

MARCHÉ DE SERVICE EN DEUX LOTS :

- LOT N°1 : ÉTUDES CARTOGRAPHIQUES DE LA CANOPÉE D'ARBRES, DE SITES
POTENTIELS DE PLANTATION D'ARBRES ET DES ÎLOTS DE CHALEURS URBAINS ET ÉTUDE
DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DE RÉGULATION RENDUS PAR LES ARBRES URBAINS

- LOT N° 2 : COMMUNICATION RELATIVE AUX RÉSULTATS ET PLANS D'ACTION ET
STRATÉGIE D'IMPLICATION CITOYENNE

PROCÉDURE NÉGOCIÉE SANS PUBLICATION PRÉALABLE

CAHIER SPÉCIAL DES CHARGES GEP/2020-560/E.

Lot 1 - Tranche 3

Rapport de réalisation des tâches 2.5.2 et 2.5.3 : Validation du modèle climatique et production d'une base de données

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	4
1. Tranche 3 - Tâche 2.5.2 : Validation du modèle climatique	5
1.1. Objectif	5
1.2. Méthodologie	5
1.2.1. Simulations réalisées avec le modèle UrbClim	5
1.2.2. Mesures de la température de l'air : Observations météorologiques pertinentes	9
1.2.3. Mesures de la température de surface : Données Landsat-8	12
1.2.4. Evaluation du modèle : observations vs modélisations	12
1.3. Résultats	13
1.3.1. Représentativité de la station d'Uccle	13
1.3.2. Evaluation de la température de l'air	13
1.3.2.1. Températures horaires - 1996-2014	13
1.3.2.2. Températures minimales - 1996-2014	16
1.3.2.3. Températures maximales	18
1.3.2.4. 2012-2014	19
1.3.2.5. Le 23 août 2019	20
1.3.2.6. Intensité de l'îlot de chaleur urbain	20
1.3.3. Evaluation des températures de surface en valeur absolue	22
1.3.4. Détection des îlots de chaleur de surface	25
1.4. Discussion	30
1.4.1. Biais dus aux forçages atmosphériques d'UrbClim	30
1.4.2. Biais dus aux propriétés de surface d'UrbClim	30
1.4.3. Biais dus aux observations	32
1.4.4. Impact des limitations d'UrbClim sur les indicateurs d'ICU	35
1.5. Conclusion	37
2. Tranche 3 - Tâche 2.5.3 : Production d'une base de données	38
2.1. Objectifs	38
2.2. Liste des indicateurs d'ICU cartographiés	38
2.3. Précautions d'usage	39
2.4. Commentaires des cartes les plus pertinentes	40
2.4.1. Jusqu'à 5 fois plus de nuits chaudes dans le centre de Liège qu'à la campagne / Au moins 2 fois plus de jours de canicule dans le centre de Liège que dans les campagnes environnantes	40
2.4.2. En moyenne, jusqu'à 7°C de plus en ville qu'à la campagne lors des épisodes de canicule de la période 1996-2014	44

2.4.3. En combinant durée et intensité des canicules, le centre de Liège est jusqu'à 4 fois plus touché par l'effet des canicules que les campagnes environnantes.	47
2.4.4. Une variation de 8°C en température ressentie au sein même de la ville de Liège au plus fort de la canicule de fin juillet 2019.	49
2.4.5. Parcs urbains, forêts et rives arborées de la Meuse : des refuges en cas de canicule	58
2.5. Conclusion	59
Bibliographie	61
Annexes A	63
Annexes B	67

RÉSUMÉ

Le Plan Canopée de la ville de Liège a pour objectif principal d'améliorer le confort thermique des Liégeois au travers de la plantation d'arbres. La Tranche 3 du Plan Canopée, dont les résultats sont présentés dans ce rapport, vise à produire une base de données caractérisant l'îlot de chaleur urbain (ICU) de Liège à moyenne (100 m) et petite échelle (1 m) comme outils d'aide à la décision pour l'orientation des politiques de développement de la trame verte du plan Canopée. Cette base de données est produite à partir de simulations climatiques principalement réalisées avec le modèle UrbClim. La première tâche de cette Tranche 3 (Tâche 2.5.2 du Plan Canopée) est d'évaluer la fiabilité d'UrbClim afin de pouvoir procéder à une analyse critique de la cartographie des indicateurs d'ICU calculés sur base des sorties de ce modèles (Tâche 2.5.3).

L'évaluation d'UrbClim a été réalisée sur la période 1996-2014 en réutilisant principalement les simulations réalisées dans le cadre du projet SMARTPOP, des mesures de température de l'air issues de 6 stations météorologiques, et des données de températures de surface issues du satellite Landsat 8 (Section 1). Voici les principales conclusions de cette évaluation :

- Le modèle UrbClim est capable de simuler de manière satisfaisante l'ICU de Liège que ce soit les valeurs absolues de température et leur variation dans l'espace. Il est particulièrement performant pour simuler les températures maximales. Il a par contre tendance à systématiquement surestimer les températures minimales et à surestimer l'intensité de l'ICU durant la nuit, en particulier dans les zones situées en fond de vallée ;
- Les biais rencontrés lors de l'évaluation d'UrbClim proviennent d'une part des limitations dans la physique du modèle et dans ses données d'entrée, et d'autres part de biais causés par des effets de sites au niveau de certaines stations météorologiques.

L'ICU de Liège a ensuite été caractérisé à l'aide de 17 indicateurs qui doivent être utilisés et interprétés en tenant compte des limitations du modèle mises en exergue lors de son évaluation (Section 2). Voici les principales conclusions de l'analyse des indicateurs d'ICU :

- Sur la période 1996-2014, les habitants du centre de Liège ont connu en moyenne jusqu'à 5 fois plus de nuits chaudes et de jours d'été que les habitants des communes périphériques sud et est. Les habitants du centre de Liège connaissent jusqu'à 2 fois plus de jours de canicule (entre 8 et 10 jours de canicule par an) qu'en périphérie (moins de 4 jours par an). Lors de vagues de chaleurs, il y a en moyenne jusqu'à 7°C de différence entre ville et campagne ;
- Lors de la journée du 25 juillet 2019, la température maximale ressentie par les Liégeois présentait une variation de 8°C en fonction de l'endroit où l'on se trouvait dans Liège ;
- Les éléments qui expliquent cette variation sont la présence et la combinaison d'une végétation arborée, de plans d'eau, des caractéristiques du bâti (densité et hauteur du bâti, orientation des façades et des axes des rues, largeur des rues), et du relief ;
- Plus la végétation arborée et les plans d'eau sont larges, plus le confort thermique s'améliore ;
- Le champ d'action de ces éléments est toujours limité à leur voisinage immédiat. Ainsi, le confort thermique des Liégeois est fortement amélioré lorsque les trames vertes et bleues se combinent à grandes échelles ;
- L'analyse des îlots les plus frais, refuges en cas de fortes chaleurs, confirme l'impact positif d'une combinaison de ces trames et plus particulièrement de la présence de forêts urbaines.

1. TRANCHE 3 - TÂCHE 2.5.2 : VALIDATION DU MODÈLE CLIMATIQUE

1.1.OBJECTIF

Cette tâche vise à évaluer les performances du modèle climatique urbain UrbClim en termes de reproduction des valeurs absolues de températures de l'air à proximité du sol (T2m) et des valeurs absolues de températures de surface (LST pour Land Surface Temperature). Cette évaluation porte d'une part sur la comparaison entre des mesures in-situ ponctuelles de températures de l'air et les températures de l'air modélisées pour les étés de la période 1996-2014. D'autre part, des mesures spatialement continues de température de surface effectuées par satellite sont comparées aux températures de surface modélisées par UrbClim à des instants précis. Par ailleurs, une analyse qualitative de la distribution spatiale des indicateurs liés aux îlots de chaleur urbains complète l'évaluation quantitative.

Cette évaluation du modèle permettra d'en cerner les forces et les faiblesses de manière à donner aux autorités les clés d'une analyse critique des résultats du modèle.

1.2.MÉTHODOLOGIE

1.2.1. SIMULATIONS RÉALISÉES AVEC LE MODÈLE URBCLIM

La cartographie de la température de l'air à proximité du sol (à 2 m) et de la température de surface de Liège et de ses alentours a été réalisée à l'aide du modèle climatique UrbClim. Ce modèle est un modèle numérique basé sur les processus physiques qui caractérisent les échanges d'énergie entre la surface terrestre (y compris les surfaces urbaines) et la basse atmosphère à une très haute résolution spatiale (100 m) (Figure 1). De Ridder *et al.* (2015) présente une description complète du modèle. UrbClim a déjà fait ses preuves dans une dizaine de villes à travers le monde : UrbClim a été validé d'un point de vue de ses flux radiatifs, de la vitesse du vent à 2 m, de la température de l'air et de la différence de température entre l'urbain et le rural pour les villes d'Anvers, Bruxelles et Gand en Belgique, Toulouse en France, et Barcelone en Espagne (De Ridder *et al.*, 2015; García-Díez *et al.*, 2016 ; Lauweat *et al.*, 2015 ; 2016). En outre, les températures de surface ont également été validées à l'aide de données satellitaires (MODIS *terra* et *aqua*) pour la ville de Londres (Zhou *et al.*, 2016).

Pour simuler le micro-climat d'une ville donnée, UrbClim a besoin de deux types de données d'entrée : d'une part, des champs météorologiques et d'autre part, des cartes détaillant les caractéristiques de la surface de cette ville telles que la couverture du sol et la topographie locale (Figure 1).

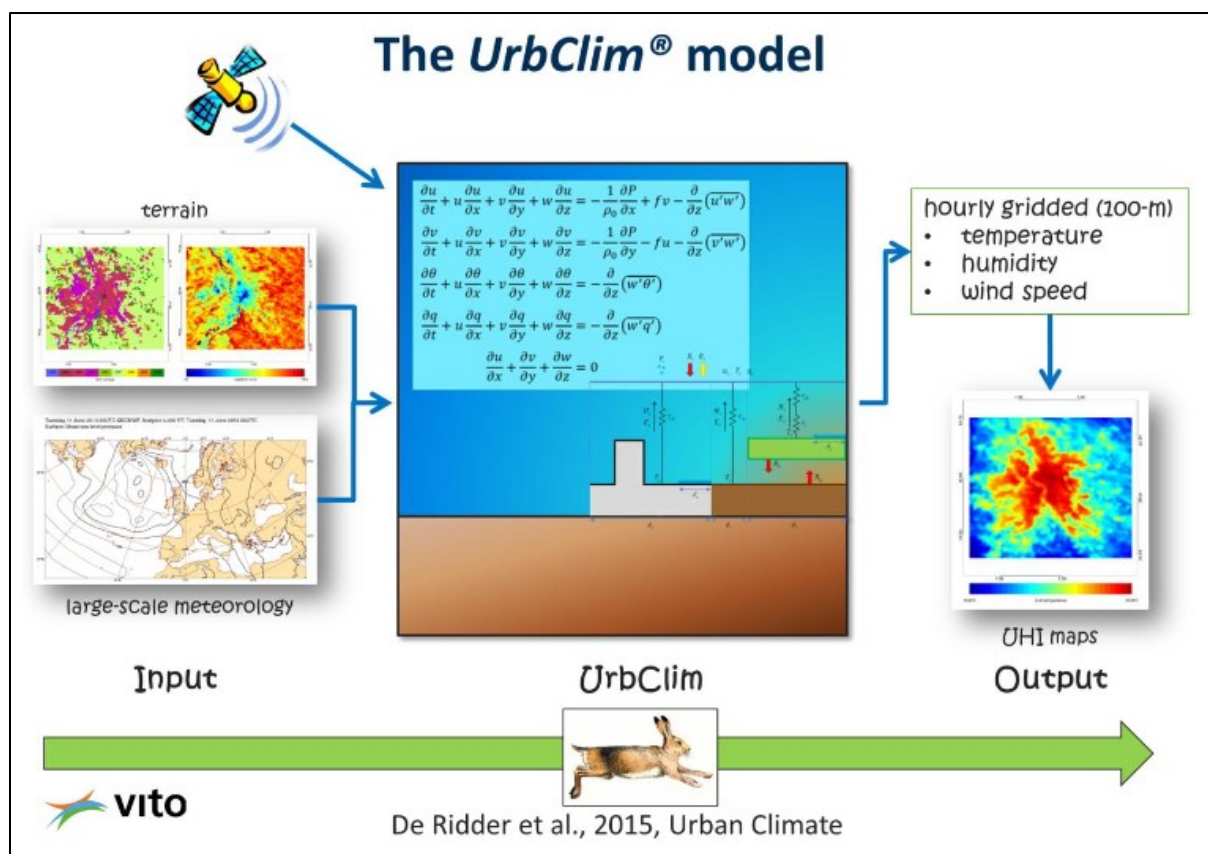


Figure 1. Représentation synthétique du fonctionnement du modèle UrbClim.

Dans le cadre du projet Canopée, trois sets de simulations climatiques d'UrbClim ont été utilisés (Tableau 1).

Tableau 1. Simulations d'UrbClim utilisées dans le cadre de la Tranche 3 du projet Canopée.

Set id	Période de simulation	Données d'entrée	Résolution spatiale des variables de sorties	Variables de sorties (horaires) utilisées
#1	1996-2014 (avril à septembre)	ERA-interim, MNS 2013-2014, COSW 2007	100 m	T2m, LST
#2	23 août 2019	ERA5, PICC 2019, MNH 2019, WAL_OCS_2018, Canopée 2019	100 m	T2m, LST
#3	25 juillet 2019	ERA5, PICC 2019, MNH 2019, WAL_OCS_2018, Canopée 2019	(100 m) 1 m	- WBGT

Le premier set reprend les simulations réalisées dans le cadre du projet SmartPop sur l'agglomération liégeoise pour les mois de printemps et d'été de la période 1996-2014 à une résolution spatiale de 100 m (Poelman *et al.*, 2018). Dans ce premier set de simulations, les champs météorologiques prescrits en entrée du modèle sont les réanalyses ERA-interim de l'European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF). Des réanalyses sont des sorties de modèles climatiques globaux très complexes qui sont corrigées toutes les 6h par des observations. Les caractéristiques des masses d'air (températures de l'air, humidité, vitesse et direction des vents) advectées dans UrbClim sont ainsi fournies à une résolution spatiale de 30 km. Les propriétés de surface du modèle telles que la topographie et la couverture du sol sont basées sur le Modèle Numérique de Surface (MNS) de Wallonie de 2013-2014 et sur la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW) de 2007 (Figure 2).

