 4. Matériels et méthodes

Ce chapitre comprend différentes parties. D'abord, une première présentation globale de la structure de la méthodologie et des différentes données utilisées durant ce travail sera faite. La

seconde partie portera sur la présentation détaillée des données utilisées. La troisième abordera les différents outils informatiques et programmes nécessaires à la présentation du travail. Enfin, les détails des différentes étapes de traitement des données seront présentés.

#### 4.1. Structure générale de la méthodologie

La Figure 14 présente la démarche générale de ce mémoire. Trois sources de données sont à la base de ce travail : les images du capteur TIRS de Landsat 8, Copernicus Urban, une ressource fournissant entre autres des données de population et d'occupation du sol et LifeWatch, une donnée utilisée pour déterminer la surface rurale en Belgique.

Ces ressources sont détaillées dans la section donnée. Cependant, une première approche de la méthodologie semble pertinente afin de visualiser la structure de ce travail.

L'imagerie de Landsat 8 est la ressource permettant l'estimation de la LST et ce sur base de 6 scènes du capteur TIRS (2 par année). C'est le programme LANDARTs qui réalise ensuite cette estimation sur base des scènes. Ainsi, une carte est obtenue pour chaque année ou chaque pixel est une estimation de la LST.

Copernicus Urban est la base du travail concernant les données d'occupation du sol et de la population. Ces données sont sous la forme de polygones représentant parcs, jardins, maisons, centres commerciaux ou d'autres types de structure. Chaque polygone a divers attributs notamment une classe d'occupation du sol et une valeur de population.

L'occupation du sol peut être croisée à la présence d'ICU sur chaque polygone afin de rendre compte des classes d'occupation favorisant ce phénomène. La population permet de quantifier le nombre de personnes impactées par les ICU.

Cependant, afin de rendre compte du phénomène d'ICU, ce travail utilisera la définition du phénomène vu précédemment comme étant la différence entre la température urbaine et la température rurale. Ainsi, Lifewatch est utilisé pour calculer une température rurale chaque année, correspondant à la moyenne des températures sur une portion du territoire où l'artificialisation est faible.

À partir de cela la valeur des ICU est calculée pour chaque pixel pour toutes les villes. La moyenne de ces valeurs est calculée par polygone afin de pouvoir la comparer à l'occupation et la population.

Les résultats sont ensuite analysés par ville et enfin croisés entre les villes. Des hypothèses seront finalement proposées quant aux raisons derrière les différences et similitudes observées entre les villes.

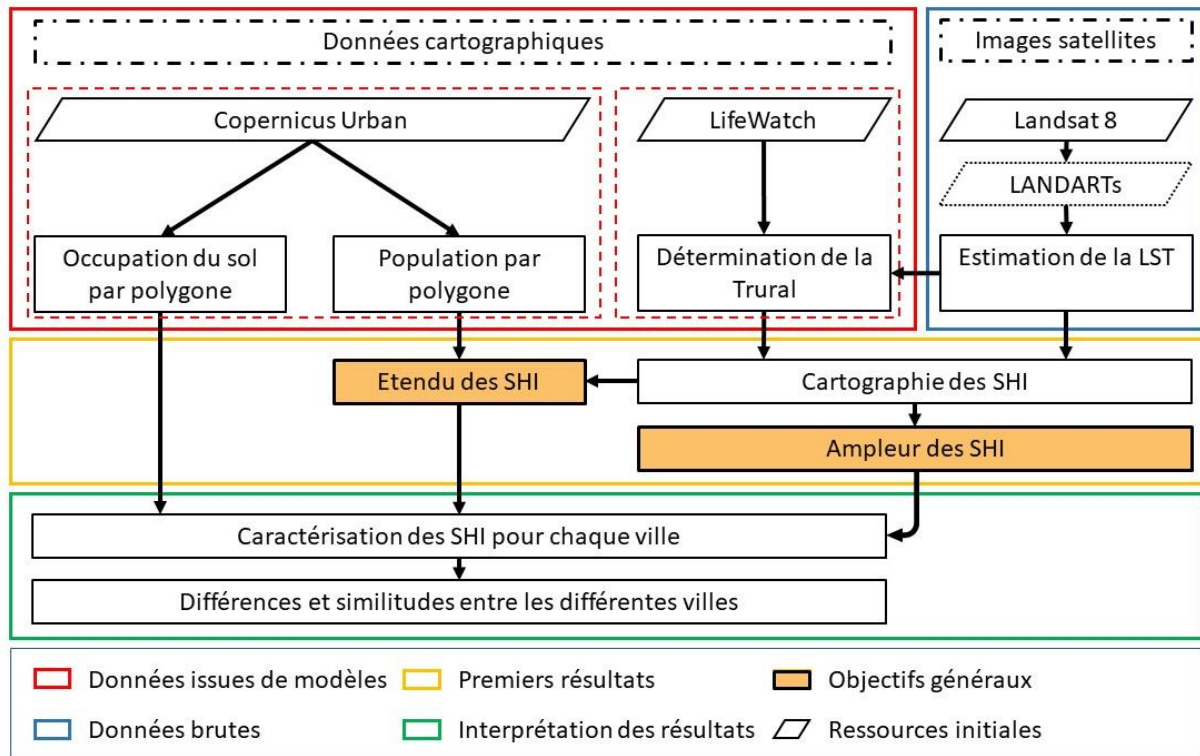


Figure 14 : Démarche générale de l'étude

## 4.2. Choix des différentes dates et images

Le choix des dates est essentiel. Ce choix se base sur différents facteurs : le jour et la présence de nuages.

Le jour de chaque année est choisi en fonction de la température mesurée à la station de Uccle, station météorologique de référence en Belgique. En effet, l'objectif est de prendre un jour de fortes chaleurs, le phénomène d'ICU étant accentué durant les vagues de chaleur.

La quantité de nuages est importante pour permettre une bonne visualisation des villes tout en assurant un ensoleillement important.

Ces dispositions sont idéales pour les ICU. Dès lors, ce sont les années 2018, 2019 et 2020 qui seront les trois années étudiées. Celles-ci ont l'avantage de posséder chacune des jours de vagues de chaleur visualisées par Landsat 8 avec une couverture nuageuse presque inexistante.

Les dates choisies correspondent au pic de température de l'air enregistré dans la station de Uccle.

#### 4.2.1. 26 juillet 2018

Juillet 2018 est le mois le plus chaud et le plus sec des 3 années étudiées. La température journalière enregistrée est la plus haute du mois avec 35,4 degrés Celsius et l'insolation mensuelle est proche des valeurs les plus extrêmes d'insolation mesurée avec 300 heures au total. Aussi, juillet 2018 fait partie des mois les plus secs des 20 dernières années avec 49,7mm de pluie.

#### 4.2.2. 27 juin 2019

Juin 2019 est un mois chaud avec une insolation élevée. Loin d'être aussi chaud que le mois de juillet 2018, celui-ci profite d'une insolation importante à tel point que la dernière décade du mois est qualifiée de vague de chaleur précoce. Cette date n'est cependant pas la plus chaude du mois et est la plus fraîche observée.

#### 4.2.3. 31 juillet 2020

Bien que le mois de juillet 2020 est plus frais en moyenne, le 31 juillet enregistre des valeurs de 36,5 degrés Celsius. Les derniers jours du mois profitent d'un ensoleillement important (proche de la valeur maximale) ce qui amène cette augmentation de température.

### 4.3. Descriptif des différentes villes

Les villes sélectionnées sont les villes reprises dans la base de données de Copernicus Urban et dont la localisation est sur la même orbite du satellite Landsat 8. Ce dernier point est important pour que toutes les villes soient visualisées le même jour. Parmi ces villes se trouve Antwerpen, Bruxelles, Charleroi, Leuven, Liège et Namur. Ces villes présentent l'avantage d'avoir des localisations assez différentes, la présence ou non de cours d'eau navigable, des densités de population différentes, une structure urbaine et une histoire différente. Il est noté que hormis Bruxelles, le périmètre des zones étudiées correspond au périmètre de la commune.

#### 4.3.1. Antwerpen

Antwerpen est une ville du nord de la Belgique, située dans la province du même nom, en Région flamande. À cheval sur l'estuaire de l'Escaut, c'est une ville dense en son centre et industrielle au nord avec son port. 530,000 personnes y vivent. Cette ville est une plateforme d'échange commercial conséquente notamment grâce à son port qui est l'un des plus grands d'Europe. Concernant l'âge, la population est assez déséquilibrée avec une majorité pour les

catégories d'âge des travailleurs et un pic important pour les 25-34 ans qui représentent, à eux seuls, environ 85,000 habitants. Aussi, la ville jouit d'une diversité culturelle importante, 21% de la population possède une nationalité étrangère (*Découvrez votre commune / Statbel, s. d.*).

Antwerpen est une ville de commerce et ce depuis le début du XIII<sup>ème</sup> siècle dont l'essor induira une croissance démographique et un développement rapide afin de loger les quelque 100.000 habitants recensés en 1560. Son essor reprend après la Seconde Guerre mondiale pour lui donner l'aspect d'aujourd'hui : une ville ancienne, marquée par son activité du début du XVI<sup>ème</sup> siècle qui permet à la ville d'hériter de nombreux édifices encore debout aujourd'hui. (Larousse, s. d.)

### 4.3.2. Bruxelles

Capitale de la Belgique, Bruxelles est une entité complexe. En effet, la commune ne doit pas être confondue avec la région et encore moins avec l'aire métropolitaine. La commune de Bruxelles a une population de 188,000 habitants, tandis que la région en compte plus de 1,2 million (*Découvrez votre commune / Statbel, s. d.*). Bruxelles est une ville multiculturelle dont certaines communes portent encore les stigmates du passé industriel riche de la Belgique. L'un de ces stigmates est le canal qui sert au transport de marchandises.

Concernant l'âge, la population est assez déséquilibrée avec une majorité pour les catégories d'âge des travailleurs et un pic important pour les 25-39 ans. Aussi, la ville jouit d'une diversité culturelle importante, 35% de la population possède une nationalité étrangère (*Nationalités / IBSA, s. d.; Structure par âge / IBSA, s. d.*).

À travers l'histoire, Bruxelles a connu de nombreux dirigeants mais aussi des émeutes, incendies et bombardements. L'activité de la ville l'a lentement façonnée, de sa place de ville la plus importante du Brabant au XIII<sup>ème</sup> siècle jusqu'à sa place centrale aujourd'hui en tant que cœur de l'Union européenne. (Larousse, s. d.-a)

### 4.3.3. Charleroi

Charleroi est une ville du centre de la Belgique, au sud de Bruxelles, située dans la province du Hainaut en Région wallonne. À cheval sur la Sambre, cette ville a un passé industriel encore bien marqué aujourd'hui par les nombreux terrils encore visibles sur le territoire de la commune et les industries bordant la Sambre. 202,000 personnes vivent à Charleroi. Concernant l'âge, la population est plus équilibrée que la répartition belge avec quand même une majorité pour les

catégories 30-34 ans et 45-54 ans. Aussi, 15% de la population possède une nationalité étrangère (*Découvrez votre commune / Statbel, s. d.*).

Charleroi est une ville jeune comparée à d'autres villes belges. Forteresse édifée au XVIIIème siècle, la ville en détruisit les murs pour peu à peu s'étendre grâce à l'essor de l'industrie notamment charbonnière que la Belgique connut au XIXème siècle. (« Charleroi », 2022)

#### 4.3.4. Leuven

Leuven est une ville du centre de la Belgique, à l'est de Bruxelles, située dans la province du Brabant flamand en Région flamande. Des différentes villes étudiées, c'est la ville la moins marquée par le passage d'un cours d'eau. En effet la Dyle jusqu'à Leuven, n'a pas l'ampleur d'un fleuve et n'est pas utilisée pour transporter des marchandises. En aval, un canal d'une trentaine de kilomètres suit la vallée de la Dyle pour permettre la liaison entre Leuven, le Rumel et l'Escaut. Ainsi, seul le nord de la ville, le long du canal et de la voie ferrée, accueille de grosses industries comme Inbev.

102,000 personnes vivent à Leuven. Concernant l'âge, la population est très déséquilibrée. La tranche des 20-34 ans est la plus grande majorité. Les 25-29 ans représentent à eux seuls plus de 12% de la population. Ceci peut être dû notamment à l'implantation de la Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven). L'université a peut-être un impact aussi sur la nationalité des habitants. En effet, la ville jouit d'une diversité culturelle importante, 20% de la population possède une nationalité étrangère (*Découvrez votre commune / Statbel, s. d.*).

Leuven a une histoire riche dont l'université en son sein est entre autres responsable. Cependant, la ville fut de nombreuses fois mise à mal particulièrement au XXème siècle. En 1944 la ville est rasée par un violent bombardement qui achèvera d'endommager le patrimoine de la ville qui dut se reconstruire presque entièrement. (Larousse, s. d.-c)

#### 4.3.5. Liège

Liège est une ville de l'est de la Belgique située dans la province du même nom, en Région wallonne. Arrosée par la Meuse, cette ville se trouve encaissée dans la vallée, la différenciant de villes plus plates comme Anvers. Cette ville a un passé riche en histoire et encore aujourd'hui certains de ces éléments historiques sont encore bien visibles comme le passé sidérurgique en bord de Meuse. 195,000 personnes vivent à Liège. Concernant l'âge, un déséquilibre est visible autour de la tranche 25 – 34 ans. Aussi, la ville jouit d'une diversité culturelle importante, 19% de la population possède une nationalité étrangère (*Découvrez votre commune / Statbel, s. d.*).

Liège est une ville ancienne et riche dont le développement sera marqué par son statut de principauté et par la suite par le développement de l'industrie lors de la révolution industrielle. Celle-ci subira de nombreuses destructions en 1940 mais une part de son patrimoine et de la structure de la ville est encore debout. (Larousse, s. d.-b)

#### 4.3.6. Namur

Namur est une ville du centre de la Belgique, au sud-est de Bruxelles, située dans la province du même nom, en Région wallonne. Arrosée par la Meuse et la Sambre, cette ville, comme Liège est fortement marquée par le passage du fleuve bien que le centre-ville se trouve sur une zone relativement plate. Cette ville est moins tournée vers la grosse industrie que certaines villes étudiées dans ce travail et est le siège de grosses institutions gouvernementales. Moins cosmopolite que les villes précédemment étudiées, cette ville de 112,000 habitants est, quant à l'âge, assez semblable au reste du pays avec seulement un déséquilibre visible autour de la tranche 20 – 34 ans (*Découvrez votre commune / Statbel*, s. d.).

Namur fut une ville importante au Moyen Âge et eut un grand rôle militaire au XVIIème et XVIIIème siècle. Bien que limitée essentiellement aux enceintes durant cette période, la ville s'est aujourd'hui densifiée sur ces abords et le long des cours d'eau qui la traversent. Elle est un centre administratif et commercial, plus qu'industriel. (« Namur », 2022)

### 4.4. Données

#### 4.4.1. Série d'images Landsat 8

Landsat 8 (ou plus exactement la mission de données continue Landsat) est une mission lancée le 11 février 2013 portant à son bord deux instruments : l'Operational Land Imager (OLI) et le TIRS. Ce dernier permet à travers 2 bandes thermiques de mesurer la LST à une résolution de 100 mètres, et ce maximum tous les 16 jours. Pour être plus exact, Landsat 8 a une orbite héliosynchrone quasi polaire (98,2 degrés d'inclinaison) passant à l'équateur vers 10h du matin. Les scènes correspondent à un découpage régulier de l'orbite enregistrée, sont définies dans le système géodésique World Geodetic System 1984 (WGS84) et sont fournies par l'Institut d'étude géologique des États-Unis (USGS).

Le tableau ci-dessous reprend les différentes bandes spectrales et leur longueur d'onde et résolution associées pour chacun des deux outils embarqués à bord de Landsat 8. Celles utilisées dans ce travail sont les bandes 10 et 11 (*Landsat 8 / U.S. Geological Survey*, s. d.).

Tableau 3 : Caractéristiques des bandes spectrales de Landsat 8 (Landsat 8 | U.S. Geological Survey, s. d.)

Bande Spectrale		Longueur d'onde [ $\mu\text{m}$ ]	Résolution [m]
Operationnal Land Imager (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	30
Bande 9 :	Cirrus	1,36 - 1,38	30
Thermal Infrared Sensor (TIRS)			
Bande 10 :	TIRS 1	10,6 - 11,19	100
Bande 11 :	TIRS 2	11,5 - 12,51	100

Ces résolutions spatiales et temporelles qui seront les éléments favorables à cet outil ainsi que le Logiciel LANDARTs qui à partir des bandes TIRS, ré-échantillonne les données à 30 mètres.

#### 4.4.2. LifeWatch – Ecotope

Le projet LifeWatch est un projet à l'échelle européenne de création d'un laboratoire virtuel pour la biodiversité. La Fédération Wallonie-Bruxelles finance un programme de recherche collaboratif entre l'Earth and Life Institut (UCLouvain) et le département d'ingénierie des biosystèmes (ULiège) faisant partie intégrante du projet LifeWatch : LifeWatch – Ecotope (*L'infrastructure Lifewatch en Belgique | Lifewatch regional portal*, s. d.).

Dans le cadre de ce travail, cette ressource permet de différencier les zones qui seront qualifiées de rurales de celles qualifiées d'urbaines à l'aide d'une zone tampon. Cette simplification dans l'appellation définit plus précisément la part du territoire dont la proportion de surfaces artificialisées et de bâtiments dans une zone tampon de 1000 mètres est inférieure à 30%. Ce choix est arbitraire mais devrait permettre de rendre compte de la température dans un milieu peu artificialisé et ainsi déterminer la température rurale sur la zone d'étude.

#### 4.4.3. Copernicus Urban

Copernicus est le programme d'observation de la Terre de l'Union européenne. Ce programme fournit des données satellites et in situ en accès libre et gratuites. Le service Land, spécialisé dans le suivi des terres, dispose d'une variété d'informations quant à l'occupation des sols et les changements associés. Parmi ces informations, l'Atlas Urbain fournit des données comparables et à haute résolution de l'utilisation et de l'occupation du sol pour 785 zones

urbaines fonctionnelles de l'Europe (des zones urbaines d'au moins 50.000 habitants) (European Union, 2020; Wegscheider et al., 2020).

Ces données se présentent sous la forme de polygones. Chacun représente un élément (bâtiment, parc, route ou sol nu par exemple) et est défini par une série de caractéristiques. L'aire, l'occupation ou l'utilisation du sol et la population font partie des caractéristiques utilisées dans le cadre de ce travail (European Union, 2020; Wegscheider et al., 2020).

Les polygones en question ont une taille minimum de 500 m<sup>2</sup> et sont larges au minimum de 10 mètres (à quelques exceptions près). Leur classe et position sont précises à 80% minimum bien que le milieu urbain enregistre une exactitude pour la classe d'occupation du sol légèrement supérieure (European Union, 2020; Wegscheider et al., 2020).

L'occupation et l'utilisation du sol dérivent des classes de CORINE Land Cover, un inventaire à la résolution moins fine que l'Atlas Urbain, et sont regroupées en deux catégories : Urbain et Rural. Les classes de surfaces artificialisées sont dans la première catégorie citée tandis que les aires agricoles, naturelles, semi-naturelles, les zones humides et l'eau sont dans la catégorie Rural. Parmi ces différentes classes, certaines devraient avoir un intérêt particulier pour ce travail comme tissu urbain continu et discontinu, les installations industrielles, commerciales, publiques et militaires, les routes, les forêts et l'eau. En effet, ces classes font référence à des éléments ayant des impacts positifs ou négatifs sur le phénomène d'ICU (European Union, 2020; Wegscheider et al., 2020). La liste complète de ces classes est disponible en Annexe.

La population est quant à elle approximée dans le cas de la Belgique, sur base de secteurs de recensement. Ces données sont ensuite associées aux différents polygones de l'Atlas Urbain à l'aide d'un modèle mathématique se basant sur la proportion d'aires bâties au sein de chaque polygone. Ceci permet dès lors d'avoir au sein d'un même secteur de recensement, d'estimer la population par polygone en fonction de la population de ce secteur par rapport au nombre de polygones et du type d'occupation du sol. (European Commission. Joint Research Centre., 2016)

Pour déterminer le périmètre des zones urbaines, la méthode est celle présentée dans le schéma ci-dessous. Sur base d'une grille de population à un kilomètre carré, les cellules de plus de 1.500 habitants sont sélectionnées, les cellules contiguës sont utilisées pour combler les trous et former un groupe de plus 50.000 habitants : le centre urbain (Urban Centre dans la figure). Enfin, les entités administratives équivalentes dont plus de 50% de la population est au sein du centre urbain. Il est à noter que le périmètre des zones urbaines de l'Atlas Urbain est délimité

selon des entités administratives comme des communes dans le cas de la Belgique (Dijkstra & Poelman, s. d.).

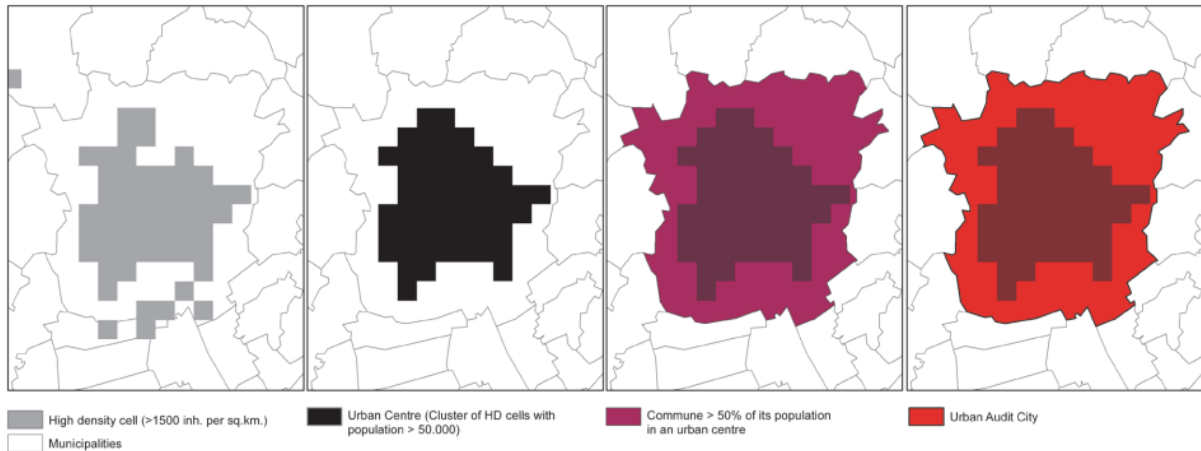


Figure 15 : Comment définir une ville ? (Dijkstra & Poelman, s. d.)

Comme il a déjà été mentionné dans le descriptif des différentes villes, le périmètre de chaque ville correspond en fait à sa commune (hormis Bruxelles), le terme ville sera cependant gardé dans le cadre de ce travail.

## 4.5. Logiciels

### 4.5.1. Système d'information géographique

ArcGis Pro est un Système d'Information Géographique (SIG) développé par Esri. Celui-ci permet notamment de visualiser, d'éditer, d'analyser et de traiter les données géospatiales 2D utilisées dans ce travail.

### 4.5.2. Langage et outils de programmation

#### 4.5.2.1. LANDARTs

LANDARTs est l'outil permettant de transformer les images de Landsat 8 captées par le capteur TIRS en carte de la LST à haute résolution. Ce logiciel code en python de manière automatisé.

L'organigramme ci-dessous présente le fonctionnement de ce logiciel. Celui-ci consiste en 3 étapes expliquées entre autres dans la section Concept de base.

Il est à noter que le paramétrage standard de LANDARTs a été conservé.

#### 4.5.2.2. Python

Python est un langage de programmation très polyvalent incluant un grand nombre de bibliothèques permettant notamment le traitement d'image de télédétection et de données

géoréférencées comme GDAL. Celui-ci sera utilisé notamment pour le traitement des données fournies par LANDARTs et leur adaptation au contexte de ce travail.

#### 4.5.2.3. *Microsoft Excel*

Inclus dans la suite bureautique Microsoft Office, Microsoft Excel est un logiciel tableur facile d'accès permettant l'édition et la visualisation d'un grand nombre de données. Celui-ci sera utilisé dans ce travail pour la comparaison des différentes villes et l'analyse des résultats.

## 4.6. Traitement

Cette section aborde en détail les différentes étapes passées en revue dans le point Structure générale de la méthodologie.

### 4.6.1. Estimation de la LST

L'estimation de la LST passe par l'utilisation du logiciel LANDARTs qui, comme vu dans la section précédente, estime la LST sur base des bandes de Landsat 8. Le fichier produit par LANDARTs est un fichier .tif visible ci-dessous. Pour en faciliter la manipulation, les scènes sont assemblées par année et coupées afin d'avoir les mêmes dimensions que la zone d'étude. Les valeurs doivent être reconverties en Kelvin puis en Celsius à l'aide d'un code Python pour mieux apprécier les valeurs observées. Ces images sont à 30 mètres de résolution et dans le système de référence spatiale WSG84.

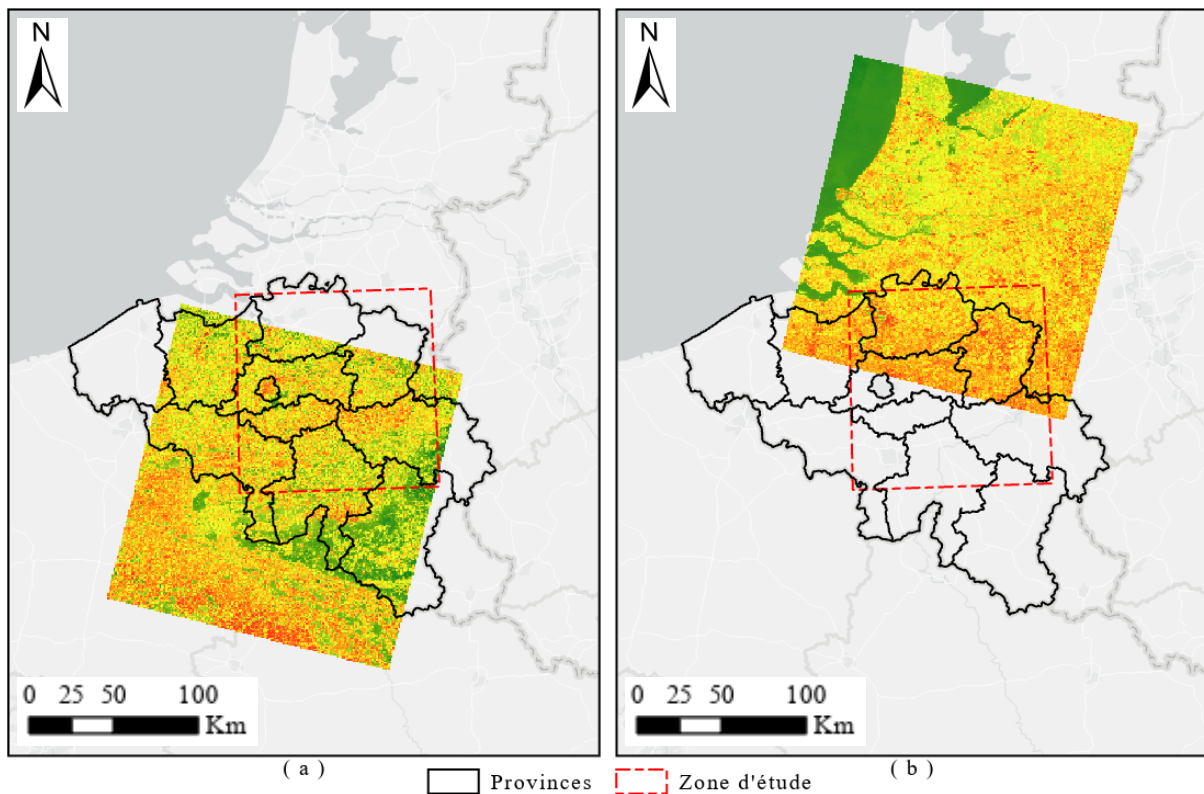


Figure 16 : Produit brut issu de LANDARTs pour l'année 2020 avec l'estimation pour (a) la scène 198/24 et (b) la scène 198/25

#### 4.6.2. Définition de la température rurale

Sur base de ces valeurs, afin de déterminer les ICU, il est nécessaire de calculer la température du milieu rural (Trur). Pour cela, la base de données de LifeWatch – Ecotope est utilisée. L'objectif de l'opération est de permettre de différencier les zones artificialisées des zones peu artificialisées, et ce sur base de la zone tampon décrite dans la section concernant LifeWatch – Ecotope et à l'aide de ArcGis Pro. Le résultat est visible sur la figure ci-dessous avec la zone rurale en vert et les « patches urbains » laissant apparaître les plus grosses agglomérations de la zone.

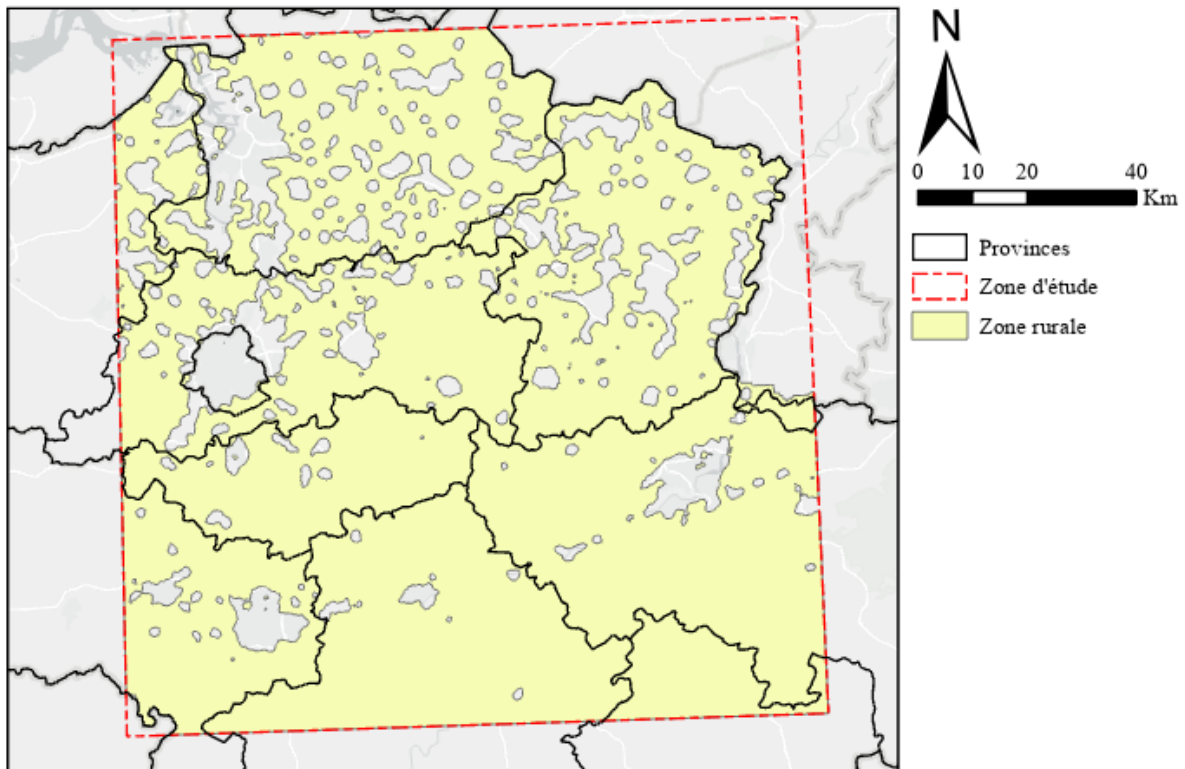


Figure 17 : Définition de la zone rurale sur base de l'artificialisation.

La température rurale est alors calculée en faisant la moyenne sur l'ensemble de la zone rurale de la LST. Les valeurs obtenues sont de 37°C, 26,98°C et 36,33°C dans l'ordre chronologique des dates étudiées.

#### 4.6.3. Cartographie des ICU

Sur base de cette estimation, soustraire à la matrice de valeurs de la LST les valeurs de température rurale permettent de calculer sur l'ensemble de la zone une température urbaine, visible à la Figure 18.