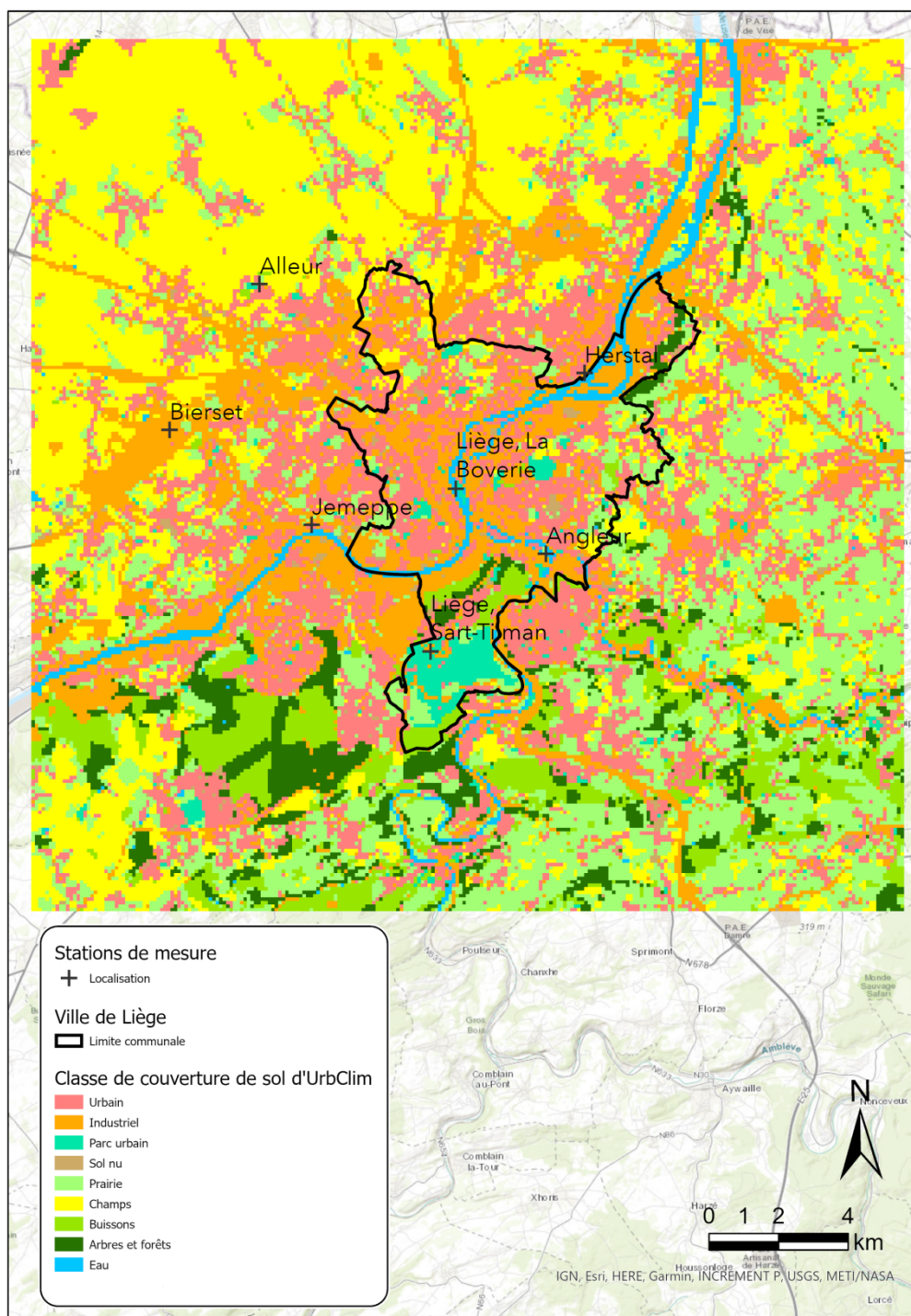


Figure 2. Couverture de sol basée sur la COSW 2007 et prescrite dans le set #1 de simulations d'UrbClim et localisation des stations de mesures de températures de l'air.

Les deux derniers sets de simulations ont été réalisés expressément pour les besoins du projet Canopée pour des jours d'été et de canicule sélectionnés en 2019.

La première date sélectionnée est le 23 août 2019. Il s'agit d'un jour d'été¹ d'après la terminologie de l'Institut Royal de Météorologie (IRM). Cette date a été choisie dans le but de comparer UrbClim avec une image Landsat-8 afin d'évaluer les performances du modèle d'un point de vue des températures de surface. Cette simulation a produit des cartes de température horaire de l'air et de la surface à 100 m de résolution.

La seconde date, choisie en concertation avec la Ville de Liège, est le 25 juillet 2019. Il s'agit d'un jour de canicule² mais aussi de la journée la plus chaude jamais enregistrée en Belgique. Cette date a été choisie pour effectuer la simulation de la température au thermomètre à globe humide (*wet-bulb globe temperature* - WBGT) à 1 m de résolution spatiale, le but étant d'étudier la variation spatiale du stress thermique subi par les habitants de la ville (Lauwaet *et al.*, 2020). La WBGT est en fait le seul indice de température ressentie tenant compte des effets simultanés de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire sur l'homme.

Pour réaliser ces deux simulations, les données d'entrée d'UrbClim ont été mises à jour afin d'utiliser des données cohérentes avec les dates choisies. Les réanalyses ERA5 (12 km de résolution spatiale) ont été utilisées comme forçages météorologiques. Ces réanalyses sont les successeurs des ERA-interim : leur résolution spatiale est plus fine et certains biais présents dans les ERA-interim ont été corrigés de sorte que ces sorties d'UrbClim devraient être plus proches de la réalité (Herbach *et al.*, 2020). Les propriétés de surface ont également été mises à jour. Plusieurs sets de données ont été combinés pour caractériser l'occupation du sol. La carte d'occupation du sol de la Wallonie "WAL_OCS_2018" et le modèle numérique de surface (MNS) 2019 ont été utilisés comme données de base pour prescrire les caractéristiques de surface pour la simulation d'UrbClim à 100 m. Les outputs de la tranche 1 du Projet Plan Canopée ont permis de consolider cette caractérisation sur les surfaces artificialisées, le couvert végétal arboré et herbacé pour 2019 au sein de la ville de Liège. Ces propriétés de surface ont ensuite été affinées pour le downscaling UrbClim à 1 m pour le calcul de la WBGT. Les délimitations polygonales des bâtiments proviennent des données du Projet Informatique de Cartographie Continue (PICC) dans sa version de mai 2019. Le modèle numérique de hauteur (MNH) 2019 a été utilisé pour déterminer la hauteur maximale de ces bâtiments.

1.2.2. MESURES DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR : OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES PERTINENTES

Afin d'évaluer la capacité d'UrbClim à modéliser la température de l'air, six stations météorologiques ont été sélectionnées au sein de différents réseaux de mesures (Tableau 2). Ces stations ont été choisies sur base des critères suivants :

- Comprises dans le domaine de modélisation d'UrbClim ;
- Mesures de température réalisées à proximité du sol (idéalement 2 m) ;
- Mesures réalisées avec un thermomètre ventilé ;
- Mesures réalisées sur gazon ;
- Mesures de température disponibles toutes les heures.

Parmi les six stations retenues, notons que cinq d'entre elles possèdent des enregistrements de température sur l'ensemble de la période de simulation d'UrbClim (1996-2014). Les

¹ jour d'été : journée durant laquelle la température maximale de l'air dépasse 25°C

² jour de canicule : journée durant laquelle la température maximale de l'air dépasse 30°C

enregistrements de Liège-La Boverie s'arrêtent en 2012 tandis que ceux de Liège-Sart Tilman ne couvrent que la période 2012-2014.

Tableau 2. Caractéristiques des stations météorologiques retenues pour l'évaluation d'UrbClim.

Nom	Source	Série temporelle	Hauteur du thermomètre	Altitude de la station	Environnement de la station
Angleur	ISSeP	17/06/1978-	3 m	64 m	Industriel urbain
Alleur	PAMESEB	1994-	1,5 m	161 m	Rural
Bierset	IRM	01/01/1949-	2 m	186 m	Industriel rurale
Herstal	ISSeP	16/03/1978-	3 m	57 m	Urbain
Jemeppe	ISSeP	01/02/1978-	3 m	62 m	Urbain
Liège, La Boverie	ISSeP	1980-2012	3 m	60 m	Parc urbain
Liège, Sart-Tilman	ULiege	1/01/2012 - 18/08/2014	2 m	245 m	Parc périurbain et forêts mixtes
Uccle	IRM	1833-	2m		Périurbain

Les Figures 2 et 3 permettent de caractériser l'environnement des stations retenues pour l'évaluation d'UrbClim. On remarque ainsi qu'elles sont localisées dans des environnements divers et variés : sur le plateau, en fond de vallée, en milieu forestier, en prairie, en ville, à proximité de cours d'eau, en terrain dégagé, en milieu clos, etc. Cette diversité permettra de réellement mettre à l'épreuve UrbClim mais aussi d'identifier les meilleures candidates pour la station urbaine et la station rurale qui permettront d'étudier l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de Liège.

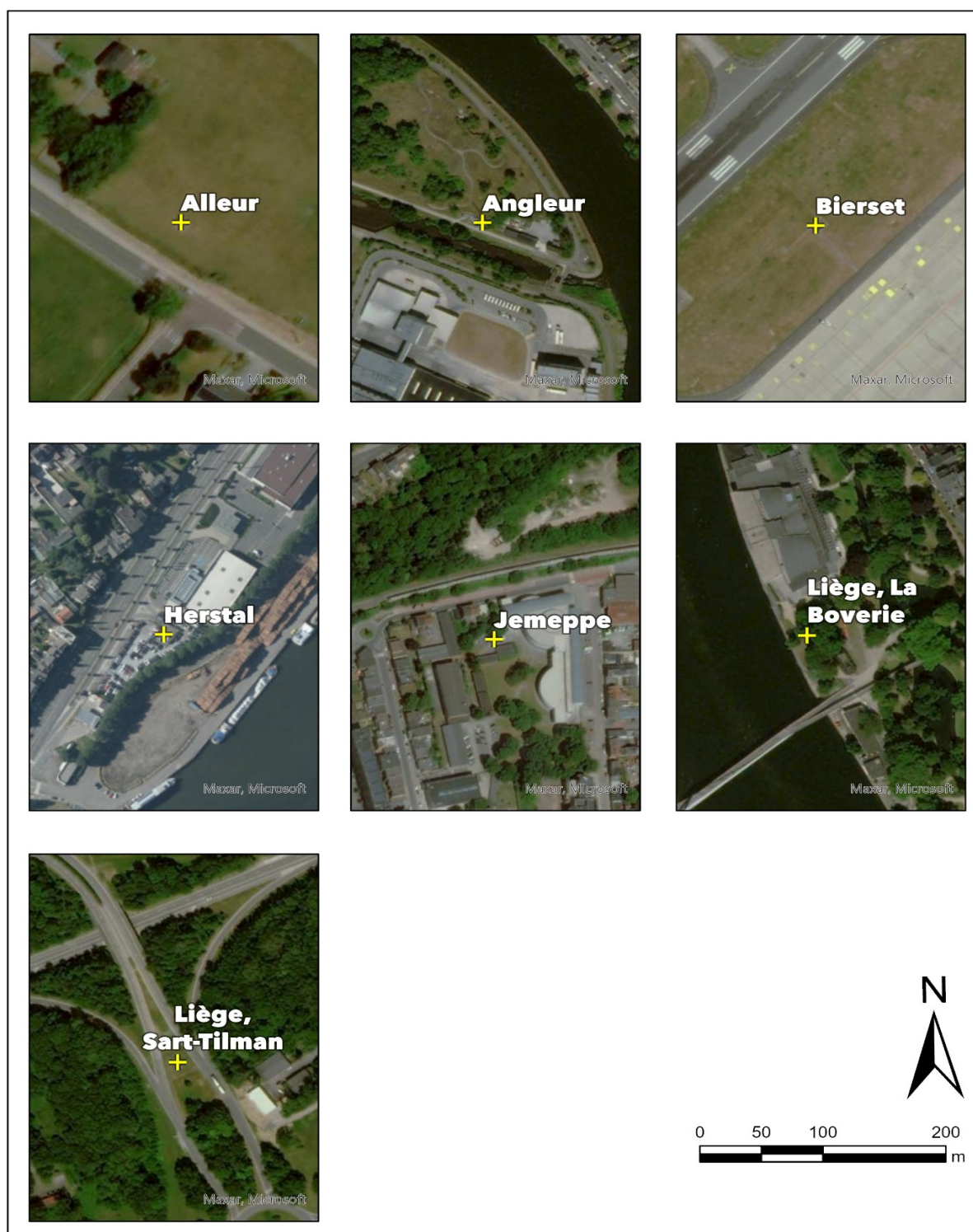


Figure 3. Aperçu de l'environnement immédiat des stations de mesures de la température de l'air utilisée pour l'évaluation d'UrbClim.

Outre les stations localisées au sein de l'agglomération liégeoise, les mesures de température de la station d'Uccle ont également été utilisées. La station d'Uccle est en effet la station de référence nationale pour le déclenchement du Plan fédéral forte chaleur et ozone (SPF, 2019). Il est dès lors pertinent d'évaluer la représentativité de cette station par rapport à la situation liégeoise.

1.2.3. MESURES DE LA TEMPÉRATURE DE SURFACE : DONNÉES LANDSAT-8

Landsat 8 est un satellite lancé en 2013 dans le cadre du programme d'observation de la Terre Landsat, développé par la NASA. Ce satellite est équipé, entre autres, d'un capteur infrarouge actif dans les longueurs d'onde thermiques comprises entre 10 μm et 12.5 μm . Landsat 8 a un temps de retour de 16 jours et grâce à la convergence des orbites, une image est disponible quasiment tous les 8 jours à Liège. Tardy *et al.* (2016), ont mis au point un outil permettant de convertir les données obtenues par le capteur en températures de surface. Cet outil, appelé LANDARTs, utilise notamment les données des autres bandes captées par Landsat 8 et le modèle de transfert radiatif MODTRAN (Berk *et al.*, 1987).

L'objectif est de valider le modèle UrbClim (De Ridder *et al.*, 2015) grâce aux images Landsat. Les images produites par UrbClim, ont une résolution de 100 mètres alors que les images Landsat ont une résolution de 30 mètres. Deux dates ont été choisies pour comparer les valeurs des températures de surface obtenues avec UrbClim et avec les images Landsat 8 via LANDARTs. Le 31 juillet 2014 est la première date choisie pour effectuer la comparaison. Cette date a été choisie lors d'une période particulièrement chaude car l'objectif est de caractériser les effets des événements climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur. Cette date correspond aussi à une date de passage de Landsat 8 où aucun nuage ne couvre la ville de Liège. Landsat survole la ville de Liège à 10h30 sur le fuseau UTC+0, ce qui correspond à 12h30 en heure locale car la Belgique est calée sur le fuseau UTC+2 en été. Dans un premier temps les valeurs de température des deux cartes sont comparées ensuite c'est la localisation des 10 % de la surface les plus chauds qui est comparée afin de valider la capacité d'UrbClim à localiser les îlots de chaleur. Le même travail a été effectué avec l'image Landsat du 23 août 2019. Cette dernière date correspond à un jour de canicule alors que la date précédente est un jour d'été dans les normes saisonnières.

1.2.4. EVALUATION DU MODÈLE : OBSERVATIONS VS MODÉLISATIONS

Afin d'évaluer les performances d'UrbClim à une résolution de 100 m, les observations de température ont été directement comparées aux résultats du modèle. Dans le cas de la température de l'air à proximité du sol, les mesures ponctuelles ont été comparées aux résultats fournis par les cellules du modèle contenant les différentes stations de mesures. L'analyse s'est focalisée sur les mois compris entre mai et septembre car ce sont les mois de l'année durant lesquels des canicules peuvent survenir d'après l'historique de Uccle. Dans le cas de la température de surface (LST), les images Landsat-8 retenues ont été comparées aux cartes de LST à 100 m générées par le modèle pour les dates et les heures correspondantes.

Trois indicateurs statistiques ont été utilisés pour apprécier la capacité du modèle à représenter la réalité :

- 1) Le coefficient de corrélation de Spearmann (R), qui indique la proportion de la variation des valeurs observées (O) qui est expliquée par les résultats du modèle (M).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

- 2) Le biais moyen (BM), qui indique la différence moyenne entre les mesures et les résultats du modèle.

$$BM = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N}$$

- 3) L'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui fournit l'écart type des différences entre les valeurs modélisées et les valeurs observées.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}}$$

1.3. RÉSULTATS

1.3.1. REPRÉSENTATIVITÉ DE LA STATION D'UCCLE

Actuellement, seules les mesures réalisées à Uccle sont utilisées pour déclencher le Plan Fédéral Ozone et Forte Chaleur. Est-ce que les mesures d'Uccle sont représentatives de la situation liégeoise?

Une première comparaison des séries temporelles de températures mesurées à Uccle sur la période 1996-2014 a été réalisée avec les mesures de températures réalisées à Liège et ses environs (Tableau 3). Le résultat montre qu'Uccle représente globalement bien les stations liégeoises. Les corrélations sont très proches sans être parfaites entre Uccle et les stations liégeoises. On remarque que les stations semi-rurales de Liège (Alleur et Bierstet) sont les stations les plus proches d'Uccle en termes d'écart moyen de température et de corrélation, la station d'Uccle étant elle-même une station semi-rurale. Logiquement, les stations plus urbaines présentent des écarts moyens de température plus élevés et une corrélation légèrement moins bonne.

Tableau 3. Corrélation (R) et écart-moyen entre la température horaire de l'air (T2m) mesurée à Uccle et les mesures réalisées à Alleur, Angleur, Bierstet, Herstal et la Boverie entre les mois de mai et septembre de la période 1996-2014.

Station	R	Ecart moyen [°C]
ALLEUR	0,96	-0,2°C
ANGLEUR	0,94	+0,7°C
BIERSET	0,96	-0,2°C
HERSTAL	0,95	+1,1°C
LA BOVERIE*	0,94	+1,0°C

**période d'étude limitée à 1996-2012*

1.3.2. EVALUATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

L'évaluation de la capacité du modèle à reproduire la température de l'air observée se focalise d'abord sur la période 1996-2014. Un focus est ensuite réalisé sur la période 2012-2014 de manière à inclure la station du Sart-Tilman dans nos analyses. Enfin, la simulation réalisée le 23 août 2019 avec une version d'UrbClim mise à jour avec des données de 2019 (Tableau 1) a également été évaluée.

1.3.2.1. Températures horaires - 1996-2014

L'évaluation de la température de l'air montre que les performances du modèle sont très satisfaisantes pour cinq des localisations étudiées : Bierstet, Angleur, Herstal, La Boverie et Alleur

(Tableau 4). En effet, pour ces cinq localisations, la corrélation (R) moyenne est de 0,83 tandis que le biais moyen (BM) ne dépasse pas +8,2%. Quant à l'erreur quadratique moyenne (RMSE), elle est inférieure à l'écart-type des observations (STD). On notera qu'en moyenne, le modèle surestime les températures horaires.

Seule la station de Jemeppe présente des statistiques décevantes. En particulier, la corrélation plafonne à 0,59 et la RMSE, bien qu'elle reste inférieure à un écart-type, y est deux fois plus élevée que pour les autres stations avec une valeur de 6,2°C. Cette contre-performance est due aux caractéristiques du site d'implantation de la station de Jemeppe qui est peu ventilé (peu de circulation de l'air). Plus de détails sont donnés dans la Section 2.4.3. Dans la suite de ce rapport, la station de Jemeppe a été écartée des comparaisons.

Parmi les cinq stations pour lesquelles l'évaluation d'UrbClim est concluante, notons que la station d'Herstal présente les températures les plus élevées avec une température moyenne estivale observée (TM) de 17,6°C. Au contraire, on rencontre les valeurs de températures les plus froides à Alleur avec une température moyenne de 16,2°C.

Tableau 4. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température horaire de l'air entre les mois de mai et de septembre de la période 1996-2014. R représente la corrélation ; BM, le biais moyen ; RMSE, l'erreur quadratique moyenne ; TM, la température moyenne observée ; STD, l'écart-type des observations.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
ALLEUR	0,86	+0,3°C	2,6°C	16,2°C	5,0°C
ANGLEUR	0,85	+1,1°C	2,9°C	17,1°C	5,1°C
BIERSET	0,86	+1,1°C	2,8°C	16,3°C	4,8°C
HERSTAL	0,86	+1,2°C	2,9°C	17,6°C	5,0°C
JEMEPEPE	0,59	+1,4°C	6,2°C	17,0°C	7,4°C
LA BOVERIE*	0,83	+1,0°C	3,0°C	17,5°C	4,8°C

**période d'étude limitée à 1996-2012*

La Figure 4 illustre la variation de la température horaire observée et simulée par UrbClim durant l'été 2006 pour la station d'Herstal. La très bonne corrélation entre observations et modélisations et la surestimation des températures y transparaissent clairement. Concernant cette surestimation, on notera qu'elle survient principalement durant les heures les plus froides. Ce sont ainsi les températures nocturnes et par conséquent les minimas de températures qui sont surtout surestimés.

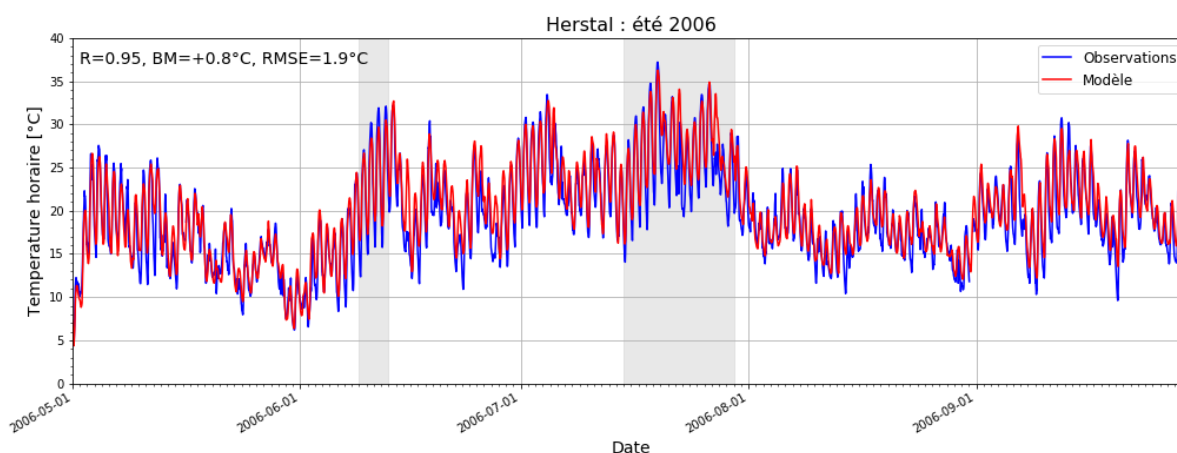


Figure 4. Variation de la température horaire observée et simulée par UrbClim durant l'été 2006 à Herstal.

Lorsque l'on s'intéresse aux écarts entre observations et modélisations en fonction de l'heure de la journée, on constate que le modèle surestime systématiquement les températures nocturnes comme illustré pour les stations d'Herstal et Alleur (Figure 5). La Figure A1 (en Annexe A) illustre le même constat pour les autres stations. Cette surestimation des températures nocturnes est due à un biais dans les forçages météorologiques (ERA-interim) d'UrbClim. Plus de détails sont présentés dans la Section 2.4.1.

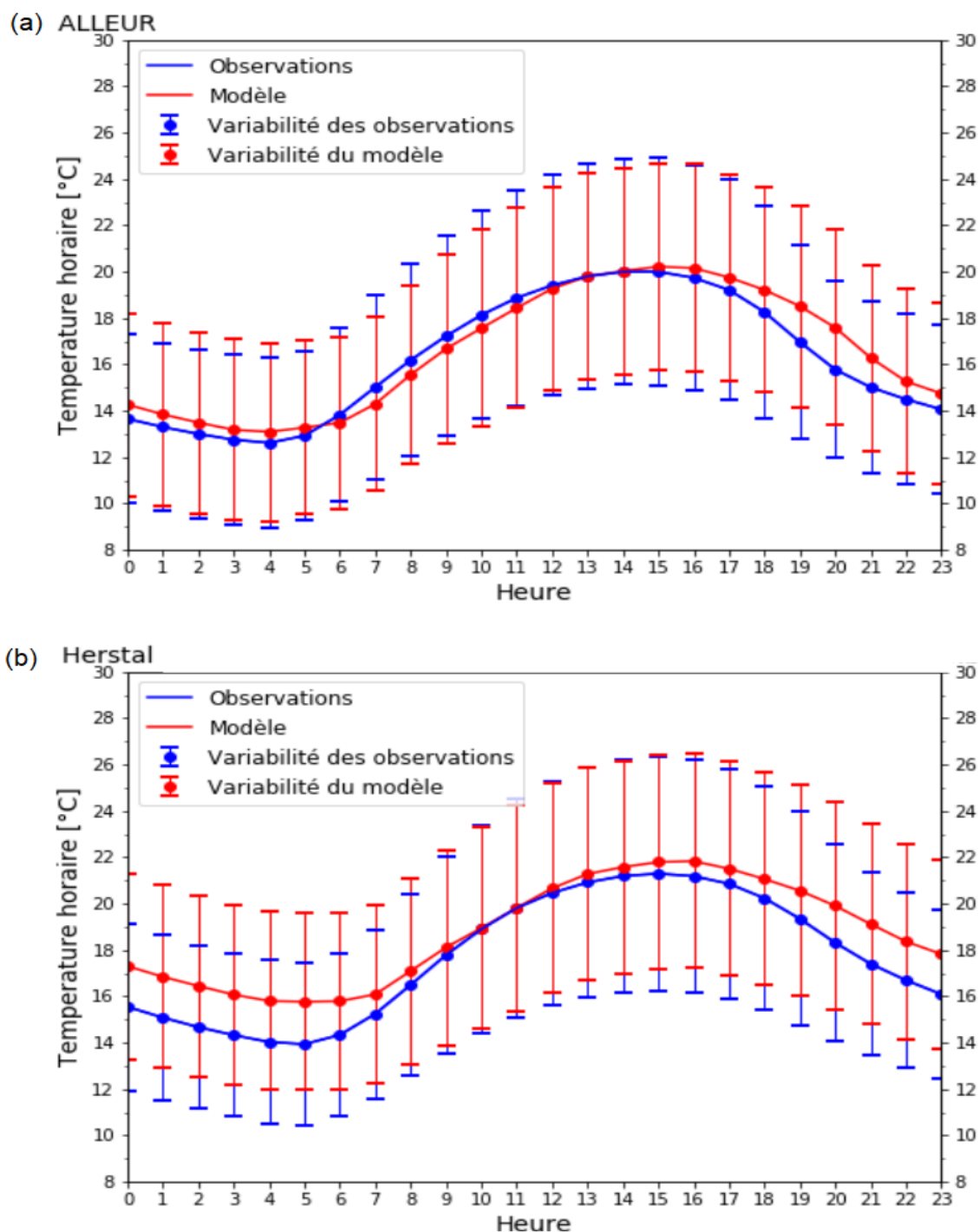


Figure 5. Cycle journalier moyen des températures observées et simulées entre mai et septembre à (a) Alleur et, (b) Herstal, pour la période 1996-2014.

1.3.2.2. Températures minimales - 1996-2014

Les performances du modèle pour la modélisation des températures minimales sont moins bonnes que pour les températures horaires mais elles restent satisfaisantes pour toutes les locations étudiées. La corrélation moyenne pour l'ensemble des stations s'élève à 0,79 tandis que le biais moyen varie entre +6% (Alleur) et +17,7% (Angleur) (Tableau 5). Les RMSE restent inférieures à un écart-type des observations.

Tableau 5. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température minimale de l'air entre les mois de mai et de septembre de la période 1996-2014.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
ALLEUR	0,82	+0,7°C	2,3°C	11,8°C	3,5°C
ANGLEUR	0,75	+2,2°C	3,3°C	12,4°C	3,4°C
BIERSET	0,85	+1,5°C	2,5°C	12,2°C	3,5°C
HERSTAL	0,80	+1,9°C	3,0°C	13,4°C	3,4°C
LA BOVERIE*	0,73	+1,7°C	3,1°C	13,3°C	3,4°C

*période d'étude limitée à 1996-2012

Le biais positif dans les températures minimales provient de la surestimation des températures nocturnes par le modèle, comme signalé dans la Section précédente. Les Figures 6 et A2 (en Annexe A) montrent que ce biais est pratiquement systématique quelle que soit la localisation.

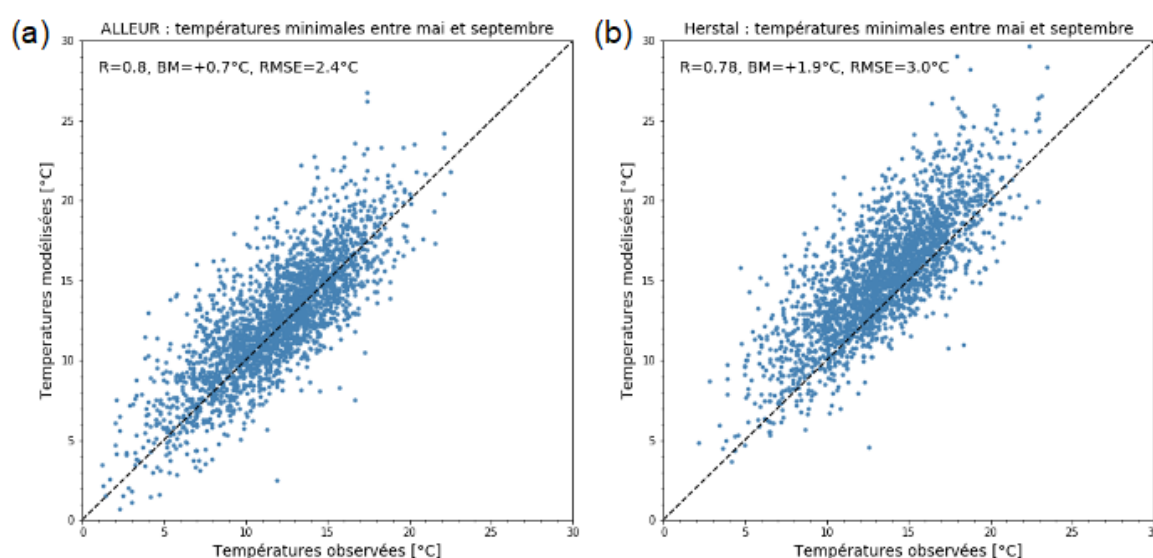


Figure 6. Températures minimales modélisées vs observées entre mai et septembre à (a) Alleur et, (b) Herstal, pour la période 1996-2014.