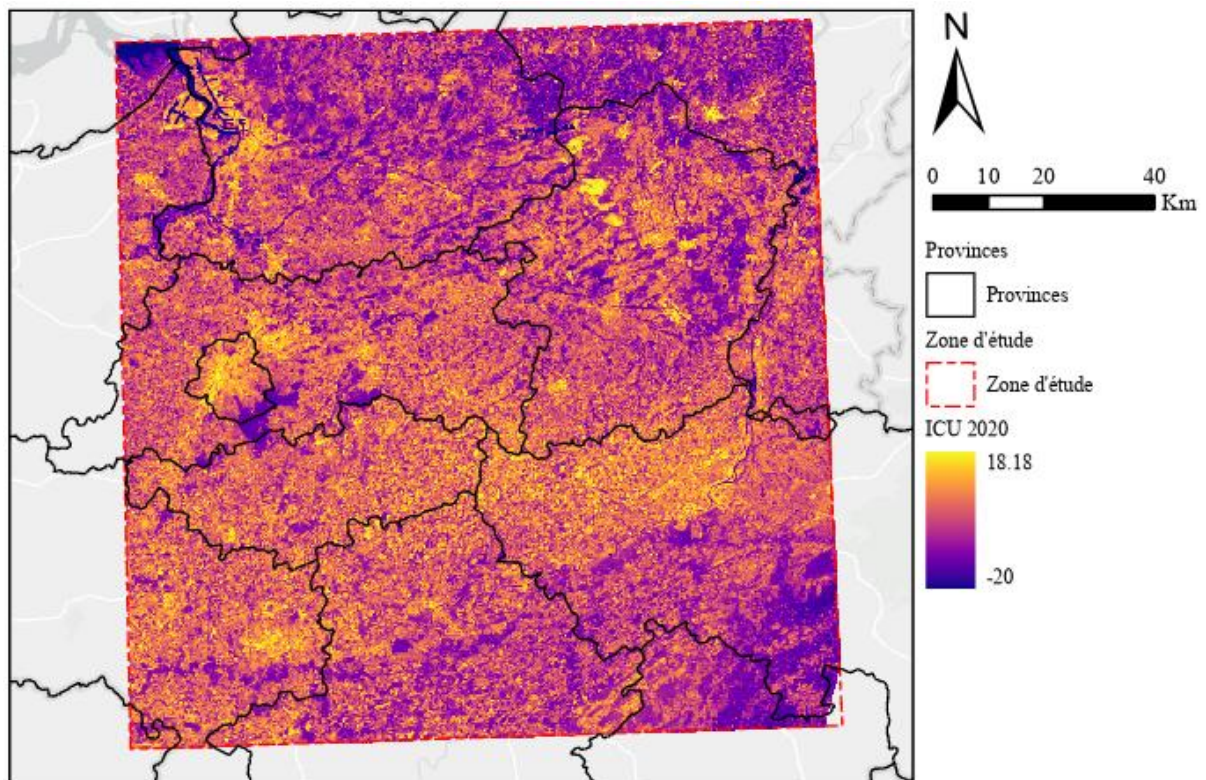


Figure 18 : Valeur des ICU (Turb -Trur) sur la zone d'étude (2020).

#### 4.6.4. Mise en relation des différentes données

L'opération suivante consiste en la fusion entre les données de LST précédemment obtenues et les données d'occupation du sol et de population de l'Atlas Urbain. Une donnée est sous forme de matrice tandis que l'autre est sous forme d'objet, en l'occurrence, des polygones. Dès lors, la manière d'assembler ces données entre elles est importante et décrite ci-après. La résolution de la matrice de LST étant assez fine, ce sont les données de température qui ont été jointes aux polygones. Pour ce faire, pour chaque polygone a été calculée la moyenne des valeurs de LST représentées sur sa surface. Chaque polygone, en plus des informations de population et d'occupation du sol, a donc une valeur de LST moyenne pour chaque année soit trois valeurs distinctes. Aussi, le minimum, le maximum et la déviation standard liés à la LST moyenne ont été calculés, et cela pour chaque année. Ceci permet déjà d'obtenir un résultat visuellement intéressant : les polygones les plus chauds d'une ville pour une année donnée comme décrit ci-dessous.

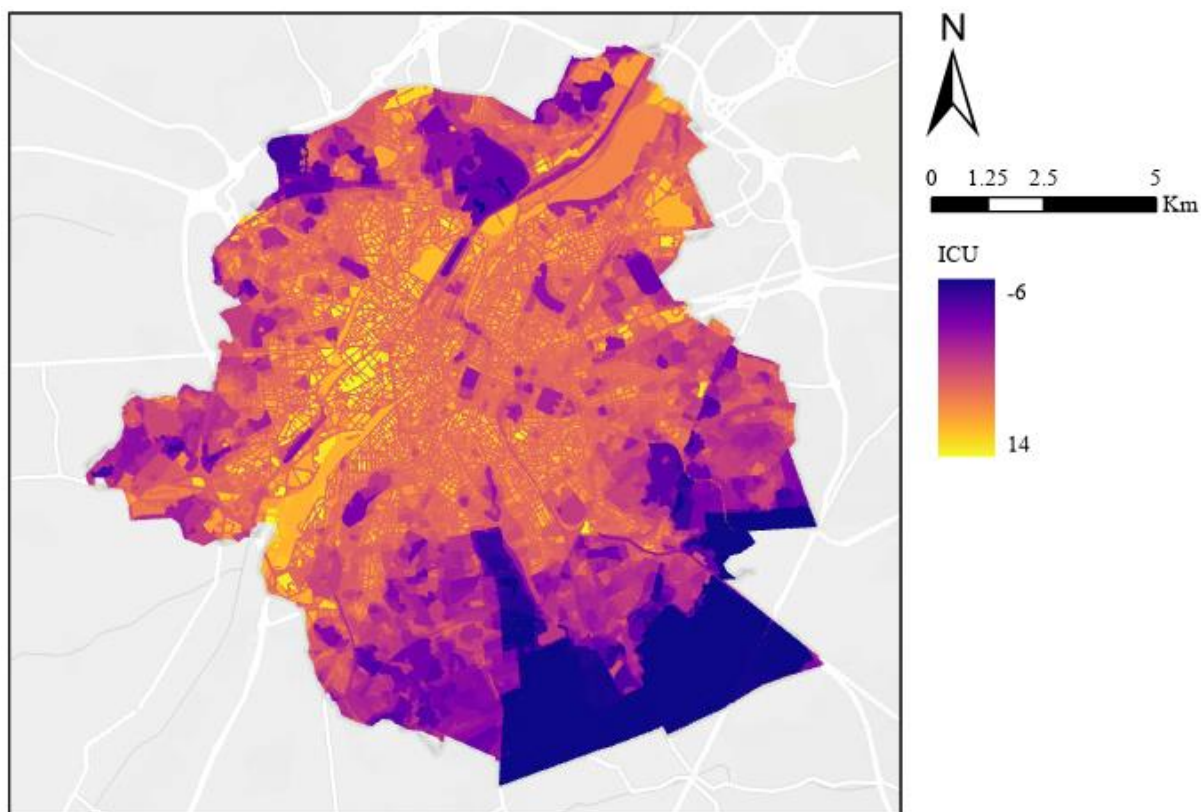


Figure 19 : Valeur moyenne des ICU par polygone à Bruxelles (2020).

Ces tables de données propres à chaque ville ont été exportées vers Microsoft Excel afin d'approfondir leur étude.

#### 4.6.5. Occurrence des ICU

Afin de rendre compte de la récurrence des ICU sur chaque polygone, un traitement a été effectué sur Microsoft Excel. Ce traitement consiste à compter le nombre d'années où un ICU supérieur à une valeur donnée est observé sur un polygone. Ceci permet, pour chaque polygone, d'obtenir un compte correspondant au nombre de fois que les valeurs d'ICU sont supérieures à une certaine valeur. Les valeurs prises sont les suivantes : plus de trois degrés, plus de six degrés et plus de huit degrés au-dessus de la température rurale. La première valeur permet de déjà classer les polygones peu ou pas impactés du reste. La dernière est une valeur arbitrairement choisie sur base des valeurs évoquées dans la littérature comme étant particulièrement chaudes (Founda & Santamouris, 2017) et des premières analyses des valeurs d'ICU obtenues au point précédent. La valeur intermédiaire permet de visualiser l'évolution entre les deux valeurs précédentes. Un score peut alors être attribué à chaque polygone allant de zéro à trois. Une valeur de zéro correspond à maximum deux occurrences d'ICU sur trois années. Une valeur de un correspond à minimum trois occurrences de plus de

trois degrés. Une valeur de deux correspond à minimum trois occurrences de plus de six degrés. Une valeur de trois correspond à trois occurrences de plus de huit degrés. Une typologie de la fréquence des ICU est définie afin de synthétiser l'information obtenue pour les trois années différentes et de la visualiser cartographiquement.

#### 4.6.6. Analyse

Une analyse a été réalisée sur chaque ville pour observer les grandes tendances concernant les valeurs de LST moyenne sur l'ensemble d'une zone, les LST maximum et minimum et l'écart type.

Ensuite, une seconde analyse a été réalisée sur l'occupation du sol, le nombre de polygones pour chacune des classes d'occupation du sol, la surface de chacune de ces classes, la LST moyenne chaque année sur un polygone par classe et l'écart type standard associé.

Par après, c'est une analyse sur la population qui a été réalisée. Pour ce faire, la répartition de la population dans les différentes classes d'occupation du sol a été mise en tableau et les données de population ont été croisées avec l'occurrence des ICU.

Ces éléments ont dès lors permis de réaliser une analyse sur chaque ville et ensuite de croiser les informations pour voir les différences observées entre chaque ville.

## 5. Résultats et discussion

À travers cette section, l'objectif est d'analyser les différents résultats amenés par la méthodologie présentée dans la section précédente. La taille de la zone d'étude ne permet pas une grande lisibilité des résultats sur l'ensemble de cette zone. C'est pourquoi les exemples pris dans cette section pourront porter non pas sur l'ensemble de la zone d'étude mais plutôt sur une ou plusieurs villes considérées comme représentatives.

### 5.1. Répartition spatiale de la LST

À l'aide de l'outil LANDARTs, la LST est estimée sur l'ensemble de la zone d'étude. Celle-ci est la première base nécessaire au calcul des ICU.

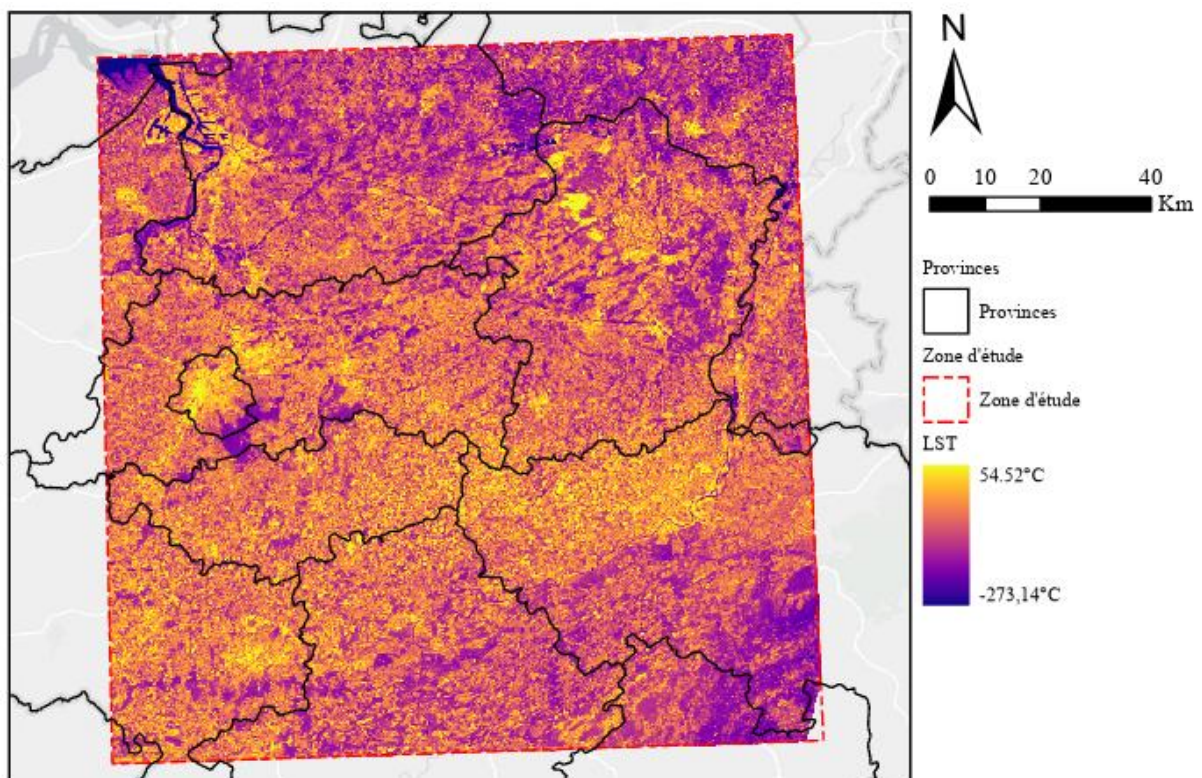


Figure 20 : LST pour l'année 2020.

Pour les dates étudiées, il est possible de visualiser la LST maximale, moyenne et minimale pour les différentes villes ainsi que l'amplitude maximale et l'écart type en degré Celsius au Tableau 4.

Tableau 4 : Statistiques de la LST chaque année pour chaque ville.

Ville	Année	LST <sub>Trur</sub> (°C)	LST <sub>moy</sub> (°C)	LST <sub>min</sub> (°C)	ΔLST <sub>min</sub> (°C)	LST <sub>max</sub> (°C)	ΔLST <sub>max</sub> (°C)	Δ (°C)	σ (°C)
Antwerpen	2018	37,00	44,81	25,77	-11,22	54,50	17,51	28,73	3,52
	2019	26,98	36,18	22,47	-4,51	52,02	25,04	29,55	3,89
	2020	36,33	40,43	22,81	-13,52	54,51	18,18	31,70	3,25
Bruxelles	2018	37,00	44,58	30,41	-6,58	54,50	17,51	24,09	3,42
	2019	26,98	34,95	22,13	-4,85	47,77	20,80	25,65	3,56
	2020	36,33	41,15	28,91	-7,42	54,51	18,18	25,60	3,05
Charleroi	2018	37,00	43,01	31,48	-5,51	54,50	17,51	23,02	2,95
	2019	26,98	33,19	22,34	-4,63	47,92	20,94	25,57	3,18
	2020	36,33	40,87	29,37	-6,96	54,51	18,18	25,14	2,55
Liège	2018	37,00	41,66	30,01	-6,98	54,50	17,51	24,49	2,90
	2019	26,98	33,01	21,26	-5,71	49,27	22,30	28,01	3,56
	2020	36,33	40,81	28,66	-7,67	54,51	18,18	25,85	2,64
Leuven	2018	37,00	44,04	33,17	-3,82	54,50	17,51	21,33	2,97
	2019	26,98	32,49	22,70	-4,28	48,65	21,67	25,95	3,43
	2020	36,33	39,92	29,37	-6,96	54,51	18,18	25,14	2,70
Namur	2018	37,00	43,50	31,70	-5,29	54,50	17,51	22,80	2,93
	2019	26,98	30,14	21,46	-5,52	46,24	19,26	24,78	3,29
	2020	36,33	38,84	28,17	-8,16	54,51	18,18	26,34	2,51

Les LST rurales (LST<sub>Trur</sub>) sont celles utilisées pour le calcul des ICU. Ces valeurs représentent donc la LST sur l'ensemble de la zone d'étude pour les zones dites « rurales » soit les zones dont l'artificialisation est faible. C'est pour cela que ces valeurs sont équivalentes pour toutes les villes.