La Figure 7 illustre la variation de la température minimale durant l'été 2006 pour la station d'Herstal. On observe que la température minimale y est quasiment systématiquement surestimée. Cette surestimation semble amplifiée durant les nuits de canicule (zones grisées sur le Figure 7). Ces nuits sont caractérisées par des vents très faibles favorisant l'écoulement par gravité d'air plus froid des plateaux vers les fonds de vallée. La station d'Herstal se trouvant en fond de vallée (comme toutes les stations urbaines) et à proximité de la Meuse, les températures nocturnes y sont dès lors plus fraîches par nuit sans vent en comparaison avec une nuit avec vent qui permet un brassage de l'air. Le modèle UrbClim ne semble modéliser que partiellement ces effets de vallée en raison de la résolution spatiale de ses forçages atmosphériques et de la simplicité de son module atmosphérique. Des explications complémentaires sont données dans la Section 1.4.1.

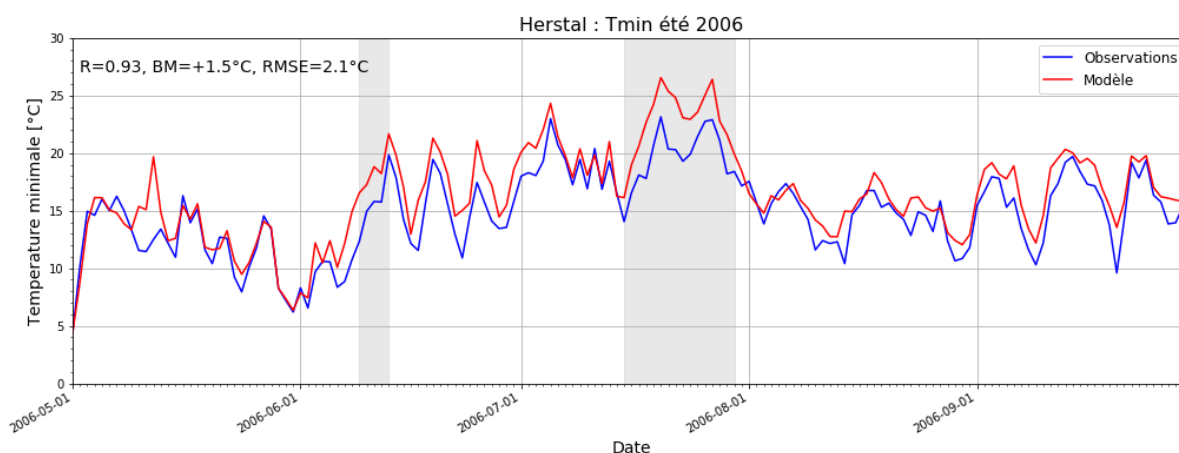


Figure 7. Variation de la température minimale observée et simulée par UrbClim durant l'été 2006 à Herstal.

1.3.2.3. Températures maximales

La modélisation de la température maximale est une véritable force du modèle. La corrélation moyenne pour l'ensemble des stations s'élève à 0,85 tandis que le biais moyen est pratiquement nul. Il est tout au plus de +2.4% pour la station de Bierset (Tableau 6). Les RMSE sont quant à elles largement inférieures à un écart-type des observations.

Tableau 6. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température maximale de l'air entre les mois de mai et de septembre de la période 1996-2014.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
ALLEUR	0,85	-0,3°C	2,5°C	20,8°C	4,7°C
ANGLEUR	0,86	-0,1°C	2,5°C	21,8°C	4,8°C
BIERSET	0,85	+0,5°C	2,6°C	20,4°C	4,7°C
HERSTAL	0,87	+0,2°C	2,5°C	21,9°C	4,9°C
LA BOVERIE*	0,84	-0,1°C	2,6°C	21,9°C	4,8°C

*période d'étude limitée à 1996-2012

La bonne corrélation ainsi que le faible biais entre observation sont illustrés sur la Figure 8 pour la station d'Herstal pour l'été 2006.

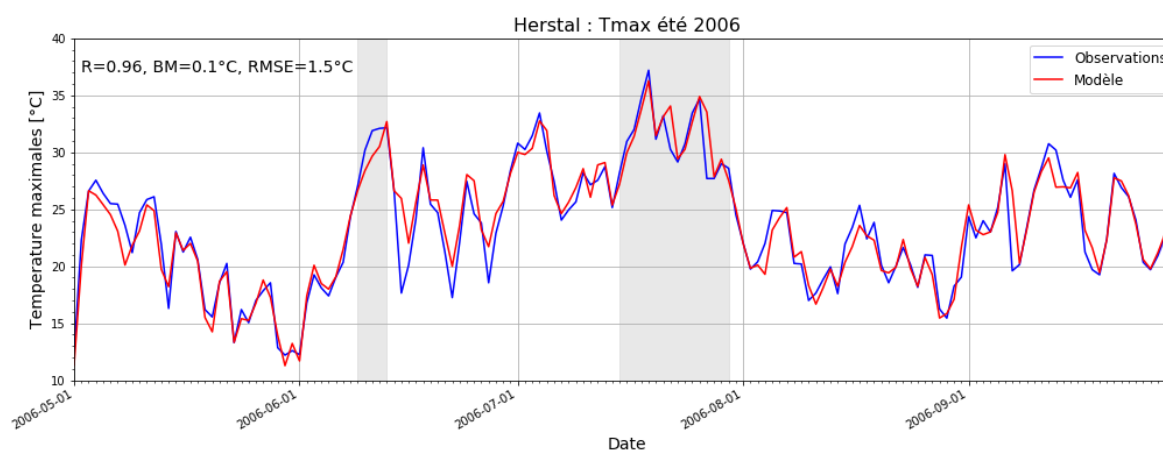


Figure 8. Variation de la température maximale observée et simulée par UrbClim durant l'été 2006 à Herstal.

Les scatter plots présentés sur la Figure A3 (en Annexe A) illustrent que le biais moyen est pratiquement nul.

1.3.2.4. 2012-2014

Un focus sur la période 2012-2014 est réalisé de manière à inclure la station du Sart-Tilman dans l'évaluation d'UrbClim. Les analyses présentées dans les sections précédentes ont ainsi été recréées en se concentrant sur les trois étés de la période 2012-2014.

Les Tableaux 7 à 9 montrent que les conclusions tirées pour la période 1996-2014 s'appliquent également à 2012-2014 à ceci près que les performances du modèle sont meilleures pour 2012-2014 avec des corrélations supérieures à 0.9 et des RMSE légèrement plus petites. Cela illustre l'importance d'évaluer un modèle sur des périodes plus longues.

Tableau 7. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température horaire de l'air entre les mois de mai et de septembre de la période 2012-2014.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
ALLEUR	0,95	0,4°C	1,7°C	16,1°C	5,1°C
ANGLEUR	0,92	1,0°C	2,2°C	17,2°C	5,1°C
BIERSET	0,94	1,3°C	2,1°C	15,9°C	4,8°C
HERSTAL	0,94	1,5°C	2,2°C	17,1°C	5,0°C
SART-TILMAN	0,95	-0,3°C	1,6°C	16,4°C	5,1°C

Tableau 8. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température minimale de l'air entre les mois de mai et de septembre de la période 2012-2014.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
ALLEUR	0,93	0,7°C	1,6°C	11,6°C	3,6°C
ANGLEUR	0,86	2,0°C	2,8°C	12,5°C	3,5°C
BIERSET	0,94	1,6°C	2,1°C	12,0°C	3,7°C
HERSTAL	0,91	2,1°C	2,6°C	13,0°C	3,5°C
SART-TILMAN	0,92	-0,4°C	1,5°C	12,3°C	3,7°C

Tableau 9. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température maximale de l'air entre les mois de mai et de septembre de la période 2012-2014.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
ALLEUR	0,96	-0,6°C	1,5°C	20,8°C	4,7°C
ANGLEUR	0,96	-0,3°C	1,3°C	21,9°C	4,8°C
BIERSET	0,96	0,7°C	1,5°C	20,0°C	4,6°C
HERSTAL	0,97	0,5°C	1,3°C	21,5°C	4,8°C
SART-TILMAN	0,96	-0,9°C	1,7°C	21,0°C	4,9°C

Le comportement de la station du Sart-Tilman tranche cependant par rapport aux autres stations. On y observe des biais moyens négatifs alors qu'ils sont positifs pour les autres stations pour la température horaire (Tableau 7) et la température minimale (Tableau 8). Autre paramètre interpellant, les températures observées y sont plus élevées qu'à Alleur et à Bierset ce qui est contre-intuitif étant donné que la station du Sart-Tilman est en théorie beaucoup plus rurale que ces deux stations et que son altitude est significativement supérieure (Tableau 2). Un effet de site explique ces températures anormalement élevées comme démontré dans la Section 1.4.3.

1.3.2.5. Le 23 août 2019

Bien qu'une évaluation sur une seule journée ne soit pas représentative des performances d'un modèle, les observations de températures pour la journée du 23 août 2019 ont été comparées aux sorties du modèle pour cette journée. Le but est d'estimer l'impact de la mise à jour des forçages d'UrbClim (voir Section 1.2.1) sur ses performances (Tableau 10). Les résultats de cette comparaison montrent qu'UrbClim simule la journée du 23 août 2019 de manière satisfaisante. Les corrélations sont presque parfaites mais les biais moyens sont élevés quelle que soit la station (entre +7 et +18%). La RMSE reste inférieure à un écart-type. On notera que la station de Jemeppe tranche toujours avec les autres stations de mesures en termes de performance en raison de son effet de site (voir Section 1.4.3).

Tableau 10. Statistiques des performances d'UrbClim pour la modélisation de la température de l'air à 2 m entre le 23 août 2019.

Station	R	BM	RMSE	TM	STD
BIERSET	0,98	2,3°C	2,5°C	19,8°C	4,8°C
ANGLEUR	1	2,6°C	3,2°C	20,0°C	6,2°C
HERSTAL	1	2,8°C	3,3°C	20,2°C	5,8°C
JEMEPPE	0,99	3,6°C	4,3°C	20,0°C	6,0°C
ALLEUR	0,99	1,4°C	1,6°C	19,7°C	5,4°C

1.3.2.6. Intensité de l'îlot de chaleur urbain

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est évaluée en comparant les températures d'une station de type urbain aux températures d'une station de type rural. Parmi les stations de mesures à notre disposition, nous avons choisi celle d'Herstal comme station urbaine et celle d'Alleur comme station rurale. L'analyse de la localisation et de l'environnement de ces deux stations sont respectivement les plus urbains et les plus ruraux à notre disposition. En outre, les statistiques présentées dans les sections précédentes montrent qu'Herstal enregistre en moyenne les températures les plus élevées et inversement pour Alleur. L'ICU est ici égale à:

$$ICU = T(Herstal) - T(Alleur)$$

La Figure 9 montre le cycle moyen journalier de l'ICU observé et simulé pour les mois d'été (mai à septembre) de la période 1996-2014. UrbClim parvient globalement à reproduire le comportement de l'ICU : les écarts de températures entre la ville et la campagne environnante sont plus importants la nuit qu'en journée. On voit aussi qu'UrbClim a tendance à surestimer l'ICU durant la nuit, de l'ordre de 1°C. Cette surestimation est causée par les limitations du module atmosphérique d'UrbClim et de ses forçages atmosphériques. En effet, nous avons mis en évidence dans la Section 1.3.2.2 qu'UrbClim ne reproduisait que partiellement l'effet de vallée. La décroissance de la température avec l'altitude est en effet prise en compte par le modèle. Toutefois, les écoulements d'air froid depuis les plateaux vers les fonds de vallée ne sont pas reproduits par le modèle. Ses forçages météorologiques sont à 30 km de résolution et une telle résolution est trop grossière pour reproduire la microcirculation atmosphérique de la vallée de la Meuse. La proximité de la station d'Herstal avec la Meuse peut également contribuer à rafraîchir les températures nocturnes, phénomène qui n'est pas non plus pris en compte par UrbClim. Ainsi la température nocturne de l'air de notre station urbaine est plus fraîche dans la réalité que dans le modèle. L'ICU nocturne est dès lors moins grande dans la réalité que dans le modèle.

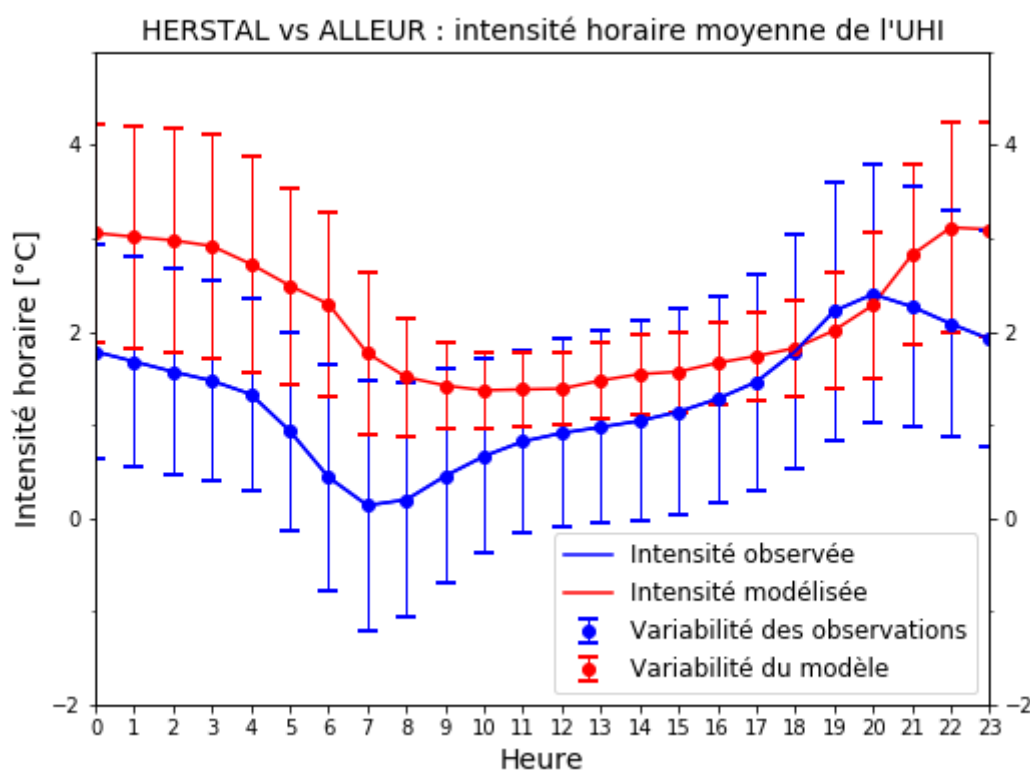


Figure 9. Cycle journalier moyen de l'ICU observé et simulé pour les mois d'été (mai à septembre) de la période 1996-2014.

Signalons que le choix des stations d'Herstal et d'Alleur comme station urbaine et rurale de référence est un choix par défaut : il n'y avait pas de meilleure candidate à notre disposition. Il existe en effet des localisations plus urbaines et plus rurales mais qui ne sont malheureusement pas équipées de stations de mesures. Ainsi, l'intensité de l'ICU à Liège est plus grande dans la réalité. La Figure 10 montre l'intensité moyenne de l'ICU à 23h durant les étés de la période 1996-2014 modélisée par UrbClim et permet d'illustrer ce propos. En prenant, un pixel typiquement rural (dans une zone où l'ICU vaut 0), on voit que l'intensité de l'ICU modélisé atteint environ 5°C dans le centre-ville de Liège et à Herstal alors qu'en prenant Alleur comme référence l'ICU modélisée à 23h atteint environ 3°C. Les limitations d'UrbClim restent toutefois valables peu importe la localisation des stations de références. Ainsi la valeur d'intensité d'ICU est probablement surestimée d'au moins 1°C à 23h (Figure 9).

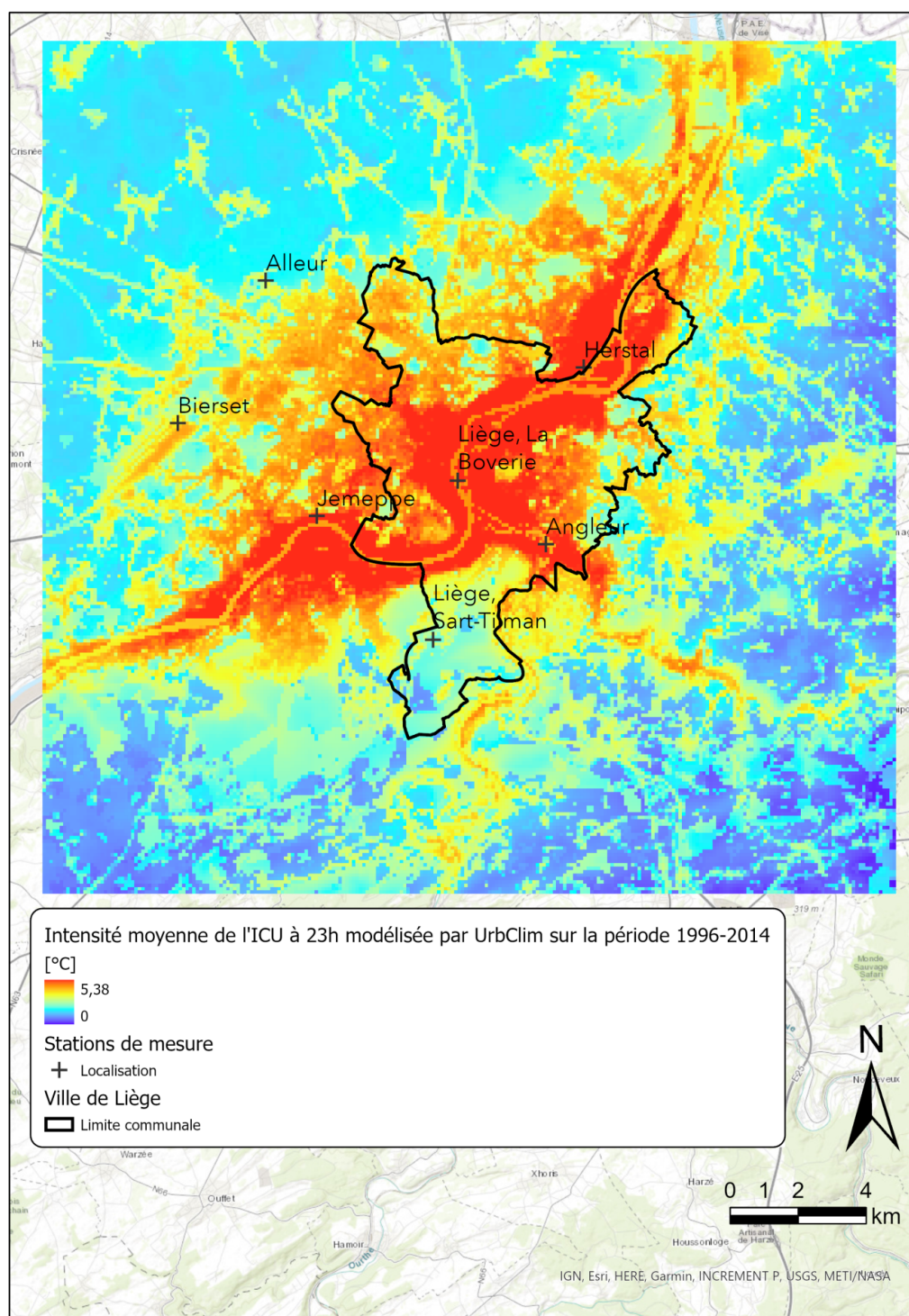


Figure 10. Intensité moyenne de l'ICU à 23h modélisée par UrbClim pour les étés de la période 1996-2014.

1.3.3. EVALUATION DES TEMPÉRATURES DE SURFACE EN VALEUR ABSOLUE

L'image produite pour 2014 par UrbClim et celle produite par LANDARTs sont présentées à la Figure 11. Les deux images révèlent les mêmes zones de très forte température de surface, cependant le modèle UrbClim affiche globalement une température moins élevée que l'image LANDARTs. Cette observation est confirmée par la Figure 12 qui représente le nuage de points de 300 points tirés au hasard sur la totalité de la carte.

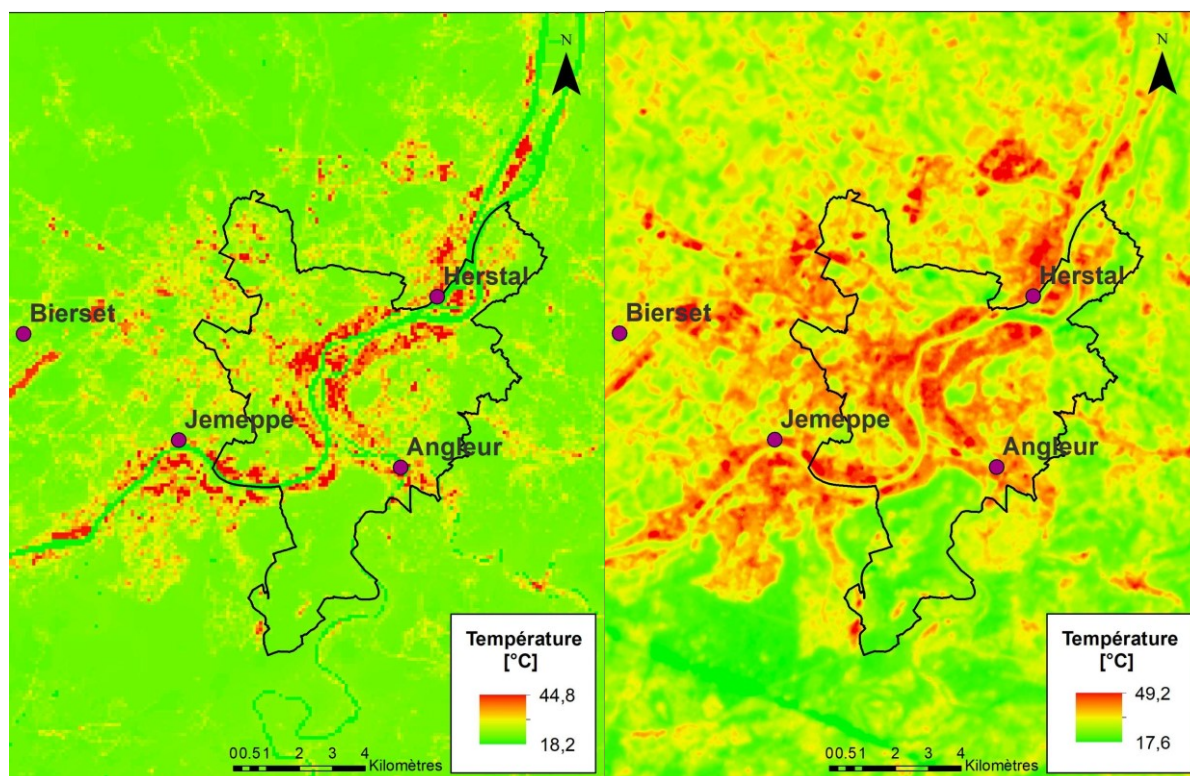


Figure 11. Estimation des températures de surface à 10h30 (UTC+0) via d'UrbClim (gauche) et LANDARTs (droite) pour le 31 juillet 2014.

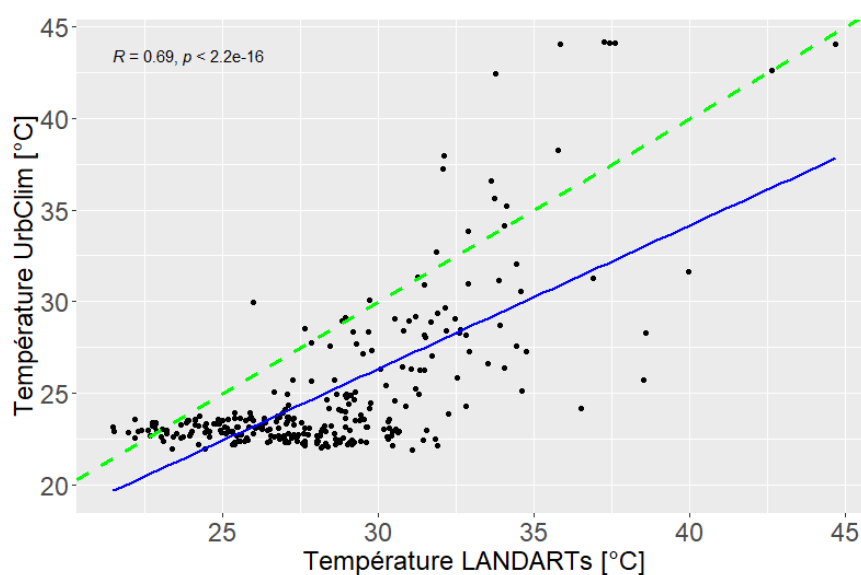


Figure 12. Relation entre les températures de surface des images UrbClim et LANDARTs pour le 31 juillet 2014.

Sur la Figure 12, la ligne bleue correspond à la régression linéaire et la ligne verte à la droite $x = y$. Le RMSE de la régression linéaire est égal à 7,4 °C. La corrélation entre les deux prédictions est égale à 0,69. Les valeurs modélisées par UrbClim sont en moyenne inférieures de 3,8 °C aux LST observées par Landsat.

Les mêmes procédures de prédiction des températures de surface avec UrbClim et LANDARTs ont été effectuées pour le 23 août 2019. Un voile nuageux est présent sur la gauche de l'image Landsat, ce qui produit des valeurs de températures de surfaces trop faibles, ces valeurs ont donc été supprimées (Figure 13).

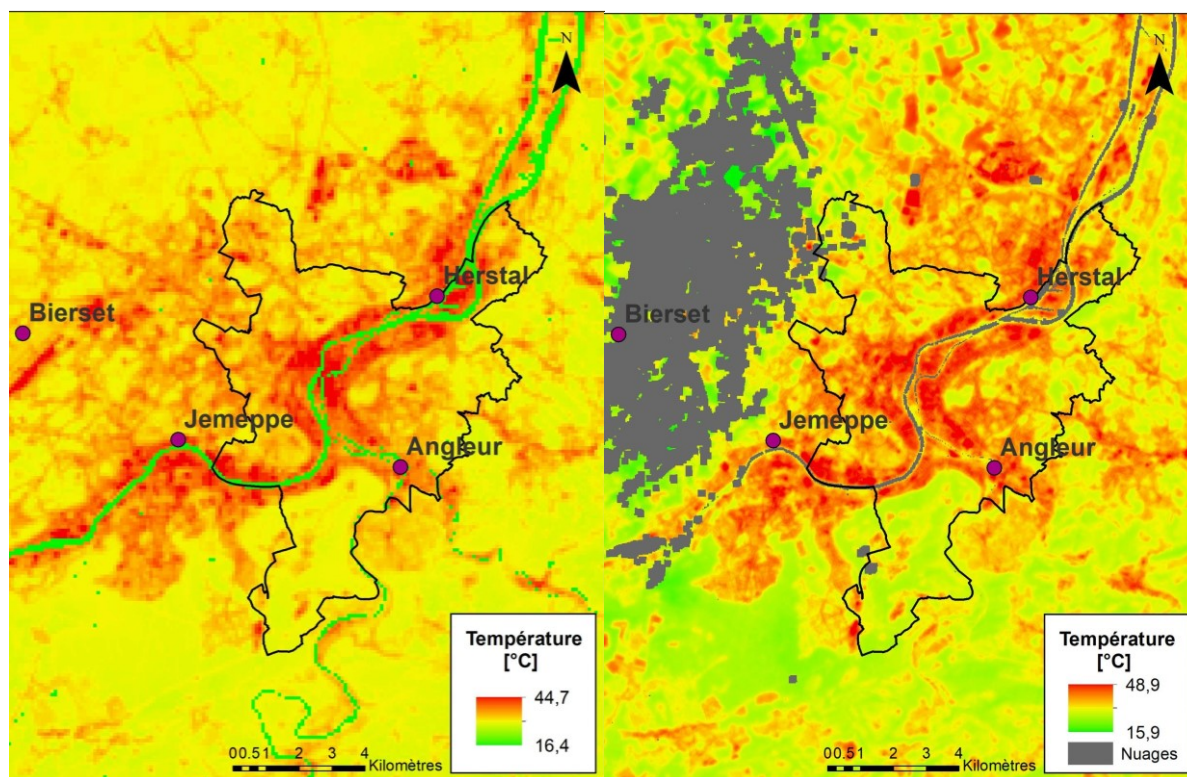


Figure 13. Estimation des températures de surface à 10h30 (UTC+0) via d'UrbClim (gauche) et Landsat (droite) pour le 23 août 2019.