La LST moyenne (LST<sub>moy</sub>) correspond à la moyenne sur chaque ville. Ces valeurs vont de 30,14 à 44,81 °C en fonction des dates et des villes. L'amplitude maximale (Δ) quantifie l'écart entre la valeur maximale et minimale observées sur l'ensemble d'une ville, les valeurs sont entre 21,33 et 31,7 °C. Cet écart conséquent est dû à la présence d'un cours d'eau et de surfaces chauffantes dans la majorité des villes visualisées. Ceci est particulièrement visible pour chaque ville au regard de la LST minimale (LST<sub>min</sub>) observée et de la LST maximale (LST<sub>max</sub>) observée. Les minimas observés vont de 21,26 à 33,17°C. Les valeurs en dessous de 25 degrés Celsius viennent de grandes masses d'eau comme des fleuves (l'Escault à Antwerpen par exemple). Cependant, les valeurs de LST minimales peuvent être assez élevées par exemple pour Namur en 2018 et ce malgré la présence d'un cours d'eau. Une analyse plus détaillée est donc requise. Les maximas, quant à eux, vont de 46,24 à 54,51. Il faut souligner que les

maximas pour les années 2018 sont identiques entre toutes les villes. Le même phénomène est présent pour l'année 2020. Différentes hypothèses pourraient permettre de comprendre ce phénomène : soit une limitation du capteur amenant à un point de saturation ou une limitation du modèle LANDARTs.

$\Delta LST_{min}$  et  $\Delta LST_{max}$  correspondent au différentiel entre  $LST_{min}$  ou  $LST_{max}$  estimée d'un polygone et  $LST_{rur}$ .

L'écart-type ( $\sigma$ ) est dans une gamme de valeurs allant de 2,51 à 3,89 °C. Les différences observées dans ce cas-ci seront analysées dans la section portant sur les différentes villes de la zone d'étude.

## 5.2. Caractérisation des différentes années

Les jours choisis ont tous été définis comme cela a été présenté dans la section Choix des différentes dates.

2018 est l'année avec la valeur de LST la plus haute devant 2020 avec 37 degrés Celsius. Le 27 juin 2019 est beaucoup plus frais en moyenne avec 27 degrés Celsius. Cependant, 2019 profitait d'une insolation particulièrement importante et était le premier jour d'une vague de chaleur précoce. En effet, 2019 ressorts régulièrement pour de nombreuses classes d'occupation et pour de nombreuses villes comme les valeurs d'ICU les plus fortes. Autrement, c'est 2018 qui a les valeurs moyennes d'ICU les plus hautes.

## 5.3. Influence de l'occupation du sol sur la LST

L'objectif de cette section est de mettre en évidence les valeurs d'intérêt qui ressortent de l'ensemble des données.

D'abord, il est nécessaire de clarifier un point. Certaines valeurs moyennes sont calculées sur un échantillon réduit de polygones et peuvent ainsi, aboutir à des valeurs parfois non représentatives puisque des facteurs autres que l'occupation du sol peuvent influencer la LST.

De manière générale, les valeurs sont pratiquement toutes supérieures à la température rurale et ce peu importe la classe. Les seules exceptions sont les classes de forêts, de végétation herbacée, d'eau et de milieux humides.

### 5.3.1. Tissu urbain

Les valeurs certainement les plus intéressantes sont les valeurs concernant le tissu urbain. En effet, l'objectif de ce mémoire consiste à décrire l'impact des ICU sur la population. Les classes

de tissus urbains comprennent à elles seules 95% de la population des villes observées. À travers l'état de l'art, l'impact négatif de l'artificialisation sur les ICU a été montré. Cet impact est directement visible sur les résultats avec une augmentation de l'effet d'ICU lorsque la part de fraction artificialisée dans le tissu urbain augmente.

Le point d'orgue est le tissu urbain dense continu dont les valeurs en fonction des villes et des années, oscillent entre un peu plus de 6 et 12 degrés de plus que la valeur de température rurale. Cela signifie que la population vivant dans ce type de tissu urbain est confrontée à un phénomène d'ICU supérieur à 6 degrés pour chaque année étudiée. Même pour le mois de juin 2019, les valeurs de LST sont toujours supérieures à 36 degrés Celsius.

Le tissu urbain discontinu avec une artificialisation entre 80% et 50% est lui aussi touché avec des ICU entre 4 et 8 degrés de plus que la valeur de température rurale.

### 5.3.2. Installations industrielles, commerciales, publiques, militaires et privées

Une autre classe particulièrement touchée est la classe d'installations industrielles, commerciales, publiques, militaires et privées. Celle-ci bien qu'ayant peu d'habitants, sont cependant des installations accueillant souvent une population soit de travailleurs, dans le cas d'installations industrielles, commerciales, militaires et privées, soit de visiteurs dans le cas des installations commerciales. Dès lors, même si cela est difficilement quantifiable, il semble pertinent de s'attarder sur ces valeurs. Celles-ci oscillent entre 4 et 10 degrés en moyenne de plus que la valeur de température rurale. Ce sont des valeurs assez élevées et plus particulièrement dans les centres urbains où cette classe représente souvent des rues commerçantes ou des bureaux. Sachant cela, il est facile d'imaginer que ces milieux en souffrent durant les jours particulièrement chauds. Les climatisations ne faisant que renforcer le phénomène en plus d'induire des pertes économiques.

### 5.3.3. Autres valeurs d'ICU importante

D'autres valeurs comme celles associées aux ports et aéroports sont assez élevées. Cependant la taille des polygones composant ces classes peut amener à des erreurs et rendre l'interprétation plus complexe. Pour les aéroports par exemple, de grandes surfaces d'asphalte amènent la formation d'ICU mais celles-ci peuvent être bordées d'herbe, compensant en partie le réchauffement attendu sur l'ensemble du polygone.

#### 5.3.4. Forêt et végétation herbacée

La classe de forêt est la classe la plus fraîche avec un grand nombre d'éléments et présente sur toutes les villes étudiées. Elle est suivie par la classe de végétation herbacée, présente sur 5 villes. Pour la classe forêt, les valeurs vont de -4 à 3 degrés en moyenne de plus que la valeur de température rurale. Tout comme pour les classes largement artificialisées, le fait de voir ces classes dans les valeurs les plus faibles n'est pas étonnant. La classe forêt regroupe les entités dont la couverture de la canopée est supérieure à 30% avec des arbres supérieurs à 5 mètres. La classe végétation herbacée regroupe les sols dont plus de 50% de la surface est recouverte de végétation mais moins de 30% avec des arbres de plus de 5 mètres. C'est cette définition qui associée au milieu urbain, peut amener des valeurs comme qui semble trop chaudes. En effet, les résultats peuvent paraître élevés pour des classes considérées comme « rafraichissantes ». La tolérance concernant la surface recouverte de ces classes peut amener lors de l'établissement d'une moyenne à des valeurs plus chaudes que ce qui est attendu. De plus il ne faut pas oublier que l'on parle de LST et non pas de température et encore moins de température ressentie.

#### 5.3.5. Eau

La classe eau souffre d'un manque de précision dû à la taille des polygones. Les polygones sont parfois de tailles importantes. Certaines valeurs enregistrées correspondent aux berges et amènent des valeurs supérieures aux valeurs assez basses attendues, faussant les moyennes. Cette classe n'en reste pas moins intéressante car elle possède des valeurs tout de même assez basses dans son ensemble et, comme pour la végétation, a un effet rafraichissant sur la température de l'air. Ces valeurs oscillent entre -4 et 4 degrés en moyenne autour de la température rurale avec cependant des pics pour l'année 2019 à environ 5 degrés en moyenne de plus que la valeur de température rurale. Cet effet devrait être dû à la problématique soulevée plus tôt. Une précision est à apporter concernant cette classe. Celle-ci ne compte que les étendues d'eau supérieures à un hectare. Ainsi les étangs de parc par exemple seront, si leur taille est inférieure à un hectare, enregistrés dans la classe d'espace vert urbain.

#### 5.3.6. Espace vert urbain

Cette même classe fait partie aussi des points de fraîcheur observés pour certaines villes. Les valeurs moyennes sont entre 0 et 6 degrés en moyenne de plus que la valeur de température rurale. Cette gamme assez large, comme pour les forêts, peut être due à l'hétérogénéité au sein de la classe. Certaines de ces zones peuvent être des parcs à la végétation dense contrairement

à d'autres remplissant plus une fonction décorative que récréative par exemple le long d'axes routiers.

### 5.3.7. Classes d'occupation du sol non discutées

Les classes restantes ne sont pas sans intérêt mais ne seront pas autant détaillées soit par manque de données permettant d'établir des généralités soit simplement parce que leurs résultats sont ceux attendus sans avoir d'impact conséquent sur la population.

Les classes destinées à l'agriculture enregistrent des valeurs attendues : les pâtures et cultures annuelles enregistrent des valeurs assez faibles pour 2019 et 2020 mais des valeurs plus élevées pour 2018. La sécheresse du mois de juillet 2018 peut avoir mis presque à nu des cultures ou asséchés les pâtures. Ceci est sûrement aussi le cas pour la classe de cultures permanentes.

La classe des milieux humides est de loin la plus fraîche mais est peu représentée. Celle-ci enregistre des valeurs entre -5 et 1 degré en moyenne par rapport à la température rurale.

Les sites de constructions, routes et éléments associés, voies de circulation rapide, chemin de fer et sites sans utilisation particulière sont des classes assez chaudes. Leurs valeurs sont toutes supérieures à la température rurale avec parfois des pics au-dessus des 8 degrés en moyenne de plus que la température rurale.

Les équipements sportifs et de plaisance comme des parcs sont eux aussi soumis aux ICU avec des valeurs 2 et 8 degrés en moyenne de plus que la température rurale. Ceci peut être dû à la nature de ces structures artificielles et qui parfois, pour les terrains de football synthétiques sont des surfaces qui chauffent vites, bien que verts en apparences.

## 5.4. Analyse par villes en fonction de l'occupation du sol

L'objectif de cette section rejoint les objectifs fixés dans la section Objectifs : quelle est la récurrence du phénomène d'ICU et quelle part de la population est impactée par le phénomène. La méthodologie employée pour cette analyse consiste en, pour chaque ville, une première observation concernant les valeurs de LST estimées et la répartition de la population à travers les différentes classes d'occupation. Ensuite, c'est l'occurrence des ICU et la population impactée par ces ICU qui sont discutées.

### 5.4.1. Antwerpen

La zone d'Antwerpen fait 260 kilomètres carrés, compte 530762 habitants (2018) soit une densité de population de 2041 habitants par kilomètre carré.

En prêtant attention au Tableau 4 : Statistiques de la LST chaque année pour chaque ville., la zone de Antwerpen est la zone ayant la valeur de LSTmoy la plus haute pour l'année 2018 et 2019. Aussi, Antwerpen a les valeurs d'écart-type les plus élevées.

Tableau 5 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Antwerpen, d'habitant pour les classes de tissus urbains.

Classe du polygone	Pop [hab]	Pop [%]
Tissu urbain continu (S.L. : > 80%)	339439	63,95
Tissu urbain discontinu dense (S.L. : 50% - 80%)	132467	24,96
Tissu urbain discontinu de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	29905	5,63
Tissu urbain discontinu de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	5807	1,09
Tissu urbain discontinu de densité très faible (S.L. : < 10%)	120	0,02

Cette zone est la deuxième plus peuplée de celles analysées dans le cadre de ce travail et la deuxième plus étendue derrière la zone de Bruxelles. La zone étudiée est majoritairement couverte d'eau, de zones portuaires et des routes (respectivement 19,2%, 17,5% et 15,2%) soit 52% de sa surface totale. Cette surface est peu peuplée (7989 habitants sur l'ensemble des 3 classes, soit 1,5% de la population totale sur la zone d'étude de Antwerpen). La population se trouve dans les classes de tissu urbain. La répartition de la population dans les différentes classes est représentée dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ces différentes classes d'occupation couvrent 15,7% de la surface de la zone de Namur.

La classe avec le plus d'habitants concerne celle de zones bâties avec un degré d'artificialisation de 80% avec 339439 habitants soit 63,95% de la population. En effet, cette classe a une densité de population de 19056 habitants par kilomètre carré (pour une densité sur la zone de 2043 habitants par kilomètre carré). Cette classe est particulièrement touchée par les ICU. En effet,

sur l'ensemble de la population vivant sur cette classe d'habitation, 95% de la population est impactée au minimum deux fois sur les trois années d'étude par des ICU supérieur à 8 degrés Celsius soit 322616 personnes ou 60% de la population sur la zone.

La Figure 21 et la Figure 22 représentent les occurrences des ICU et les mettent en opposition avec la population.

Les ICU supérieurs à 8° Celsius ne couvrent que 3% de la surface totale mais touchent 13,8% de la population chaque année (73321 habitants) ou 78,2% au moins deux années sur trois soit 414938 habitants. Les zones les plus touchées sont le port, des quartiers à usage résidentiel comme celui de Oud-Berchem ou de Seefhoek où des zones d'activités économiques comme celle de Goenenhoek.

Concernant les ICU supérieurs à 6° Celsius, la surface couverte par ceux-ci correspond à 11% de la surface totale soit 29 kilomètres carrés. 50% de la population est touchée par ces ICU chaque année ou 90% au moins deux années. Cela représente une population de 494800 habitants.

Les ICU supérieurs à 3° Celsius mettent en évidence toutes les zones naturellement susceptibles aux ICU : le port au nord, un parc d'activité économique à l'extrême sud et surtout la zone urbaine au centre. Ces ICU touchent 87,4% de la population à travers les 3 années étudiées sur près de 50% du territoire.

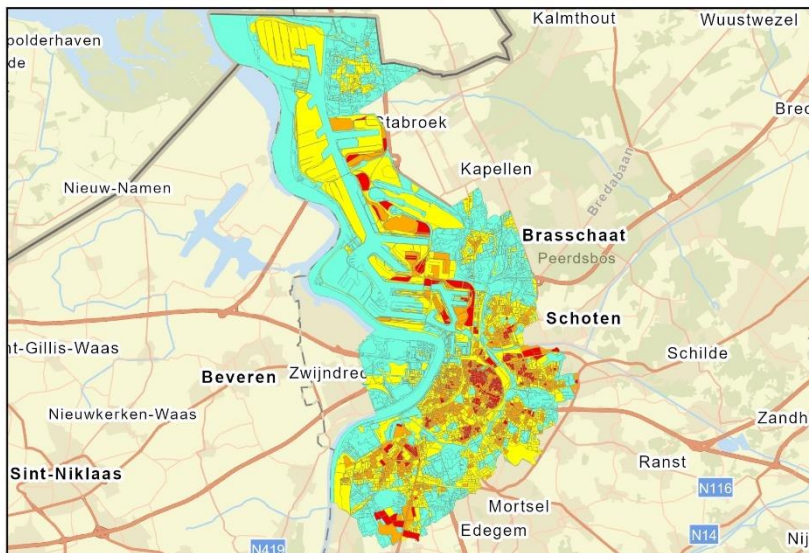


Occupation du sol

Périmètre de la zone de Antwerpen

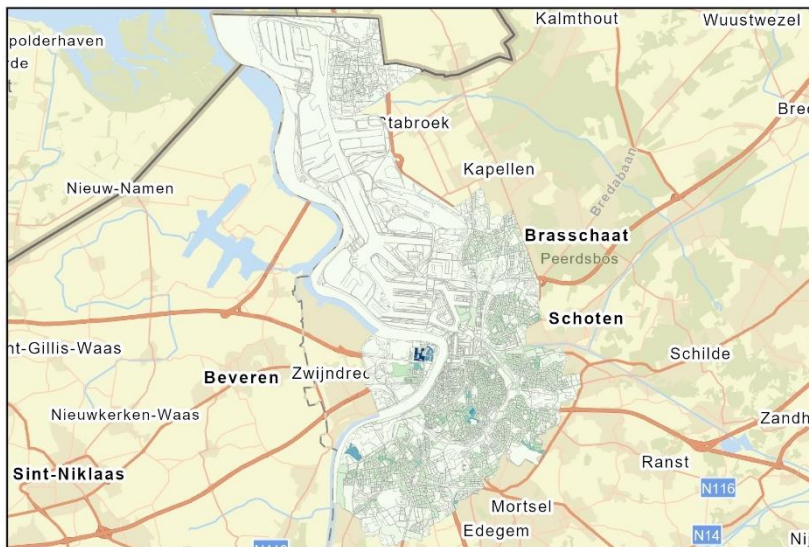


0 2.5 5 10 Km

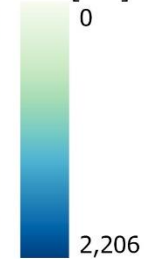


Occurrence des ICU

- < 3 occurrences au dessus de 3°C
- 3 occurrences au dessus de 3°C
- 3 occurrences au dessus de 6°C
- 3 occurrences au dessus de 8°C



Population par polygone en 2018 [hab]



Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community, Sources: Esri, HERE, Garmin, FAO, NOAA, USGS, ©