La Figure 14 représente le nuage de 300 points tirés à l'intérieur des limites de la commune de Liège, en dehors des zones couvertes par des nuages.

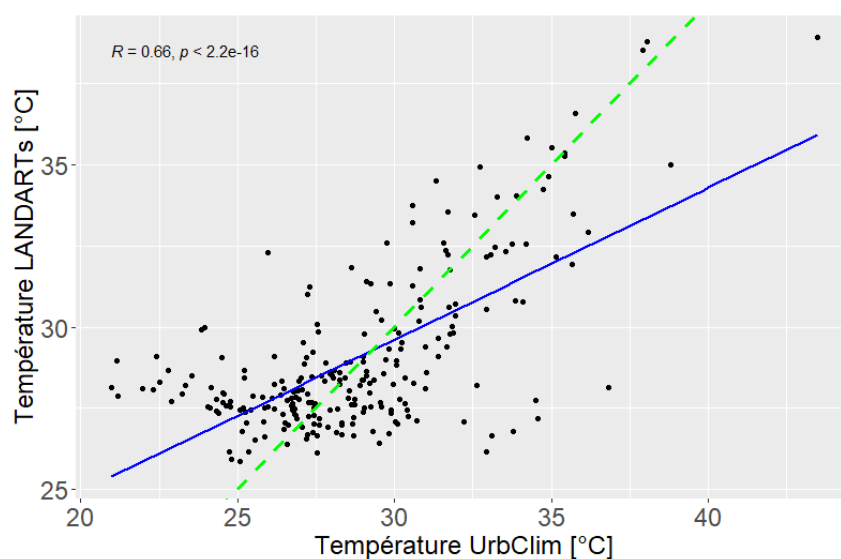


Figure 14. Relation entre les températures de surface des images UrbClim et LANDARTs pour le 23 août 2019.

La corrélation vaut 0,66 et le RMSE vaut 2,6 °C soit 4,8 °C de moins que pour le 31 juillet 2014. On remarque aussi que le biais moyen de -3,8°C présent en 2014 n'est plus présent en 2019.

Ces différences de performances d'UrbClim entre le 31 juillet 2014 et le 23 août 2019 proviennent de la mise à jour des forçages d'UrbClim, et en particulier de ses forçages atmosphériques, pour la simulation d'août 2019, comme détaillé dans la Section 1.2.1. Les réanalyses ERA5 utilisées pour la simulation d'août 2019 présentent certaines améliorations significatives par rapport aux ERA-interim utilisées pour la simulation de 2014. Ces améliorations impactent directement sur les performances d'UrbClim comme témoigné ici. Plus de détails sont fournis dans la Section 1.4.1.

1.3.4. DÉTECTION DES ÎLOTS DE CHALEUR DE SURFACE

L'objectif principal de la validation des températures de surface d'UrbClim à l'aide d'images satellitaires, en l'occurrence Landsat, est l'évaluer le modèle continûment dans l'espace, là où les techniques traditionnelles sont basées sur des méthodes ponctuelles (comme illustrés dans la Section 1.3.2). Le but de cette section est ainsi de déterminer si UrbClim reproduit correctement la variabilité spatiale observée et modélise correctement les îlots de chaleur de surface et, par extension, si les îlots de chaleur sont localisés aux bons endroits.

Les cartes ont été divisées en 100 classes contenant le même nombre de pixels, chaque classe représente donc un centile. La Figure 15 montre, en blanc, les 10 % des pixels les plus chauds, c'est-à-dire tous les pixels supérieurs au 90^{ème} centile (*percentile 90* en anglais, abrégé P90). Ils sont appelés îlots de chaleur de surface.

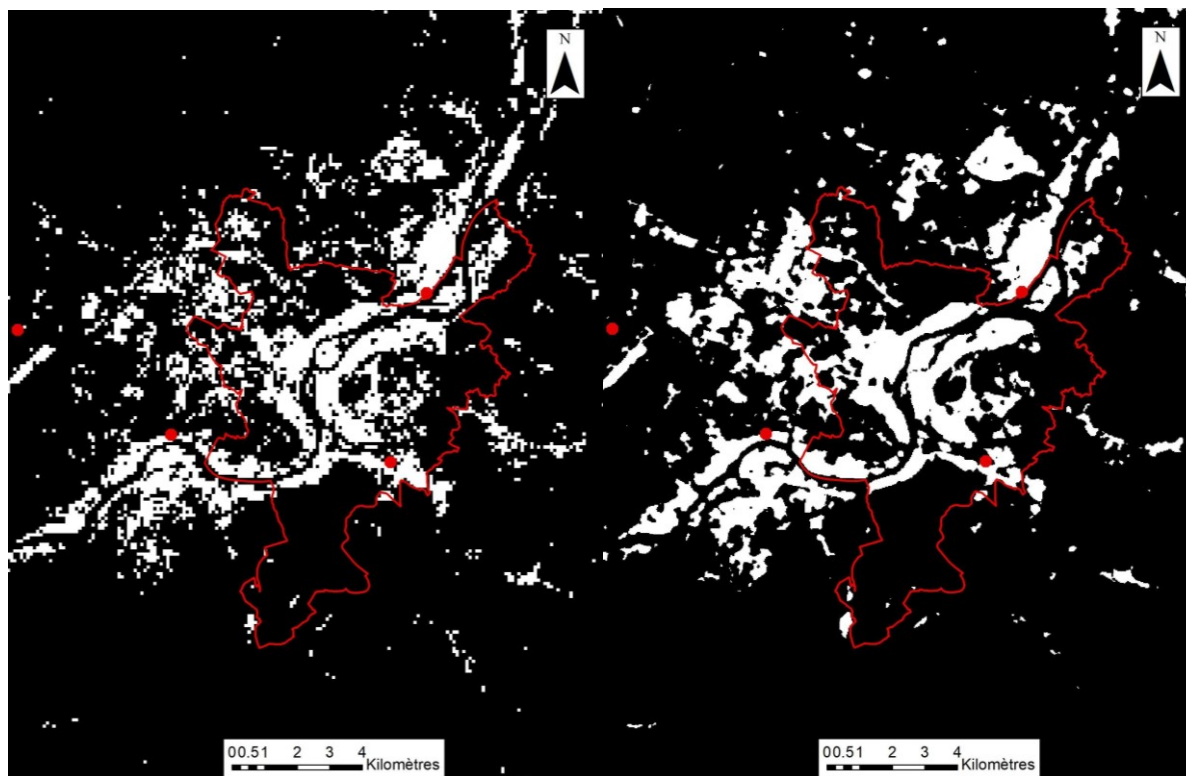


Figure 15. Carte UrbClim (gauche) et LANDARTs (droite) avec les 10 % les plus chauds en blanc pour le 31 juillet 2014.

A première vue les deux images semblent très similaires. Le Tableau 11 quantifie la concordance des deux cartes avec la matrice de confusion pour 1000 points tirés au hasard sur l'entièreté de la carte.

Tableau 11 - Matrice de confusion pour 1000 points tirés sur toute la carte pour le 31 juillet 2014.

	> P90 UrbClim	< P90 UrbClim	Exactitude
> P90 Landsat	54	35	0,61
< P90 Landsat	30	881	0,97
Exactitude	0,64	0,96	0,94

Comme attendu, on peut voir qu'à peu près 90 % des points se trouvent hors des îlots de chaleur de surface. Cela donne une très bonne exactitude globale mais n'est pas représentatif de la qualité des prédictions. Il faut faire en sorte de prendre plus de points à l'intérieur d'îlots de chaleur de surface. La zone délimitée par la commune de Liège semble plus dense en îlots de chaleur de surface. Le Tableau 12 reprend la matrice de confusion pour 500 points tirés au sein des limites de la commune.

Tableau 12 - Matrice de confusion pour 500 tirés au sein de la commune de Liège pour le 31 juillet 2014.

	> P90 UrbClim	< P90 UrbClim	Exactitude
> P90 Landsat	95	28	0,77
< P90 Landsat	46	331	0,88
Exactitude	0,67	0,92	0,85

En tirant les points uniquement à l'intérieur de la commune, on constate, effectivement, que plus de points se situent au sein d'îlots de chaleur de surface. La concordance des îlots de chaleur de surface est dès lors légèrement plus élevée.

Afin de savoir quel pourcentage des îlots de chaleur de surface est commun entre les deux cartes, 200 points ont été tirés au sein des îlots de chaleur de surface d'UrbClim et 200 dans les îlots de chaleur de surface de Landsat. Le pourcentage de ces points communs entre les deux cartes correspond au pourcentage de la surface commune entre les deux cartes. Le Tableau 13 montre que les deux images ont 66% de leurs surfaces les plus chaudes en commun. Si la répartition était aléatoire cette surface commune vaudrait 10 %. Le coefficient de kappa associé, permettant de quantifier le niveau d'accord entre les deux cartes, est de 0,62, soit un accord fort entre les deux cartes. Ainsi, malgré les différences entre les valeurs absolues de température de surface, il existe une concordance entre les cartes sur la localisation des îlots de chaleur.

Tableau 13 - Matrice de confusion pour 400 points tirés dans les îlots de chaleur pour le 31 juillet 2014.

	> P90 UrbClim	< P90 UrbClim	Exactitude
> P90 Landsat	262	78	0,77
< P90 Landsat	60	/	/
Exactitude	0,81	/	0,66

La Figure 16 montre la localisation des 10 % les plus chauds pour les cartes produites pour l'année 2019.

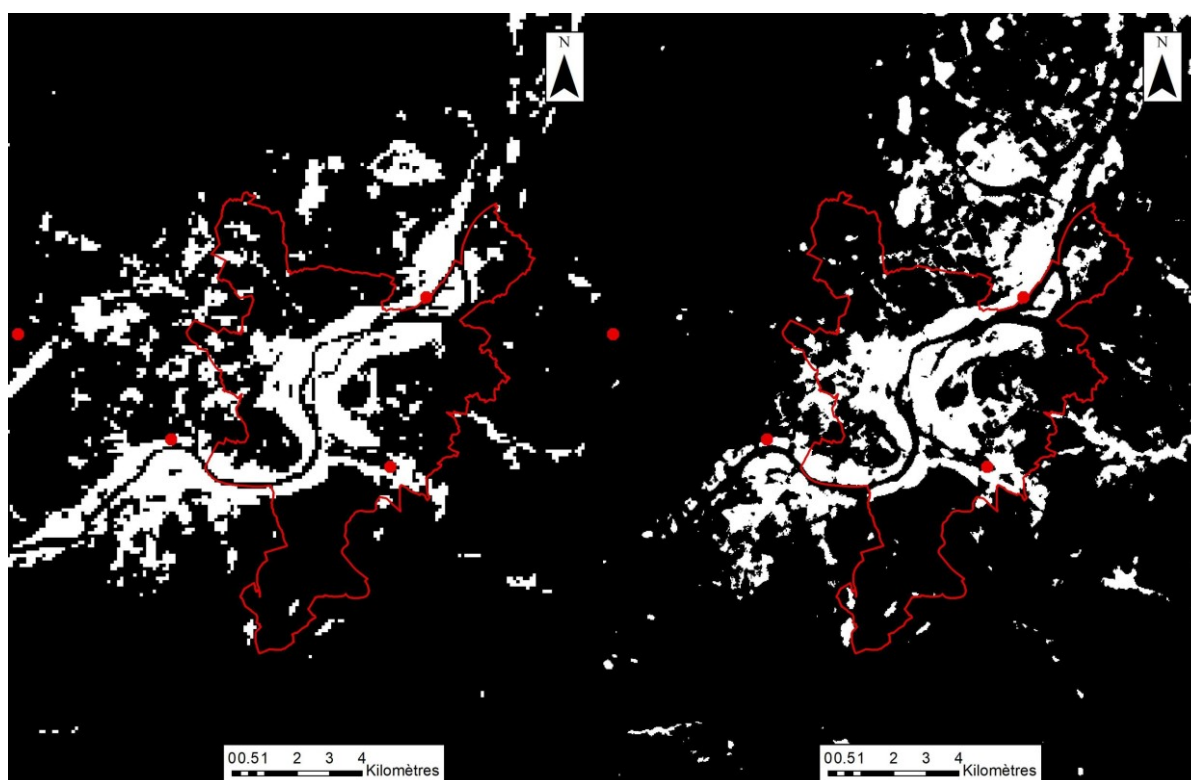


Figure 16. Carte UrbClim (gauche) et LANDARTs (droite) avec les 10 % les plus chauds en blanc pour le 23 août 2019.

Au sein de la commune de Liège, 64 % des zones chaudes sont communes (66 % pour l'image de 2014). La matrice de confusion (Tableau 14) est construite avec 300 points tirés au hasard à l'intérieur des limites de la commune et montre une précision globale de 86 % en 2019, ce qui est similaire à 2014 (85 %).

Tableau 14 - Matrice de confusion pour 300 points tirés au sein de la commune de Liège pour le 23 août 2019.

	> P90 UrbClim	< P90 UrbClim	Exactitude
--	---------------	---------------	------------

> P90 Landsat	60	14	0,81
< P90 Landsat	27	199	0,88
Exactitude	0,69	0,93	0,86

Sur les Figures 15 et 16, on peut voir que les îlots de chaleur de surface définis comme étant les 10 % les plus chauds suivent la structure du bâti. Les bords de Meuse sont densément construits et les îlots de chaleur de surface se trouvent à cet endroit. Ces observations montrent à quel point le bâti a une influence prépondérante sur les températures de surface. Cet effet est dû, entre autres, à l'utilisation de matériaux de couleur sombre (routes et bâtiments) qui absorbent une part importante du rayonnement solaire incident, à l'imperméabilisation des surfaces qui diminue l'évaporation ou encore au piégeage du rayonnement à cause de la structure en 3 dimensions des rues (Bruxelles Environnement, 2014).

Afin de discriminer les îlots chaleur de surface entre eux, les Figures 17 et 18 ont été réalisées en mettant en blanc uniquement les 5 % les plus chauds au sein de la commune.

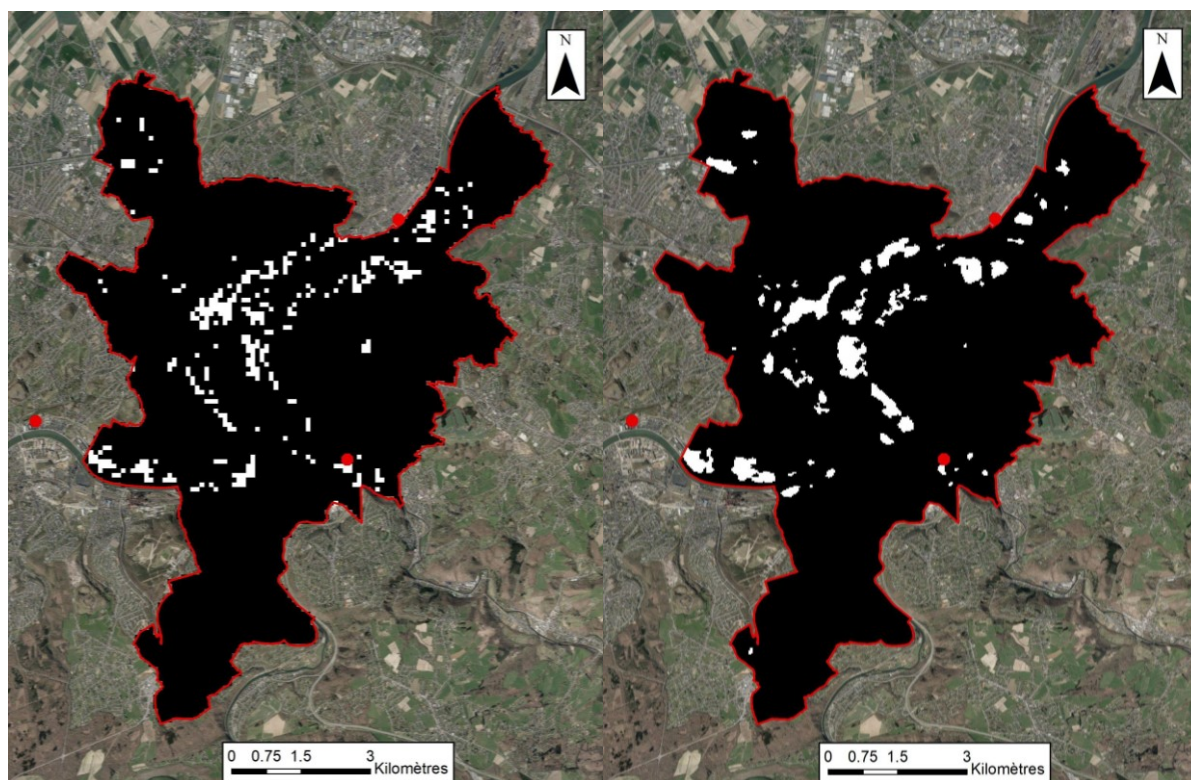


Figure 17. Carte UrbClim (gauche) et LANDARTs (droite) avec les 5 % les plus chauds en blanc pour le 31 juillet 2014.

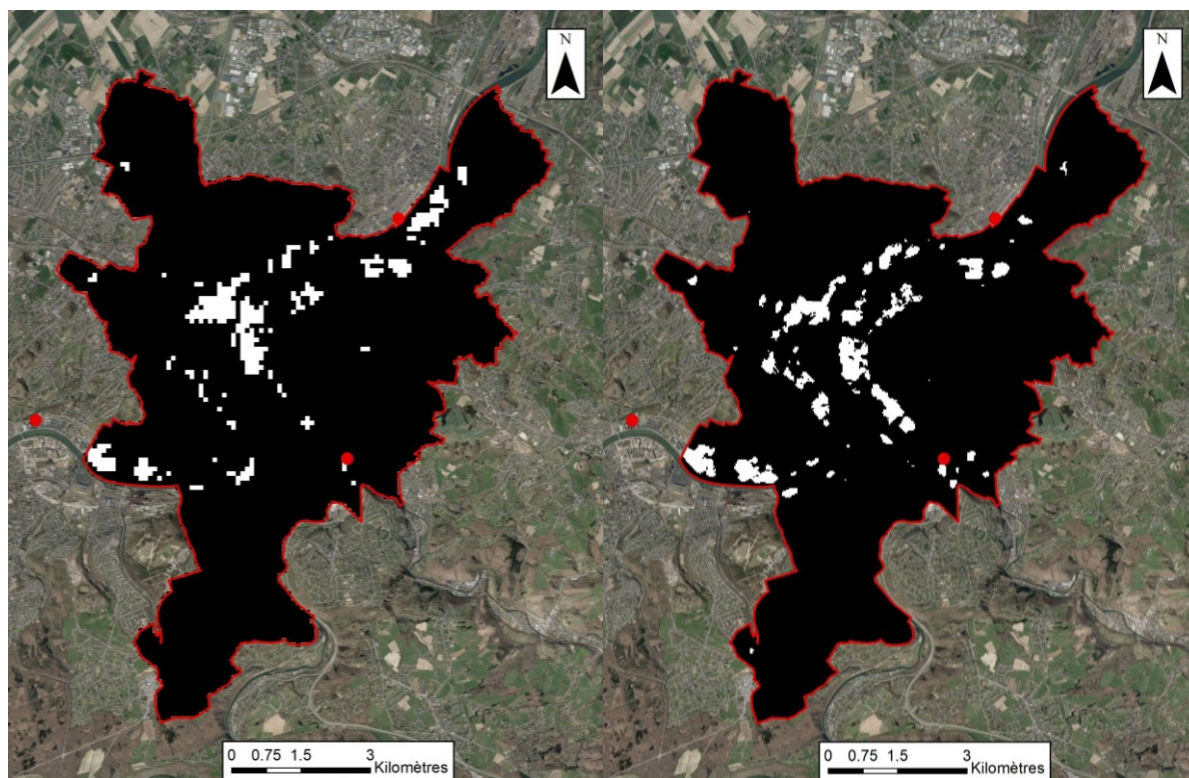


Figure 18. Carte UrbClim (gauche) et LANDARTs (droite) avec les 5 % les plus chauds en blanc pour le 23 août 2019.

Sept quartiers possèdent d'importants îlots de chaleur de surface sur les quatre cartes des Figures 17 et 18. Il s'agit des quartiers Centre, Outremeuse, Amercoeur-Longdoz, Saint-Léonard et Droixhe (Eco), Bressoux-Droixhe et les zones industrielles autour du stade du quartier de Sclessin.

Les matrices de confusions suivantes montrent que, malgré la réduction des surfaces définies comme îlots de chaleur par rapport aux Figures 15 et 16, près de la moitié des zones prédites comme étant des îlots de chaleur de surface par le modèle UrbClim et Landsat sont communes. L'exactitude globale du modèle UrbClim vaut 0,95 (Tableaux 15 et 16).

Tableau 15 - Matrice de confusion des surfaces les plus chaudes en hectares (> P95) au sein de la commune de Liège pour le 31 juillet 2014.

	> P95 UrbClim	< P95 UrbClim	Exactitude
> P95 Landsat	1,6	2,1	0,43
< P95 Landsat	1,9	62,3	0,97
Exactitude	0,46	0,97	0,94

Tableau 16 - Matrice de confusion des surfaces les plus chaudes en hectares (> P95) au sein de la commune de Liège pour le 23 août 2019.

	> P95 UrbClim	< P95 UrbClim	Exactitude
> P95 Landsat	1,8	1,6	0,53
< P95 Landsat	1,6	62,8	0,98
Exactitude	0,53	0,98	0,95

Nous pouvons conclure que malgré l'existence d'une variabilité importante du point de vue des valeurs absolues des températures de surface, UrbClim parvient à reproduire le pattern de l'îlot de chaleur de surface et par extension, celui de l'îlot de chaleur. Ce constat est valable aussi bien pour le set de simulation utilisant les ERA-interim que pour les simulations utilisant les ERA5.

1.4. DISCUSSION

L'évaluation d'UrbClim 100m a démontré la capacité du modèle à reproduire de manière satisfaisante les températures de l'air et de surface observée d'un point de vue de leurs valeurs absolues et de leur variation dans l'espace. Toutefois, certains écarts entre les observations et le modèle ont été mis en évidence. Ces derniers sont imputables d'une part aux limitations du modèle et de ses inputs. D'autre part, des biais dans les observations expliquent également une partie de ces écarts. L'impact des limitations mises en évidence dans UrbClim sur la création et l'interprétation des indicateurs d'îlot de chaleur urbain calculés sur base des sorties du modèle est finalement discuté.

1.4.1. BIAIS DUS AUX FORÇAGES ATMOSPHÉRIQUES D'URBCLIM

La circulation atmosphérique d'UrbClim est directement prescrite par ses forçages atmosphériques. Ceux-ci, les ERA-interim, sont connus pour surestimer les vitesses de vent et la turbulence nocturnes, et pour entraver le refroidissement radiatif de la nuit. En outre, la résolution spatiale des ERA-interim (30 km) ne permet pas de capter la micro-circulation de l'air dans les vallées. Comme le module atmosphérique d'UrbClim est assez simple dans le sens où les masses d'air sont advectées dans le modèle et où le modèle ne recalcule pas une circulation locale en fonction de la topographie de la ville modélisée, les limitations présentes dans les ERA-interim se retrouvent dans les sorties d'UrbClim : les températures nocturnes sont surestimées et l'effet de vallée est partiellement pris en compte.

La mise à jour des forçages atmosphériques avec le remplacement des ERA-interim par les ERA5 a permis de réduire partiellement ces biais. Le schéma radiatif des ERA5 est plus performant de sorte que le refroidissement radiatif nocturne est mieux modélisé de même que les températures de surface. La résolution spatiale des ERA5 est également plus fine : 12 km. Toutefois, cette résolution reste insuffisante pour modéliser complètement l'effet de vallée dans des vallées encaissées comme celle de la Meuse.

1.4.2. BIAIS DUS AUX PROPRIÉTÉS DE SURFACE D'URBCLIM

L'analyse qui va suivre illustre l'impact localisé de la date et du caractère statique des données utilisées pour définir les propriétés de surface d'UrbClim.

Les cartes de modélisation des températures de surface par UrbClim possèdent certaines limites qui sont illustrées dans cette section par deux exemples. Les images de la Figure 19 présentent un gros plan sur les images de la Figure 11 ainsi que sur l'orthophoto wallonne de 2015 au niveau de l'aéroport de Bierset.

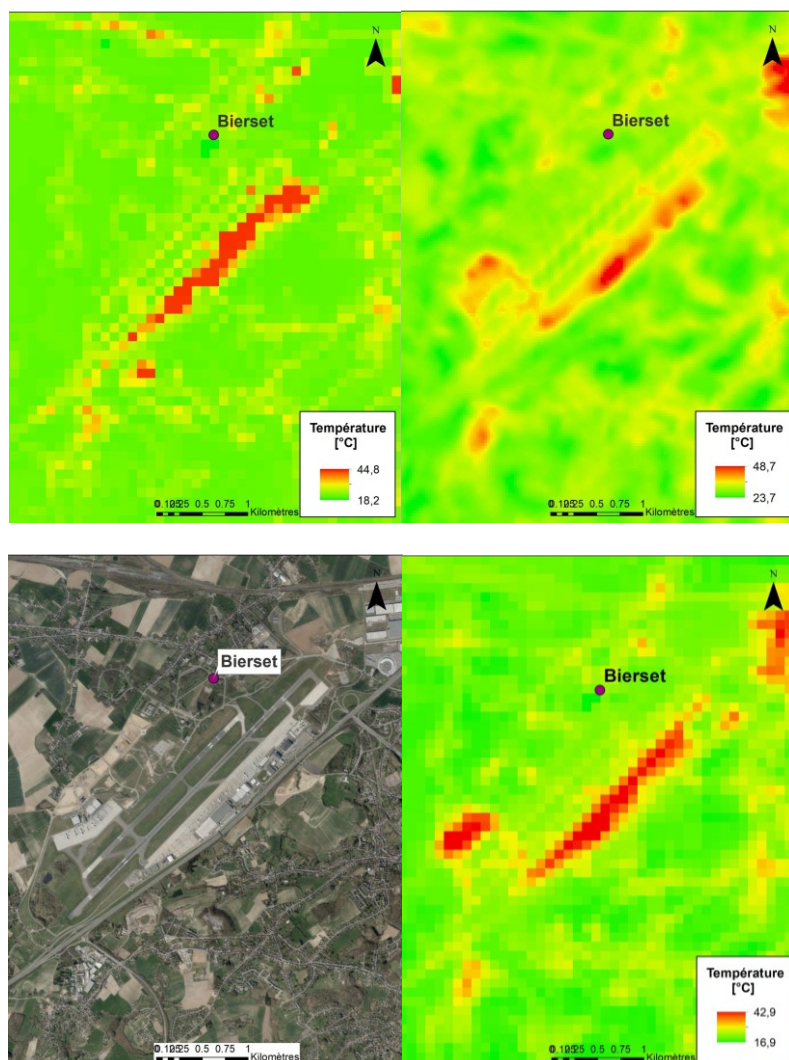


Figure 19. Gros plans de l'aéroport de Bierset sur les images UrbClim (haut gauche) et Landsat (haut droite) de 2014, l'orthophoto wallonne de 2015 (bas gauche) et l'image UrbClim de 2019 (bas droite).

On remarque sur ces images que les pistes et les bâtiments de l'aéroport ont une température de surface plus chaude que les alentours. Ce résultat était attendu puisque les matériaux de construction retiennent mieux la chaleur (IRM, 2020) mais on peut constater qu'à droite, sur le milieu de l'image, se trouve une tache rouge visible sur l'image Landsat mais pas sur UrbClim. Cette tache correspond à une zone bétonnée visible sur l'orthophoto wallonne. Cette zone n'a été bâtie qu'en 2006 et n'est dès lors pas prise en compte par la COSW 2007 qui a servi de base aux classes de couverture de sol prescrites dans les simulations d'UrbClim réalisées dans le cadre de SmartPop. Cette tache est bien présente sur l'image UrbClim de 2019. Le modèle UrbClim pour les températures de surface est particulièrement sensible au bâti et il y a un décalage entre

l'urbanisation et la mise à jour des données d'entrée du modèle, ces dernières ne pouvant être mises à jour à chaque changement d'affectation du territoire.

La Figure 20, un zoom de la zone située en haut au centre de la Figure 13, illustre une seconde limite du modèle UrbClim.

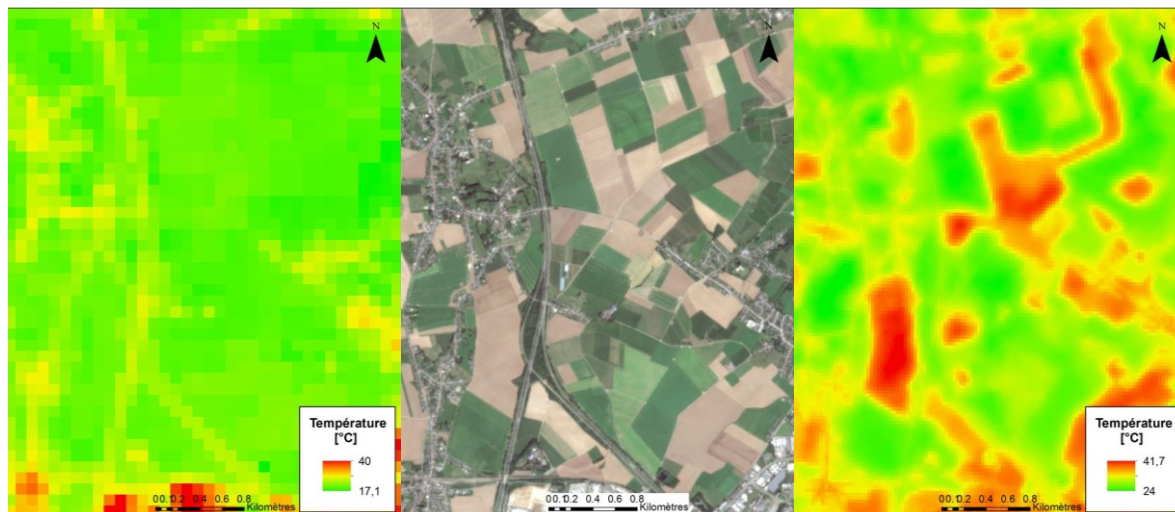


Figure 20. Gros plan sur les images du 23 août 2019 d'UrbClim (gauche) et LANDARTs (droite) et de l'image Sentinel-2 du 24 août 2019 (centre).