Figure 21 : Occurrence et répartition de la population pour la ville d'Antwerpen

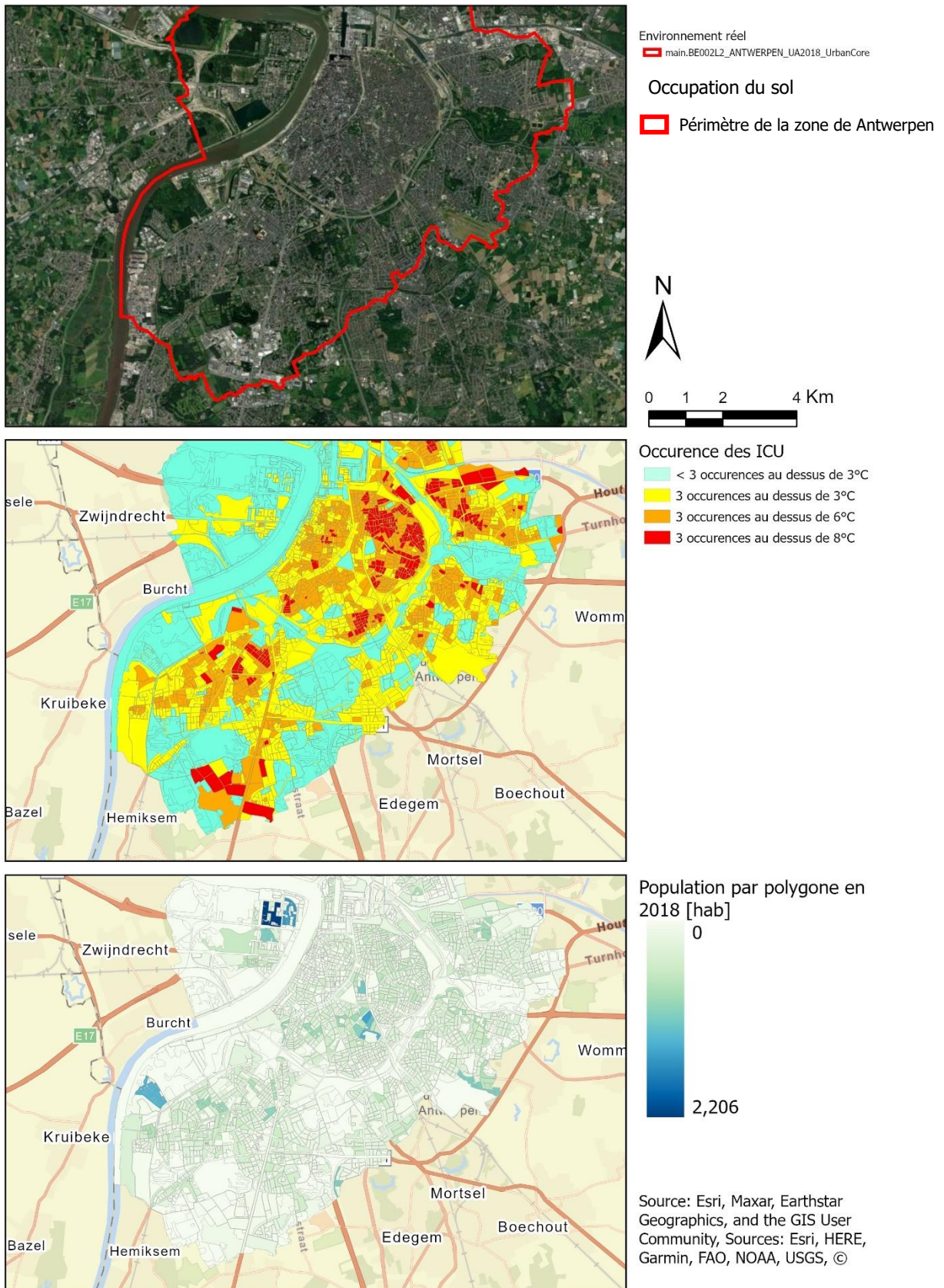


Figure 22 : Occurrence et répartition de la population pour la ville d'Antwerpen (Centre-ville)

## 5.4.2. Bruxelles

La zone de Bruxelles fait 265 kilomètres carrés, compte 1206698 habitants (2018) soit une densité de population de 4554 habitants par kilomètre carré.

En prêtant attention au tableau général, la zone de Bruxelles est la zone ayant la deuxième valeur de LSTmoy la plus haute pour l'année 2018 et 2019 et la plus haute pour 2020.

Cette zone est la plus peuplée de celles analysées dans le cadre de ce travail et la plus étendue. Les classes majoritairement présentes sur la zone étudiée sont les routes (et infrastructures associées), les zones industrielles, commerciales et publiques, et la zone bâtie avec le degré d'artificialisation de 80% (respectivement 37,6%, 10,2% et 9,86%). La première classe citée n'a aucun habitant, la seconde est peu peuplée (26904 habitants), la troisième est la plus peuplée de la zone d'étude avec 723030 habitants soit 60% de la population. 37,4% de la population se trouve dans le reste des zones bâties de degré d'artificialisation inférieur à 80%. La répartition de la population dans ces différentes classes est représentée dans le Tableau 6. Les classes de zones bâties représentent ensemble, une surface de plus de 71 kilomètres carrés soit 26,9% de la surface totale de la zone.

Tableau 6 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Bruxelles, d'habitant pour les classes de tissus urbains.

Classe du polygone	Pop [hab]	Pop [%]
Tissu urbain continu (S.L. : > 80%)	723030	59,92
Tissu urbain discontinu dense (S.L. : 50% - 80%)	300202	24,88
Tissu urbain discontinu de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	105011	8,70
Tissu urbain discontinu de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	43204	3,58
Tissu urbain discontinu de densité très faible (S.L. : < 10%)	2924	0,24

Comme le montre le tableau ci-dessus, l'habitat à Bruxelles a un taux d'artificialisation élevé, et ce particulièrement dans le centre-ville où cet habitat est contigu à d'autres fonctions dont le taux d'artificialisation est important comme des bureaux ou des rues commerçantes.

La Figure 23 représente les occurrences des ICU et les met en opposition avec la population.

Les ICU supérieurs à 8° Celsius ne couvrent que 4,6% de la surface totale mais touchent 15,7 % de la population chaque année (189738 habitants) ou 62,6% au moins deux années sur trois soit 755621 habitants. Les zones les plus touchées sont les abords du canal de Bruxelles, l'entrée sud de Bruxelles et le parc industriel adjoint. Enfin, des groupements de polygones peuvent se

retrouver sur l'ensemble de la zone correspondant à de grands parkings, du tissu urbain continu dense, des buildings, etc.

Les ICU supérieurs à 6° Celsius sont présents sur 14% de la surface. Cependant, c'est 48% de la population qui est touchée par ces ICU chaque année ou 84% au moins deux années. Cela représente une population de plus d'un million d'habitants dans le second cas.

Les ICU supérieurs à 3° Celsius sont présents sur 70% du territoire étudié. C'est 86% de la population qui est impactée chaque année par le phénomène le plus faible ou 97% au moins deux fois sur les trois années. Aussi il faut savoir que presque 15% de la surface de la zone est couverte par des zones vertes urbaines ou des forêts. Les zones les moins impactées sont donc la forêt de Soigne, les communes de Uccle et Watermael-Boitsfort au sud. La commune de Woluwe-Saint-Pierre à l'est. L'extrême ouest de la zone et une zone de grande taille au nord qui correspond au parc de Laeken.

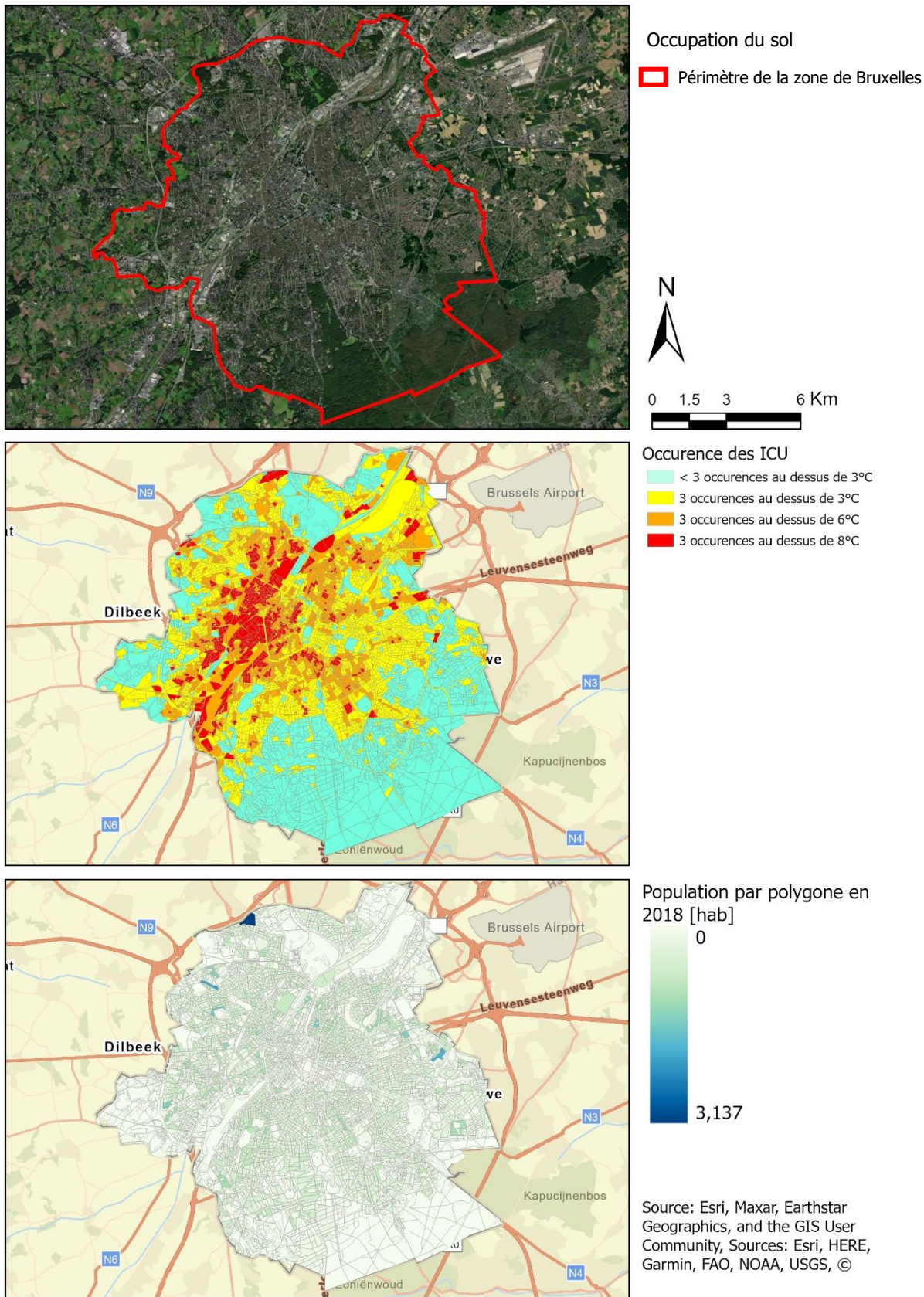


Figure 23 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Bruxelles

### 5.4.3. Charleroi

La zone de Charleroi fait 145 kilomètres carrés, compte 205396 habitants (2018) soit une densité de population de 1417 habitants par kilomètre carré.

En prêtant attention au tableau général, la zone de Charleroi est la zone ayant la deuxième valeur de LSTmoy la plus faible pour l'année 2018 et est proche de la moyenne pour les deux autres années.

Les classes majoritairement présentes sur la zone étudiée sont les routes (et infrastructures associées), la forêt et la zone bâtie avec le degré d'artificialisation de 80% à 50% (respectivement 19,4%, 13,7% et 12%). Les deux premières classes citées n'ont aucun habitant, la troisième est la plus peuplée de la zone d'étude avec 92991 habitants soit 45,3% de la population. La répartition de la population dans les différentes classes de zones bâties est représentée dans le Tableau 7. Les classes de zones bâties représentent ensemble, une surface de plus de 41,5 kilomètres carrés soit 28,6% de la surface totale de la zone.

Tableau 7 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Charleroi, d'habitant pour les classes de tissus urbains

Classe du polygone	Pop [hab]	Pop [%]
Tissu urbain continu (S.L. : > 80%)	47982	23,36
Tissu urbain discontinu dense (S.L. : 50% - 80%)	92991	45,27
Tissu urbain discontinu de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	51499	25,07
Tissu urbain discontinu de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	5043	2,46
Tissu urbain discontinu de densité très faible (S.L. : < 10%)	77	0,04

Comme le montre le tableau ci-dessus, l'habitat à Charleroi est majoritairement composé de zones bâties avec un degré d'artificialisation entre 50% et 80%. Près de 98% de la population vit sur un sol avec une artificialisation supérieure à 30%.

La Figure 24 représente les occurrences des ICU et les met en opposition avec la population.

Les ICU supérieurs à 8° Celsius ne couvrent que 4,4% de la surface totale et touchent 7,5 % de la population chaque année (15480 habitants) ou 20% au moins deux années sur trois soit 40840 habitants. Les zones les plus touchées sont principalement des zones industrielles comme les grands polygones visibles au nord et à l'ouest de la zone ainsi que plusieurs groupements de polygones de zones bâties fortement artificialisées et des zones industrielles.

Les ICU supérieurs à 6° Celsius sont présents sur 14% de la surface. C'est 32,8% de la population qui est touchée par ces ICU chaque année. Il faut savoir que 85% de la population

de la zone est touchée par des ICU faibles sur les trois années mais seulement 50% de la population est touchée par des ICU moyens au moins deux années sur trois.

Les ICU supérieurs à 3° Celsius sont présents sur 58,8% du territoire étudié. C'est 86% de la population qui est impactée par ce phénomène chaque année. (93% au moins deux fois sur les trois années). Aussi il faut savoir que presque 32% de la surface de la zone est couverte par des forêts, des zones vertes urbaines, des pâtures et des cultures.

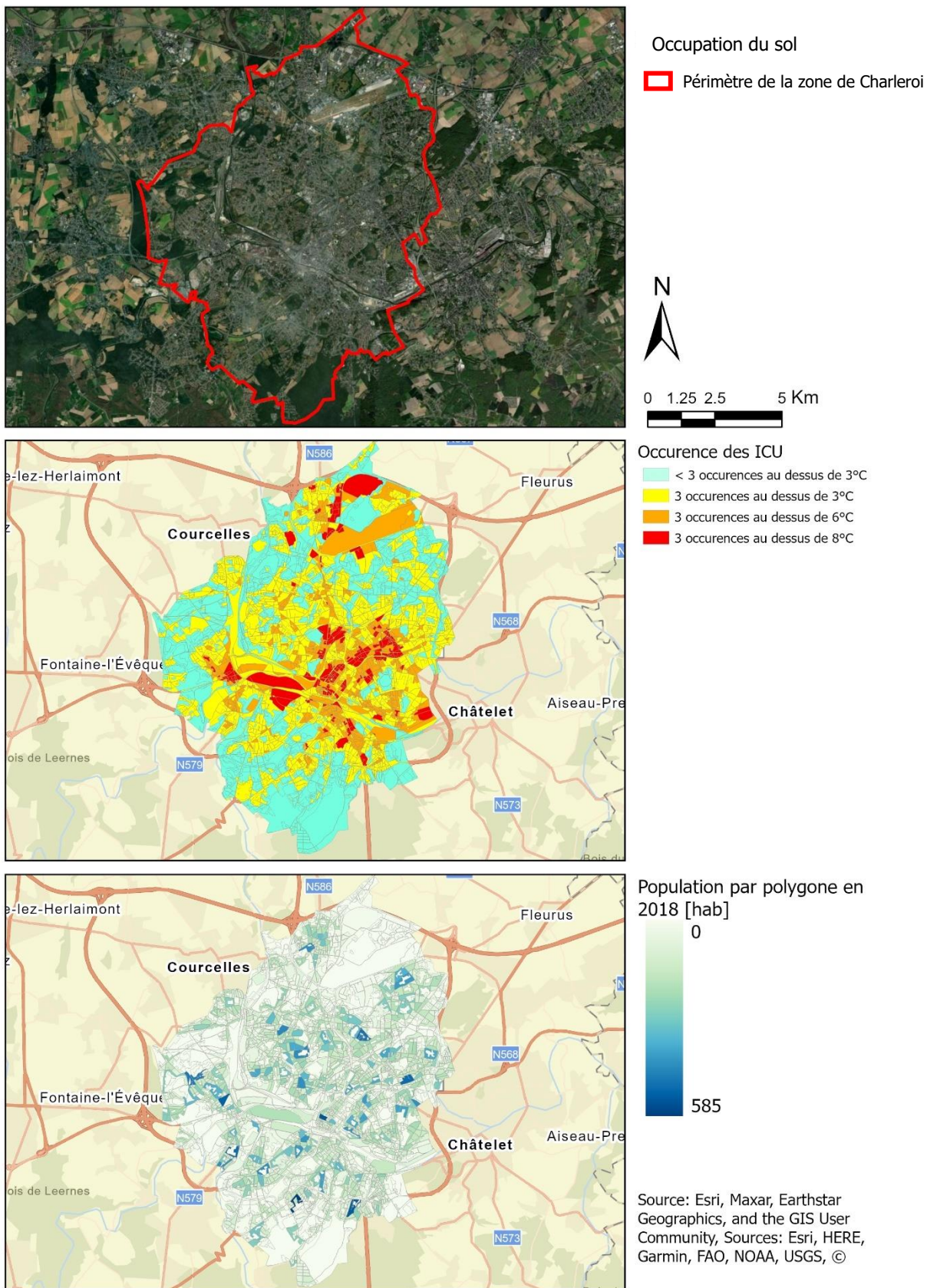


Figure 24 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Charleroi

#### 5.4.4. Leuven

La zone de Leuven fait 79 kilomètres carrés, compte 103065 habitants (2018) soit une densité de population de 1305 habitants par kilomètre carré.

En prêtant attention au tableau général, la zone de Leuven a une valeur particulièrement chaude pour 2018.

Les classes majoritairement présentes sur la zone étudiée sont les champs, les forêts et enfin les routes (et infrastructures associées) avec respectivement 17,9%, 16,8% et 14,1%. Ces classes ne sont pas ou peu peuplées.

La répartition de la population dans les différentes classes de zones bâties est représentée dans le Tableau 8. Les classes de zones bâties représentent ensemble, une surface de plus de 19 kilomètres carrés soit 24,5% de la surface totale de la zone.

*Tableau 8: Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Leuven, d'habitant pour les classes de tissus urbains*

Classe du polygone	Pop [hab]	Pop [%]
Tissu urbain continu (S.L. : > 80%)	22147	21,49
Tissu urbain discontinu dense (S.L. : 50% - 80%)	34937	33,90
Tissu urbain discontinu de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	25808	25,04
Tissu urbain discontinu de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	13572	13,17
Tissu urbain discontinu de densité très faible (S.L. : < 10%)	1796	1,74

Comme le montre le tableau ci-dessus, l'habitat sur la zone de Leuven est caractérisé par une artificialisation du sol plutôt élevée. En effet, près de 55% de la population vit sur un sol avec une artificialisation supérieure à 50% soit 57084 habitants.

La Figure 25 représente les occurrences des ICU et les met en opposition avec la population.

Les ICU supérieurs à 8° Celsius ne couvrent que 1,8% de la surface totale. C'est le deuxième plus petit pourcentage après la ville de Namur. Cela est probablement dû à l'environnement rural et peu dense qui est au bord de la ville. Cependant, contrairement à ce que la surface laisse penser, c'est 43% de la population qui est touchée au moins 2 années sur les trois étudiées soit 44444 habitants. Les zones les plus touchées sont essentiellement le centre de Leuven et principalement les abords de la gare. D'autres groupements de polygones de zones industrielles sont impactés sur la zone d'étude notamment au sud.

Les ICU supérieurs à 6° Celsius sont présents sur 8,76% de la surface. C'est 28,4% de la population qui est touchée par ces ICU chaque année ou 73% au moins deux années sur trois.

Les ICU supérieurs à 3° Celsius sont présents sur 47.1% du territoire étudié. Cependant, c'est 85% de la population qui est impactée par ce phénomène pour chaque année étudiée. (96% au moins deux fois sur les trois années). Aussi il faut savoir que la zone est couverte assez largement par des pâtures, des cultures et des forêts (41,8% de la zone).

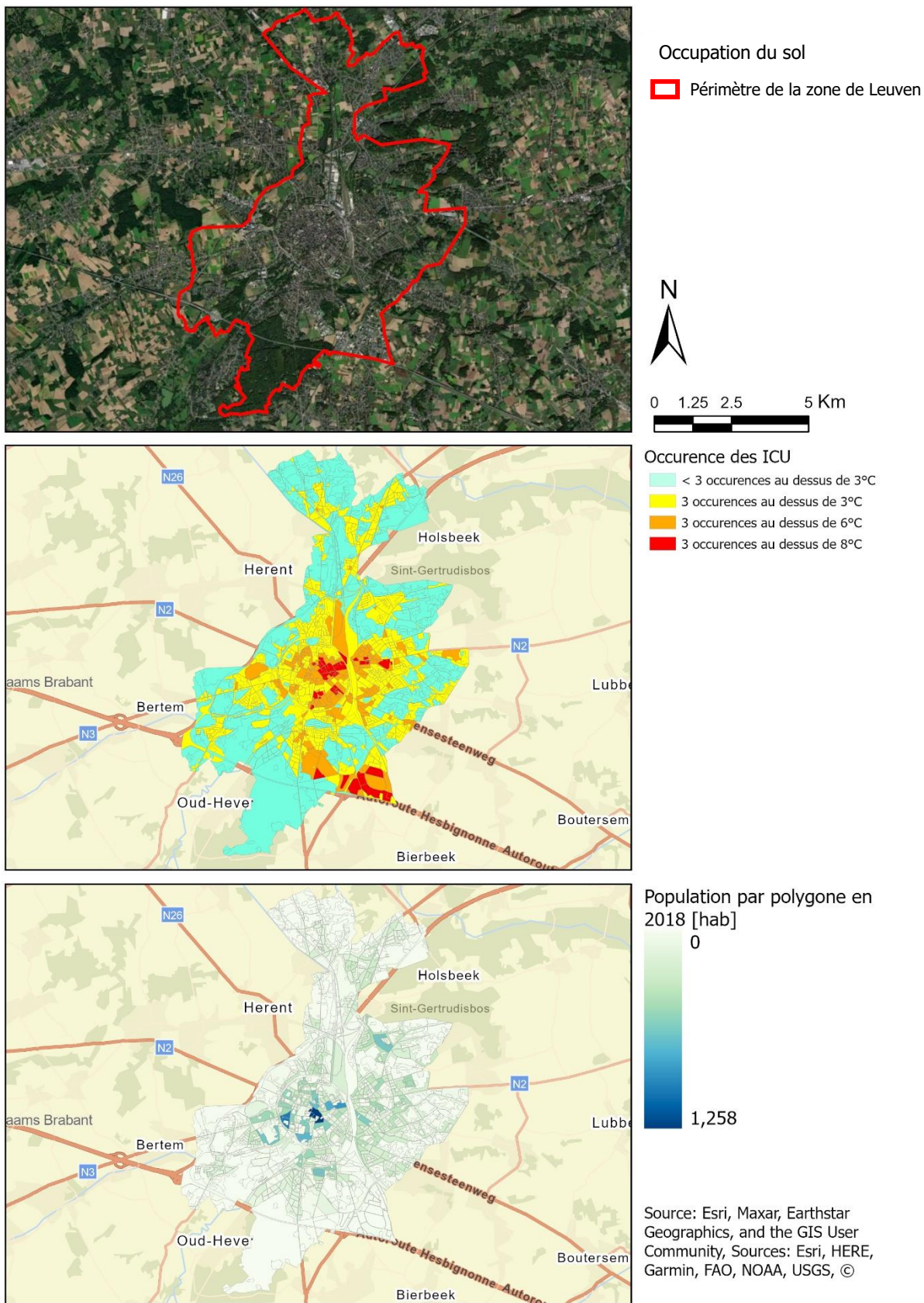


Figure 25 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Leuven

### 5.4.5. Liège

La zone de Liège fait 245 kilomètres carrés, compte 389012 habitants (2018) soit une densité de population de 1588 habitants par kilomètre carré.

En prêtant attention au tableau général, la zone de Liège est la zone ayant la valeur de LSTmoy la plus faible pour l'année 2018 et se situe dans les villes les plus fraîches pour les deux autres années.

Les classes majoritairement présentes sur la zone étudiée sont la forêt, les routes (et infrastructures associées), et enfin les champs (respectivement 16,4%, 15,7% et 12%). Ces classes ne sont pas ou peu peuplées.

La répartition de la population dans les différentes classes de zone bâtie est représentée dans le Tableau 9. Les classes de zones bâties représentent ensemble, une surface de plus de 58 kilomètres carrés soit 23,8% de la surface totale de la zone.

*Tableau 9: Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Liège, d'habitant pour les classes de tissus urbains*

Classe du polygone	Pop [hab]	Pop [%]
Tissu urbain continu (S.L. : > 80%)	121886	31,33
Tissu urbain discontinu dense (S.L. : 50% - 80%)	144453	37,13
Tissu urbain discontinu de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	82964	21,33
Tissu urbain discontinu de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	18435	4,74
Tissu urbain discontinu de densité très faible (S.L. : < 10%)	1882	0,48

Comme le montre le tableau ci-dessus, l'habitat à Liège est caractérisé par une artificialisation du sol plutôt élevée. En effet, près de 68% de la population vit sur un sol avec une artificialisation supérieure à 50% soit 266339 habitants.

La Figure 26 représente les occurrences des ICU et les met en opposition avec la population.

Les ICU supérieurs à 8° Celsius ne couvrent que 3,5% de la surface totale. Cependant, cela représente 11,4% de la population (44272 habitants) ou 20% au moins deux années sur trois soit 78452 habitants. Les zones les plus touchées sont principalement le centre de Liège, Outremeuse, Amercoeur et Longdoz. D'autres groupements de polygones de zones bâties fortement artificialisées et des zones industrielles sont impactés sur la zone d'étude.

Les ICU supérieurs à 6° Celsius sont présents sur 10,2% de la surface. C'est 33,6% de la population qui est touchée par ces ICU chaque année. 46% de la population est touchée par des ICU supérieurs à 6° Celsius au moins deux années sur trois.

Les ICU supérieurs à 3° Celsius sont présents sur 43.1% du territoire étudié. Cependant, 81% de la population est impactée par ce phénomène chaque année. (91% au moins deux fois sur les trois années). Aussi il faut savoir que presque 39% de la surface de la zone est couverte par des forêts, des zones vertes urbaines, des pâtures et des cultures.

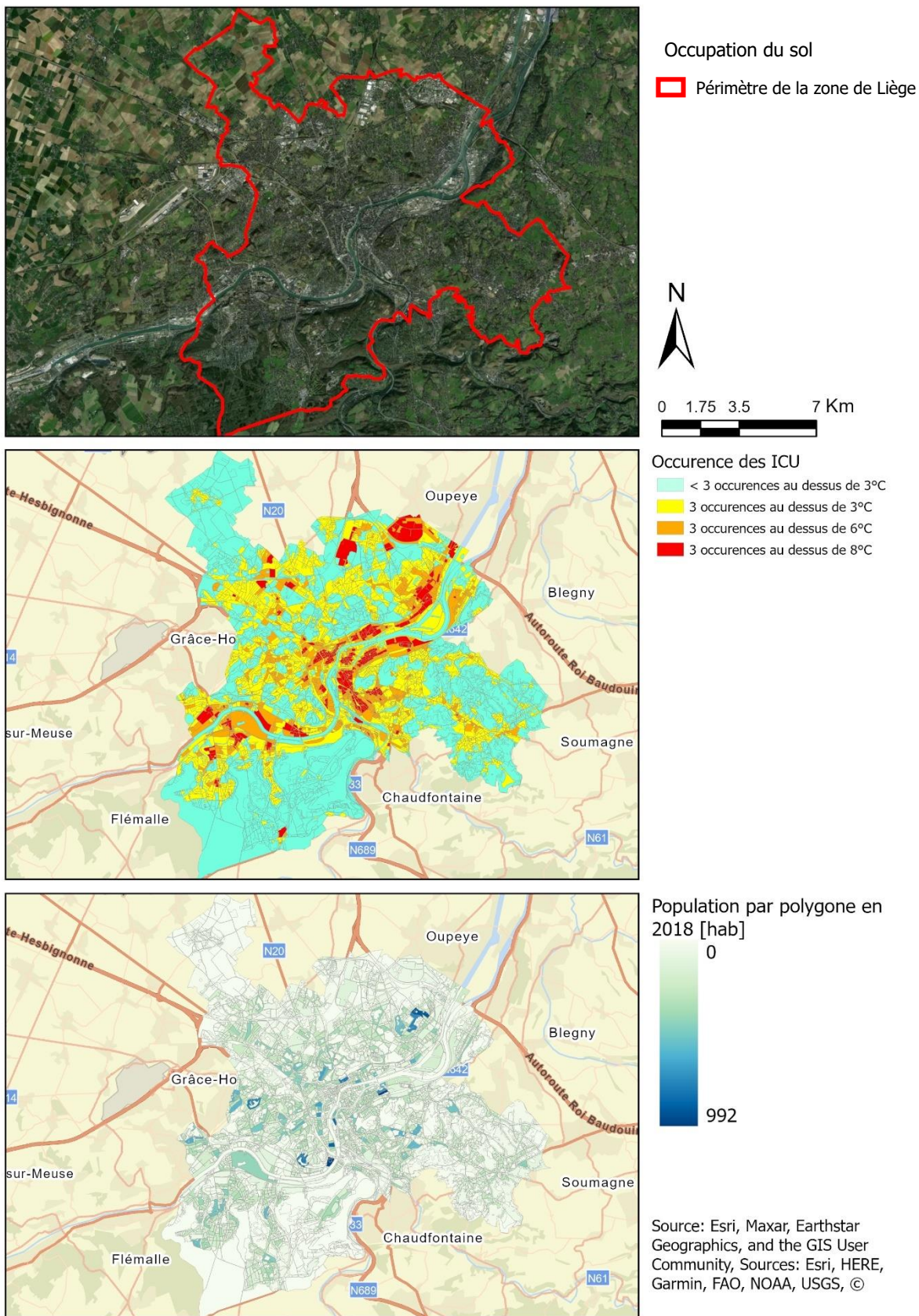


Figure 26 : Occurrence et répartition de la population impactée pour la ville de Liège

#### 5.4.6. Namur

La zone de Namur fait 233 kilomètres carrés, compte 113180 habitants (2018) soit une densité de population de 486 habitants par kilomètre carré.

En prêtant attention au tableau général, la zone de Namur est la zone ayant la valeur de LSTmoy la plus faible pour l'année 2019 et 2020.

Cette zone est la moins peuplée de celles analysées dans le cadre de ce travail et la quatrième plus grande. La zone étudiée est majoritairement couverte de forêts, cultures et pâturages (respectivement 26,5%, 25,5% et 12,9%) soit 64,9% de la surface totale de la zone. Cette surface est peu peuplée (2732 habitants sur l'ensemble des 3 classes soit 2,4% de la population totale sur la zone d'étude de Namur). La population se trouve évidemment dans les classes de tissu urbain. La répartition de la population dans ces différentes classes est représentée dans le Tableau 10. Ces différentes classes d'occupation couvrent 15,3% de la surface de la zone de Namur.

Tableau 10 : Nombre d'habitant et pourcentage, sur la zone de Namur, d'habitant pour les classes de tissus urbains.

Classe du polygone	Pop [hab]	Pop [%]
Tissu urbain continu (S.L. : > 80%)	15497	13,69
Tissu urbain discontinu dense (S.L. : 50% - 80%)	22988	20,31
Tissu urbain discontinu de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	32248	28,49
Tissu urbain discontinu de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	32552	28,76
Tissu urbain discontinu de densité très faible (S.L. : < 10%)	3845	3,40

Les classes avec le plus d'habitant concernent des densités faibles d'artificialisation (entre 10% et 50% de la surface) et correspondent à de nombreux logements souvent avec jardin (principalement des maisons 4 façades ou mitoyennes).

Il ne faut cependant pas négliger la classe de densité élevée puisqu'une fraction non négligeable de la population s'y trouve et que cette catégorie est la plus vulnérable au phénomène d'ICU.

La Figure 27 représente les occurrences des ICU et les met en opposition avec la population.

L'occurrence des ICU supérieurs à 8° Celsius montre que le centre historique est fortement soumis aux ICU, ainsi d'autres polygones, plus marginaux. En effet, ils représentent 0,55% de la surface soit 1,3 km<sup>2</sup>. Deux zones principales y sont exposées : le centre historique et le quartier de gare. Ensuite, ce sont certains polygones en dehors du centre qui sont exposés, pour

la majorité des zones industrielles ou commerciales. Dans le centre historique, ce sont des zones commerciales et d'habitat dense qui sont exposées.

Les ICU supérieurs à 6° Celsius sont présents sur 2,3% de la zone soit 5,4 km<sup>2</sup>. Ces zones correspondent en plus de celles présentées précédemment, à des zones industrielles, de transport et d'habitat dense. Jambes devient d'ailleurs un nouveau pôle d'ICU. Ceci se confirme avec les ICU faibles.

Au total, c'est 11,3% de la surface de la zone soit 26,5 km<sup>2</sup> qui est soumise au phénomène d'ICU supérieur à 3° Celsius pour chaque année étudiée. Globalement, ce sont Jambes et Namur qui sont entièrement touchés en plus d'autres plus petites entités comme Bouge, Comognes, Erpent, Flawinne et Belgrade. Ceci inclut 62% de la population soit plus de 70 000 personnes.

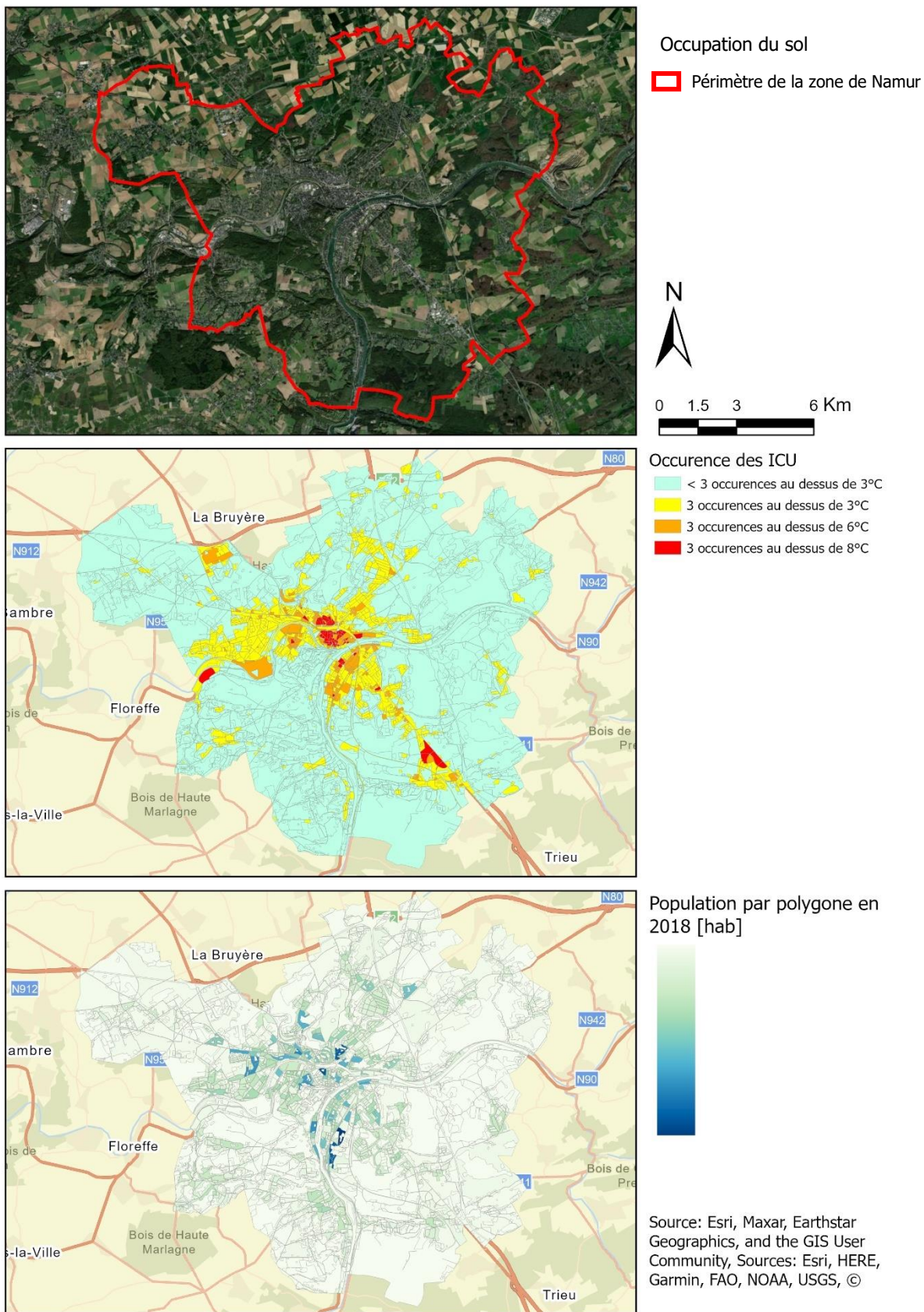


Figure 27 : Occurrence et répartition de la population pour la ville de Namur

## 5.5. Analyse croisée en fonction de la localisation

À travers cette section, l'objectif va être de rendre compte de similarités et de différences notables entre les différentes localisations selon les années.

Concernant les températures enregistrées, certaines tendances se dessinent déjà. Bruxelles et Antwerpen sont les villes les plus chaudes en moyenne. Sachant que celles-ci possèdent la plus grande partie de leur population dans des tissus urbains denses, il est aisé d'imaginer les conséquences qui en découlent. De fait, pour Antwerpen et Bruxelles, c'est respectivement 78,2% et 62,6% de la population qui est touchée au moins deux années sur trois par des ICU supérieurs à 8°C.

Ces résultats sont en opposition aux résultats obtenus pour les villes de Charleroi, Liège et Namur dont le pourcentage d'habitants touchés au moins deux années sur trois par des ICU supérieurs à 8°C est plus proche des 20%. Leuven est entre ces deux groupes avec 43,1% de la population touchée.

Le tableau ci-dessous reprend la surface touchée par les ICU et le pourcentage de la surface totale de la zone touchée pour chaque catégorie d'ICU en considérant une occurrence de trois années sur les trois années étudiées. Ces résultats renforcent les premières analyses réalisées sur les différentes villes : Antwerpen et Bruxelles, en plus d'enregistrer les valeurs moyennes les plus hautes, ont les plus grandes surfaces touchées. À l'inverse, Namur et Leuven ont une part de leur surface totale touchée (en valeur en kilomètre carré) par les ICU moindre par rapport aux autres villes étudiées.

Tableau 11 : Surface en fonction des catégories d'ICU

Ville	ICU supérieur à 3°C		ICU supérieur à 6°C		ICU supérieur à 8°C	
	Surface [km <sup>2</sup> ]	Surface [%]	Surface [km <sup>2</sup> ]	Surface [%]	Surface [km <sup>2</sup> ]	Surface [%]
Antwerpen	126,19	48,58	28,83	11,10	7,98	3,07
Bruxelles	185,17	69,89	37,43	14,13	12,37	4,67
Charleroi	85,45	58,80	20,48	14,09	6,43	4,42
Liège	105,56	43,07	25,12	10,25	8,56	3,49
Leuven	37,14	47,12	6,90	8,76	1,45	1,84
Namur	26,41	11,31	5,45	2,33	1,30	0,56

Le Tableau 12 reprend la répartition de la population dans les différentes classes d'occupation du sol. Les constats des paragraphes précédents peuvent être mis en lien direct avec l'occupation du sol. Comme présenté dans la section Influence de l'occupation du sol, les tissus urbains sont victimes des ICU en fonction de leur pourcentage de surface artificialisée.

Antwerpen et Bruxelles, dont une part importante de la population était touchée par les ICU, ont respectivement 64% et 60% de leur population logée dans le tissu urbain continu, soit dans la catégorie la plus vulnérable. Dès lors, il est peu étonnant de voir une part de la population aussi importante souffrir de ce phénomène au moins deux années sur trois. À l'inverse, Namur, la ville la moins victime des ICU est, quant à elle, la ville dont le pourcentage de population vivant dans les tissus urbains denses est le plus faible.

Tableau 12 : Pourcentage de la population en fonction des classes d'occupation.

	Antwerpen	Bruxelles	Charleroi	Liège	Leuven	Namur
Tissu urbain continue (S.L. : > 80%)	63,95	59,92	23,36	31,33	21,49	13,69
Tissu urbain discontinue dense (S.L. : 50% - 80%)	24,96	24,88	45,27	37,13	33,90	20,31
Tissu urbain discontinue de densité moyenne (S.L. : 30% - 50%)	5,63	8,70	25,07	21,33	25,04	28,49
Tissu urbain discontinue de densité faible (S.L. : 10% - 30%)	1,09	3,58	2,46	4,74	13,17	28,76
Tissu urbain discontinue de densité très faible (S.L. : < 10%)	0,02	0,24	0,04	0,48	1,74	3,40
Autres	4,34	2,68	3,80	4,98	4,66	5,35

Dans le tableau ci-dessous, la population touchée par les différents ICU est représentée afin de rendre compte des affirmations du paragraphe précédent. Au total, c'est 334.450 habitants qui sont touchés par le phénomène d'ICU supérieur à 8°C. Ces chiffres sont, particulièrement pour Bruxelles et Antwerpen, non négligeables par la taille de la population touchée.

Tableau 13 : Population impactée par les différentes catégories d'ICU en nombre d'habitant et ramener sur le nombre total de la ville

Ville	ICU supérieur à 3°C		ICU supérieur à 6°C		ICU supérieur à 8°C	
	Population [hab]	Population [%]	Population [hab]	Population [%]	Population [hab]	Population [%]
Antwerpen	463793	87,38	268105	50,51	73321	13,81
Bruxelles	1039496	86,14	574590	47,62	189738	15,72
Charleroi	176269	85,82	67477	32,85	15480	7,54
Liège	313866	80,68	130703	33,60	44272	11,38
Leuven	87977	85,36	29288	28,42	5113	4,96
Namur	70621	62,40	19836	17,53	6526	5,77

## 5.6. Discussion

L'objectif de ce mémoire consistait à calculer l'ampleur et l'amplitude des ICU. Au regard des résultats présentés et de l'analyse effectuée, certaines interprétations peuvent être tirées tant sur la cartographie des ICU, sur l'utilisation de l'Atlas Urbain ou sur l'impact sur la population.

La cartographie des ICU dans les différentes villes semble être un bon moyen de mettre en avant des îlots régulièrement victimes des ICU ou à l'inverse, des zones de la ville plus fraîches. De plus, la cohérence entre les résultats et la littérature quant au type d'occupation du sol, vient confirmer la pertinence de la cartographie des ICU. Les zones pressenties comme soumises au phénomène d'ICU comme les centres urbains, les pôles d'activité économique ou d'activité industrielle, ou les sols artificialisés sont les zones dont la LST moyenne est la plus haute. Ce constat et la facilité d'accès des données rendent la méthodologie aisée à reproduire pour d'autres villes.

La méthodologie permettant de compter l'occurrence des ICU est assez simpliste mais semble donner des résultats cohérents. Certains polygones sont sûrement dans une catégorie d'occurrence peu représentative, comme un polygone ayant deux occurrences supérieures à huit degrés et une inférieure à trois degrés qui sera considéré dans la catégorie une. Cependant c'est pour pallier à cela que lors de l'analyse, était aussi pris en compte les occurrences sur deux années sur trois.

L'Atlas urbain est au centre de cette même méthodologie. Celui-ci est un atout mais fixe aussi certaines limites de la méthode. En effet, sa résolution et la formation des polygones montrent certaines limites concernant soit la compréhension de ce qui se trouve sous le polygone, sur le terrain, soit l'interprétation de résultats sur certains polygones.

La première limite évoquée vient de la définition parfois assez large de certaines classes d'occupation. Celles-ci mettent à mal l'interprétation sur de larges échantillons avec des différences marquées entre des polygones de la même classe. Cette différence induit une variation des valeurs entre les polygones qui, dans le cadre de l'étude des ICU, peut s'avérer problématique et plus spécifiquement dans l'analyse des classes d'occupation du sol. Dans le cadre de ce travail cela a été le cas par exemple pour les classes amenant un rafraîchissement comme les classes eau, forêts et espaces verts urbains.

La seconde limite évoquée est liée à la résolution même de l'Atlas Urbain et à l'utilisation de polygones. Les polygones ont des tailles pouvant aller de 500 mètres carrés à plusieurs milliers

d'hectares. Pour les petits polygones, certaines déformations peuvent être observées pour remplir les contraintes initiales du modèle comme la largeur de minimum 10 mètres d'un polygone. Les grands polygones, quant à eux, peuvent être hétérogènes en leur sein avec des gammes de valeurs de LST de plus de 10 degrés et des valeurs de déviation standard 2 à 3 fois plus élevées que celle de plus petits polygones.

Concernant les surfaces touchées par le phénomène d'ICU, comme cela a été montré dans l'analyse de chaque ville et dans l'analyse croisée, celles-ci sont non négligeables pour les villes les plus touchées. Au total, sur les six villes étudiées, c'est une surface de 125 kilomètres carrés qui est soumise au ICU supérieur à 6°C. La ville de Bruxelles est victime sur 4,67% de son territoire d'ICU supérieur à 8°C soit 12,37 kilomètres carrés.

Les résultats qui concernent les surfaces doivent cependant être pris avec un certain recul. La délimitation des villes est basée entre autres sur des entités administratives comme les communes. Ces entités sont parfois de tailles assez variables comme Namur et Leuven qui ont des surfaces touchées relativement similaires mais qui, ramenées à la surface totale, sont différentes.

Concernant la population impactée, le premier élément qui saute aux yeux est la taille de la population touchée pour certaines villes comme Antwerpen et Bruxelles. En termes de pourcentage, ces résultats sont inquiétants pour toutes les raisons évoquées dans l'état de l'art : l'impact sur la mortalité et sur l'économie, la boucle de rétroaction positive due à la production additionnelle de chaleurs, l'impact sur l'environnement urbain. En termes de valeurs brutes, les résultats montrent que rien que pour les six villes étudiées dans ce travail, ce sont près de 1,36 million de personnes qui sont exposées au phénomène d'ICU supérieur à 8°C au moins deux années sur trois soit plus de 50% de la population de ces six villes réunies ou 334.450 habitants les trois années.

Ces valeurs doivent cependant être prises avec un certain recul.

D'abord, bien que la LST soit corrélée à la température de l'air, d'autres facteurs peuvent entrer en compte. Aussi, ces chiffres se basent sur les données de population mais ne prennent pas en considération la population se déplaçant vers ces villes en journée. La classe d'installations industrielles, commerciales, publiques, militaires et privées est une classe ayant une faible valeur de population mais dont les valeurs de LST moyennes sont dans les plus hautes enregistrées. Ces centres d'activité économique, usine, caserne peuvent amener quant à eux une population importante de travailleuses et travailleurs en journée.

## Conclusions et perspectives

Au terme de ce travail, il convient de reconsidérer les étapes ayant permis de réaliser celui-ci, les différentes conclusions tirées et les perspectives envisagées si, de ce travail, il devait exister une suite.

L'urgence climatique et l'augmentation du nombre de vagues de chaleur présagent une augmentation de l'intensité du phénomène d'ICU. C'est pour cela que certaines villes comme la ville de Liège prennent les devants avec la création de plans visant à endiguer le phénomène.

Ce mémoire se base sur plusieurs dates qui correspondent à des vagues de chaleur sur le territoire belge. Les villes étudiées ont quant à elle été succinctement décrites afin de rendre compte de leurs différences.

À l'aide de l'outil LANDARTs, une estimation de la LST a été réalisée. Celle-ci a permis de calculer les ICU selon leur définition en calculant la température du milieu rural. La cartographie des ICU pour chaque ville étudiée se basant sur la LST a permis de mettre en évidence les points chauds en journée et l'étendue de ceux-ci. Ceci permet de voir que l'observation du phénomène est réalisable sur base de données en libre accès comme les images de Landsat 8 et le programme LANDARTs. Cette observation est cependant limitée par la résolution de son image qui limite l'interprétation de certains éléments ou occulte certains effets comme celui de l'ombre. Il est à noter cependant que c'est au total, sur les six villes étudiées, une surface de 125 kilomètres carrés qui est soumise au ICU supérieur à 6°C sur les trois années étudiées.

Dans un second temps, les ICU ont été mis en relation directe avec l'occupation du sol et la population. Cette relation a montré d'abord le lien fort entre l'occupation du sol et l'intensité des ICU. Les données obtenues grâce à l'Atlas Urbain sont riches en information et permettent la réalisation de premières analyses. Afin de faciliter la lecture des résultats, les ICU ont été regroupés dans différentes catégories correspondantes à un dépassement d'une certaine température. Ceci a permis d'étudier la part de la population impactée par le phénomène d'ICU tout en donnant déjà une valeur à l'intensité du phénomène.

Les résultats montrent qu'une part importante de la population des villes est impactée par le phénomène. Près de 335.000 habitants sont exposés à un phénomène dont la valeur est 8° Celsius au-dessus de la température du milieu rural. Pour certaines villes, le résultat est d'autant plus alarmant que c'est près de 15% de leur population qui est impactée. Cette population réside

en grande partie dans des zones largement artificialisées comme les centres urbains ou y travaille dans le cas des centres d'activité économique.

Dès lors, le plan canopée suggéré par la ville de Liège mais aussi par d'autres villes de Belgique sous des formes différentes prend tout son sens. La réduction des ICU par l'utilisation de surfaces absorbantes moins les rayons du soleil et l'ajout de zones rafraichissantes sont des solutions à cette problématique qui touche de plus en plus de villes et impact la santé humaine mais aussi la faune et la flore.

En conclusion, les outils utilisés semblent répondre effectivement aux questions de ce mémoire. L'étendue et la récurrence du phénomène d'ICU ont été mesurées ainsi que la part de la population touchée.

Cependant, les perspectives du sujet et du mémoire en particulier sont nombreuses. En effet, la caractérisation des ICU réalisée dans ce travail peut être approfondie sur bien des points : améliorer l'analyse quant à la population touchée ; réaliser le même travail afin de caractériser le phénomène d'ICU de nuit ; mesurer l'impact des polygones plus frais sur les plus chauds ; caractériser l'influence du bâti ; améliorer la cartographie des ICU.

En effet, réaliser une étude centrée essentiellement sur la population permettrait de rendre compte de la part de la population touchée qui pourrait être à risque. Ce type d'étude pourrait mettre en évidence des classes d'âge mais aussi voir s'il y a une influence du revenu, ou d'autres facteurs.

Le phénomène d'ICU de nuit est aussi un problème dans les grandes villes. Mettre en évidence les ICU de nuit et les mettre en lien avec ceux de jour permettrait de voir quelles zones restent encore chaudes malgré le coucher du soleil.

Une analyse concernant l'influence de la proximité de polygones plus frais par rapport à certains polygones plus chauds permettrait de rendre compte de l'effet rafraichissant de certaines classes d'occupation du sol. De la même façon, une recherche plus approfondie sur l'influence de la structure bâtie pourrait permettre d'adapter plus facilement les solutions à la disposition des villes comme les plans canopées.

Enfin, la méthode permettant de déterminer les ICU se base sur des paramètres, pour certains, arbitrairement choisis. Ces paramètres pourraient être calculés à l'aide d'outils informatiques afin d'en trouver une valeur optimale et au plus proche de la réalité.

## Bibliographie

- Abeli, T., Mondoni, A., Graziano, R., & Orsenigo, S. (2014). Effects of summer heat waves on Europe's wild flora and vegetation. *Agrochimica, LVIII*, 128-132.
- Adulkongkaew, T., Satapanajaru, T., Charoenhirunyingyos, S., & Singhirunnusorn, W. (2020). Effect of land cover composition and building configuration on land surface temperature in an urban-sprawl city, case study in Bangkok Metropolitan Area, Thailand. *Heliyon, 6*(8), e04485. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04485>
- Antoine, R., & Lopez, T. (s. d.). *Télédétection dans l'infrarouge thermique*. 48.
- Arifwidodo, S., & Chandrasiri, O. (2015). Urban Heat Island and Household Energy Consumption in Bangkok, Thailand. *Energy Procedia, 79*, 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.461>
- Azevedo, J., Chapman, L., & Muller, C. (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. *Remote Sensing, 8*(2), 153. <https://doi.org/10.3390/rs8020153>
- Charleroi. (2022). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Charleroi&oldid=196299464>
- Choi, Y., Lee, S., & Moon, H. (2018). Urban Physical Environments and the Duration of High Air Temperature : Focusing on Solar Radiation Trapping Effects. *Sustainability, 10*(12), 4837. <https://doi.org/10.3390/su10124837>
- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Suzán-Azpiri, H., Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Guevara-Escobar, A., Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Luna-Soria, H., & Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro. (2015). The role of urban

- vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera*, 28(3), 205-218. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.05>
- Découvrez votre commune / Statbel*. (s. d.). Consulté 6 août 2022, à l'adresse <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/decouvrez-votre-commune>
- Dijkstra, L., & Poelman, H. (s. d.). *CITIES IN EUROPE THE NEW OECD-EC DEFINITION*. 16.
- Estrada, F., Botzen, W. J. W., & Tol, R. S. J. (2017). A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. *Nature Climate Change*, 7(6), 403-406. <https://doi.org/10.1038/nclimate3301>
- European Commission. Joint Research Centre. (2016). *Mapping population density in functional urban areas : A method to downscale population statistics to urban atlas polygons*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2791/06831>
- European Environment Agency. (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe*. <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-to-climate-change>
- European Environment Agency. (2020). *Urban adaptation in Europe : How cities and towns respond to climate change*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/324620>
- European Union. (2020). *Urban Atlas 2018 mapping guide*. *European Union—2020—Urban Atlas 2018 mapping guide.pdf*. (s. d.).
- Fabrizi, R., Bonafoni, S., & Biondi, R. (2010). Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome. *Remote Sensing*, 2(5), 1400-1415. <https://doi.org/10.3390/rs2051400>
- Fonction NDVI—ArcGIS Pro / Documentation*. (s. d.). Consulté 5 août 2022, à l'adresse <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>

- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1), 10973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>
- Gallo, K., Hale, R., Tarpley, D., & Yu, Y. (2011). Evaluation of the Relationship between Air and Land Surface Temperature under Clear- and Cloudy-Sky Conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(3), 767-775. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2460.1>
- Hamblin, A. L., Youngsteadt, E., López-Uribe, M. M., & Frank, S. D. (2017). Physiological thermal limits predict differential responses of bees to urban heat-island effects. *Biology Letters*, 13(6), 20170125. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0125>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island : Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Hsu, A., Sheriff, G., Chakraborty, T., & Manya, D. (2021). Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications*, 12(1), 2721. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22799-5>
- index mundi. (s. d.). *Densité de population par pays—Carte des Pays—Europe*. Consulté 5 août 2022, à l'adresse <https://www.indexmundi.com/map/?v=21000&r=eu&l=fr>
- IPCC, 2021 : *Summary for Policymakers*. In : *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group*. (s. d.).
- IRM. (s. d.). *Tendances observées à Uccle*. KMI. Consulté 5 août 2022, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/a-uccle/temperature-de-lair/moyenne/annuel>
- IUAC Teaching Resources—*The Urban Canopy Layer Heat Island.pdf*. (s. d.).

- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S., & Kluck, J. (2020). Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate*, 32, 100607.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Klimaatpremie | Antwerpen.be*. (s. d.). Consulté 5 août 2022, à l'adresse  
<https://www.antwerpen.be/info/5ff4c913f67343a9574a8f36/premie-voor-klimaatrobuuste-ingrepen>
- Landsat 8 | U.S. Geological Survey*. (s. d.). Consulté 5 août 2022, à l'adresse  
<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8#multimedia>
- Larousse, É. (s. d.-a). *Bruxelles en néerlandais Brussel—LAROUSSE*. Consulté 21 août 2022, à l'adresse <https://www.larousse.fr/encyclopedie/ville/Bruxelles/110451>
- Larousse, É. (s. d.-b). *Liège en néerlandais Luik—LAROUSSE*. Consulté 21 août 2022, à l'adresse <https://www.larousse.fr/encyclopedie/ville/Li%C3%A8ge/129877>
- Larousse, É. (s. d.-c). *Louvain en néerlandais Leuven—LAROUSSE*. Consulté 21 août 2022, à l'adresse <https://www.larousse.fr/encyclopedie/ville/Louvain/130494>
- Lee, T.-W., Choi, H. S., & Lee, J. (2014). Generalized Scaling of Urban Heat Island Effect and Its Applications for Energy Consumption and Renewable Energy. *Advances in Meteorology*, 2014, 1-5. <https://doi.org/10.1155/2014/948306>
- Li, X.-X., & Norford, L. K. (2016). Evaluation of cool roof and vegetations in mitigating urban heat island in a tropical city, Singapore. *Urban Climate*, 16, 59-74.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.002>
- L'infrastructure Lifewatch en Belgique | Lifewatch regional portal*. (s. d.). Consulté 6 août 2022, à l'adresse <https://www.lifewatch.be/fr/project-infrastructure-lifewatch-en-belgique>
- MODIS Web*. (s. d.). Consulté 5 août 2022, à l'adresse <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

Namur. (2022). In *Wikipédia*.

<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Namur&oldid=196248762>

*Nationalités / IBSA*. (s. d.). Consulté 6 août 2022, à l'adresse

<https://ibsa.brussels/themes/population/nationalites>

Oke, T. R. (s. d.). *CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND*. 11.

Peng, S., Feng, Z., Liao, H., Huang, B., Peng, S., & Zhou, T. (2019). Spatial-temporal pattern

of, and driving forces for, urban heat island in China. *Ecological Indicators*, *96*,

127-132. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.059>

Pipoly, I., Preiszner, B., Sándor, K., Sinkovics, C., Seress, G., Vincze, E., Bókony, V., &

Liker, A. (2022). Extreme Hot Weather Has Stronger Impacts on Avian Reproduction in Forests Than in Cities. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *10*, 825410.

<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.825410>

*Plan Canopée—Liège*. (s. d.). [Dossier]. Consulté 5 août 2022, à l'adresse

<https://canopee.liege.be>

*PRO19\_010\_canopee\_A5\_planches.pdf*. (s. d.). Consulté 5 août 2022, à l'adresse

[https://www.bruxelles.be/sites/default/files/bxl/PRO19\\_010\\_canopee\\_A5\\_planches.pdf](https://www.bruxelles.be/sites/default/files/bxl/PRO19_010_canopee_A5_planches.pdf)

Qiu, G., Li, H., Zhang, Q., Chen, W., Liang, X., & Li, X. (2013). Effects of

Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, *12*(8), 1307-1315.

[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)

*Structure par âge / IBSA*. (s. d.). Consulté 6 août 2022, à l'adresse

<https://ibsa.brussels/themes/population/structure-par-age>

- Tardy, B., Rivalland, V., Huc, M., Hagolle, O., Marcq, S., & Boulet, G. (2016). A Software Tool for Atmospheric Correction and Surface Temperature Estimation of Landsat Infrared Thermal Data. *Remote Sensing*, 8(9), 696. <https://doi.org/10.3390/rs8090696>
- Teufel, B., Sushama, L., Poitras, V., Dukhan, T., Bélair, S., Miranda-Moreno, L., Sun, L., Sasmito, A. P., & Bitsuamlak, G. (2021). Impact of COVID-19-Related Traffic Slowdown on Urban Heat Characteristics. *Atmosphere*, 12(2), 243. <https://doi.org/10.3390/atmos12020243>
- Wegscheider, S., Lindmayer, A., & Stumpf, A. (2020). *URBAN ATLAS 2018 VALIDATION REPORT*.

## Annexes

Classes d'occupation du sol de Copernicus Urban, tableau et matrice de détermination  
(*European Union - 2020 - Urban Atlas 2018 mapping guide.pdf*, s. d.).

Surface artificialisée	Tissu urbain continue dense
	Tissu urbain discontinue dense
	Tissu urbain discontinue moyennement dense
	Tissu urbain discontinue faiblement dense
	Tissu urbain discontinue très faiblement dense
	Structure isolée
	Unité industrielle, commerciale, publique, militaire et privée
	Route à grande vitesse et éléments associés
	Autres routes et élément associé
	Voie ferrée et éléments associés
	Port
	Aéroport
	Mine et décharge
	Site de construction
	Terre sans utilisation
	Aire urbaine verte
	Infrastructure de sport et de plaisance
Surface agricole	Terre arable
	Culture permanente
	Pâturage
	Culture complexe ou mixte
Aire naturelle et semi naturelle	Forêt
	Végétation herbacée
	Espace ouvert avec peu ou pas de végétation
Milieu humide	Milieu humide
Eau	Eau
	No data (ombres et nuages)
	No data (images manquantes)

## Decision Matrix

Land	Water
Human activity non-agricultural	Water bodies / courses
Little / non human influence, agriculture, forestry	Flooded areas
2. Agricultural + semi-natural areas + wetlands	4. Wetland
3. Forests	5. Water
1. Artificial Surfaces	

Ref. Data	Additional data req.
Sat. Image TK COTS navigation data	
HRL IMD sealing	
HRL IMD sealing	

1. Artificial Surfaces	
Urban areas with dominant residential use or inner-city areas with central business district and residential use	Industrial, commercial, public, military and private units or transport units <b>are predominant</b>
1.1 Urban Fabric	1.2 Industrial, commercial, public, military, private and transports units
1.1.1 Continuous Urban Fabric	1.2.1 Industrial, commercial, public, military and private units
1.1.2 Discontinuous Urban Fabric	1.2.2 Road and rail network and associated land
1.1.2.1 (S.I. 50% - 80%)	1.2.2.1 Fast transit roads and associated land
1.1.2.2 (S.I. 30% - 50%)	1.2.2.2 Other roads and associated land
1.1.2.3 (S.I. 10% - 30%)	1.2.2.3 Railways and associated land
1.1.2.4 (S.I. 0% - 10%)	1.2.3 Port areas
1.1.3 Isolated Structures	1.2.4 Airports
1.3.1 Mineral extraction and dump sites	1.3 Mine, dump and construction site
1.3.2 Construction sites	1.4 Artificial non agricultural vegetated areas
1.3.3 Land without current use	1.4.1 Green urban areas
1.3.4 Land without current use	1.4.2 Sports and leisure facilities
Strong human influence on soil surface, <b>buildings not dominant</b>	Leisure and recreation use dominates

## Caractérisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain par télédétection spatiale : le cas de six villes belges

Thomas Gielen

L'augmentation du nombre et de l'intensité des vagues de chaleur est une réalité dont les conséquences sont déjà perceptibles. En ville, le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est particulièrement influencé par ces vagues de chaleur, rendant l'environnement urbain encore plus chaud pour atteindre des températures dangereuses pour la santé humaine. Différentes solutions existent afin d'endiguer ce phénomène. Une de ces solutions est le plan canopée proposé par la ville de Liège consistant à augmenter le couvert arboré afin d'amener plus de zone de fraîcheur en ville.

Six villes belges seront étudiées dans le cadre de ce mémoire et ce à trois dates différentes correspondant à des vagues de chaleur.

Le premier objectif est de rendre compte de l'étendue et de la récurrence du phénomène d'ICU grâce aux images du capteur TIRS, embarqué à bord de Landsat 8. Le résultat est sous la forme d'une cartographie des ICU mettant en évidence la répétition du phénomène sur les trois dates étudiées.

Le second objectif est, à l'aide des données disponibles dans l'Atlas Urbain du programme Copernicus Urban, de rendre compte de la part de la population touchée par le phénomène. Une caractérisation de l'influence de l'occupation du sol sera réalisée, ceci permettant une meilleure compréhension des résultats et d'enrichir l'analyse.

Les résultats permettent de manière convaincante de voir l'étendue et la récurrence du phénomène d'ICU. La part de la population touchée a aussi été mise en évidence. L'approche de ce mémoire a permis de voir les différences que peuvent amener des villes de tailles et de structures différentes et l'urgence dans laquelle certaines de ces villes se trouvent quant à la problématique des ICU.