La Figure 20 montre que les sols nus ont une température de surface nettement supérieure à ceux couverts par de la végétation. C'est une conclusion attendue puisque l'absence de végétation empêche la transpiration de l'eau par les plantes et donc la dissipation de chaleur résultant de ce processus (Bruxelles Environnement, 2014). Cette particularité est visible sur l'image Landsat cependant elle n'est pas du tout présente sur UrbClim. Le modèle ne paraît pas sensible aux variations saisonnières et aux changements aussi rapides du sol. Les champs sont rassemblés dans la même classe d'occupation du sol et ont donc le même comportement dans le modèle UrbClim, indépendamment de leurs caractéristiques réelles à un moment donné. La présence de parcelles agricoles au sein de la commune de Liège est limitée, particulièrement au centre de la ville, là où l'effet d'îlots de chaleur urbains est le plus marqué, cette limite au modèle UrbClim a donc un impact limité sur sa qualité de prédiction.

1.4.3. BIAIS DUS AUX OBSERVATIONS

Deux stations se sont illustrées par leur comportement contre-intuitif au cours de l'évaluation de la température de l'air (T2m): Jemeppe et Sart-Tilman.

Dans le cas de **Jemeppe**, il est apparu que le modèle ne parvenait pas à reproduire de façon satisfaisante les températures mesurées, au contraire des autres stations de mesures : la corrélation y plafonne à 0.59 tandis que la RMSE y est deux fois plus grande qu'ailleurs (voir Section 1.3.2.1). L'analyse de la corrélation entre les températures mesurées à Jemeppe et celles mesurées au niveau des autres stations sur la même période montre que les températures mesurées à Jemeppe ont un comportement anormal (Tableau 17). La station de Jemeppe présente un comportement similaire à celle d'Herstal en raison de leur contexte similaire (en fond de vallée, à proximité de la Meuse). Toutefois, le modèle parvient à reproduire les spécificités de la station d'Herstal mais pas celles de Jemeppe (Section 1.3.2.1). La comparaison des températures mesurées à Herstal avec les mesures réalisées au niveau des autres stations

montrent que, contrairement à Jemeppe, Herstal affiche un comportement similaire aux autres stations (Tableau A1, Annexe A). L'effet de site à Jemeppe est dès lors confirmé.

Tableau 17 - Corrélation entre la température horaire de l'air (T_{2m}) mesurée à Jemeppe et les mesures réalisées à Alleur, Angleur, Bierset, Herstal et la Boverie entre les mois de mai et septembre de la période 1996-2014.

R	Jemeppe
Alleur	0,67
Angleur	0,69
Bierset	0,67
Herstal	0,98
La Boverie*	0,64

*période d'étude limitée à 1996-2012

La Figure 21 illustre l'environnement de la station de mesures de Jemeppe. On y voit que la station est cernée par de hauts arbres et de hauts bâtiments. Ce type d'emplacement empêche une ventilation (circulation de l'air) optimale telle que recommandée par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM, 2010) entraînant ainsi un effet de site. UrbClim, étant donné sa résolution spatiale de 100 m, ses forçages atmosphériques et la simplicité de son module atmosphérique, est dans l'impossibilité de modéliser des phénomènes aussi localisés.



Figure 21. Visualisation de l'environnement de la station de Jemeppe (Source : Google Earth).

Dans le cas du **Sart-Tilman**, un effet de site a également été suspecté. En effet, bien que les statistiques pour cette station soient satisfaisantes, les valeurs absolues des températures qui y sont mesurées sont comparables voire supérieures à celles mesurées à Bierset et à Alleur. Ce

comportement est contre-intuitif étant donné que l'altitude du Sart-Tilman est plus élevée et son environnement plus rural (Section 1.3.2.4).

Les maxima de température observés au Sart-Tilman, à Bierset et à Alleur durant l'été 2013 sont présentés sur la Figure 22. On observe que la température maximale du Sart-Tilman est presque systématiquement égale ou supérieure à celle d'Alleur et de Bierset. Cet écart plafonne à +2°C ce qui écarte la piste d'un problème instrumental.

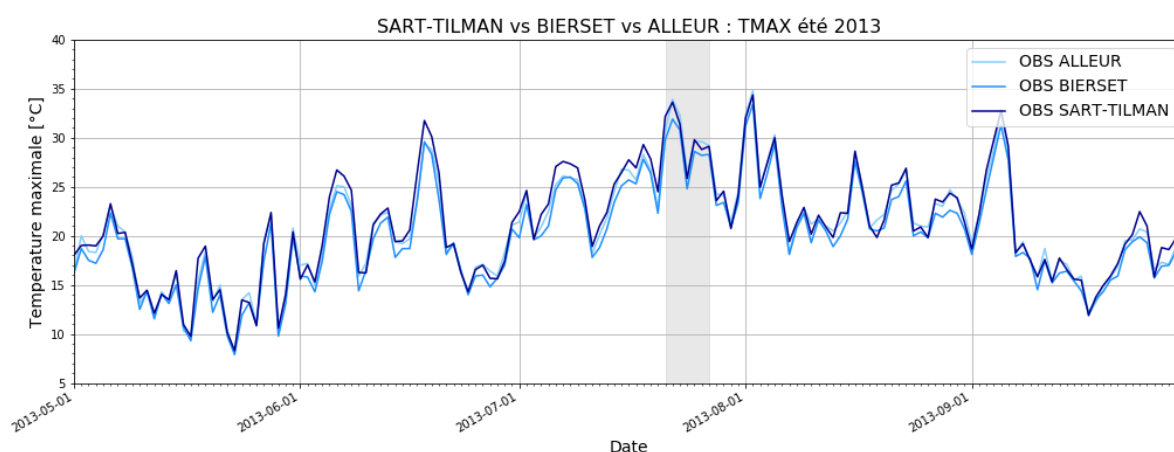


Figure 22. Variation de la température maximale observée au Sart-Tilman, à Bierset et à Alleur durant l'été 2013.

La Figure 23 visualise l'environnement immédiat de la station du Sart-Tilman. On peut ainsi constater que deux routes asphaltées passent de part et d'autre du parc météorologique, à moins de 10 m des capteurs de températures. Ces routes asphaltées augmentent localement la température de l'air. En outre, le site est cerné par de hauts arbres empêchant ainsi une bonne ventilation du site comme dans le cas de la station de Jemeppe. Nous sommes donc une nouvelle fois confrontés à un effet de site qui biaise les mesures de températures.



Figure 23. Visualisation de l'environnement de la station du Sart-Tilman (a) depuis les airs, et (b) depuis le sol (Source : Google Earth).

1.4.4. IMPACT DES LIMITATIONS D'URBCLIM SUR LES INDICATEURS D'ICU

D'un point de vue **des valeurs absolues**, l'évaluation d'UrbClim a montré que le modèle reproduisait les valeurs absolues des températures de l'air de manière satisfaisante. Le modèle s'est particulièrement illustré pour sa capacité à reproduire les températures maximales au contraire des températures minimales où le modèle présente un biais positif systématique. Les valeurs absolues des indicateurs basés sur les températures maximales seront dès lors fiables

tandis que les indicateurs basés sur les températures minimales seront systématiquement surestimés.

Pour illustrer ce propos, le nombre moyen de jours d'été ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) par an et le nombre moyen de nuits chaudes ($T_{\min} \geq 17^{\circ}\text{C}$) par an ont été calculés en utilisant les séries de températures observées et simulées par le modèle pour la période 1996-2014. Le Tableau 18 montre que le biais ne dépasse pas les $\pm 20\%$ pour le nombre moyen de jours d'été. Au contraire, le Tableau 19 montre que le nombre moyen de nuits chaudes par an est systématiquement surestimé par le modèle avec un biais loin d'être négligeable. Ce dernier varie en effet entre +79,1% à Alleur à +216,6% à Angleur.

Tableau 18. Nombre moyen de jours d'été ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) observées et simulées par UrbClim par pour la période 1996-2014.

Station	Nombre moyen de jours d'été observés [jours/an]	Nombre moyen de jours d'été simulés [jours/an]	Biais [%]
ALLEUR	28,6	25	-12,5
ANGLEUR	35,6	37,4	5
BIERSET	25,6	29,7	16
HERSTAL	37	39,9	7,8
LA BOVERIE*	34,9	41	17,5

*période d'étude limitée à 1996-2012

Tableau 19. Nombre moyen de nuits chaudes ($T_{\min} \geq 17^{\circ}\text{C}$) par an observées et simulées par UrbClim par pour la période 1996-2014.

Station	Nombre moyen de nuits chaudes observées [nuits/an]	Nombre moyen de nuits chaudes simulées [nuits/an]	Biais [%]
ALLEUR	9,1	16,2	79,1
ANGLEUR	11,7	37,2	216,6
BIERSET	12,9	27,1	109,3
HERSTAL	20,7	46,3	123,4
LA BOVERIE*	18,1	48,5	167,5

*période d'étude limitée à 1996-2012

En outre, il a été démontré que l'intensité de l'ICU était surestimée la nuit car le modèle néglige les écoulements d'air froid par gravité lors des nuits sans vent. Il a également été démontré que l'ICU atteignait son intensité maximale durant la nuit. Par conséquent, les intensités maximales de l'ICU atteintes en fond de vallée seront certainement surestimées. Étant donné la physionomie de Liège, ces zones correspondent également aux zones les plus urbanisées et par conséquent les plus chaudes.

Concernant la fiabilité du **pattern ou variabilité spatiale** des variables modélisés, il a été démontré que le pattern produit par le modèle correspondait à ce qui est observé sur le terrain. Dès lors, le pattern des indicateurs d'ICU sera lui aussi fiable tout indicateur confondu.

1.5. CONCLUSION

Le modèle UrbClim est un modèle climatique spécialisé dans la modélisation du climat des villes. Ce modèle a été choisi pour simuler le climat de la ville de Liège dans le but de caractériser son îlot de chaleur urbain (ICU). Dans cette Tranche 3 du Plan Canopée de la ville de Liège, afin d'identifier les limitations du modèle UrbClim et de procéder à une interprétation critique des indicateurs d'ICU produits sur Liège, la capacité d'UrbClim à reproduire la variabilité temporelle et spatiale de la température de l'air à proximité du sol (T2m) et de la température de surface (LST) a été évaluée.

Dans cette optique, les simulations d'UrbClim réalisées dans le cadre du projet SMARTPOP (1996-2014) et deux nouvelles simulations UrbClim avec des inputs actualisés (25 juillet 2019 et 23 août 2019) ont été comparées à des observations. Concernant la T2m, ce sont des séries temporelles s'étendant de 1996 à 2014 de température issues de six stations météorologiques qui ont été utilisées. L'évaluation d'UrbClim montre que les performances du modèle sont satisfaisantes surtout pour les températures diurnes, maximales, et l'intensité de l'ICU en journée. Le modèle a toutefois tendance à surestimer les températures nocturnes minimales de l'ordre de 20% en moyenne, tandis que l'ICU nocturne est surestimée par UrbClim. Ces biais sont imputables à la fois à la faible résolution spatiale et à des biais dans les forçages météorologiques (ERA-interim), à la résolution spatiale du modèle, à la simplicité du module atmosphérique du modèle (la microcirculation n'est pas recalculée par UrbClim), et d'autre part à des effets de sites au niveau des mesures qu'UrbClim 100 m ne peut modéliser.

Concernant la LST, deux images Landsat 8 prises à des dates différentes ont été utilisées : le 31 juillet 2014 et le 23 août 2019. Les différences entre UrbClim et les images Landsat sont assez marquées en 2014 mais moins en 2019. Bien que la corrélation ne change pas significativement, la dispersion des données est nettement plus faible en 2019 (RMSE = 2,6 °C) qu'en 2014 (RMSE = 7,4 °C). De plus, le biais moyen de -3,8°C présent en 2014 disparaît en 2019. Il apparaît donc que la mise à jour des données pour produire la carte de 2019 ait été efficace. La similitude entre UrbClim et les images Landsat est manifeste et est encore plus marquée lorsqu'on regarde la localisation des 10 % les plus chauds. En effet, pour les deux années, $\frac{2}{3}$ de la surface d'îlots de chaleurs est commune entre les cartes. UrbClim est donc visiblement capable de modéliser les îlots de chaleur malgré certaines limites au niveau des variations saisonnières et de la mise à jour des données.

Étant donné les biais mis en évidence dans UrbClim, il apparaît que les indicateurs d'ICU basés sur les températures maximales seront plus fiables que les indicateurs d'ICU basés sur les températures minimales. En outre, les intensités maximales de l'ICU atteintes en fond de vallée seront certainement surestimées. Étant donné la physionomie de Liège, ces zones correspondent également aux zones les plus urbanisées et par conséquent les plus chaudes. La variabilité spatiale des indicateurs d'ICU sera quant à elle fiable tout indicateur confondu.

2. TRANCHE 3 - TÂCHE 2.5.3 : PRODUCTION D'UNE BASE DE DONNÉES

2.1. OBJECTIFS

Ce chapitre présente et commente une série de cartes d'indicateurs d'ICU produits à partir des simulations climatiques d'UrbClim (100m) durant les mois propices aux canicules (entre mai et septembre) et de la simulation du confort thermique ressenti par les habitants de Liège le 25 juillet 2019, ce jour ayant été choisi en concertation avec les autorités de Liège (1 m). Ce confort thermique a été appréhendé grâce au calcul de la température au thermomètre-globe mouillé (*wet-bulb globe temperature* en anglais, WBGT), cette dernière étant le seul indice de température ressentie tenant compte des effets simultanés de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire sur l'homme.

2.2. LISTE DES INDICATEURS D'ICU CARTOGRAPHIÉS

Les indicateurs d'ICU produits se répartissent en deux catégories en fonction de leur résolution spatiale :

- Indicateurs à 100 m basé sur les sorties d'UrbClim
 - 1) Nombre moyen de nuit chaude (Températures minimales supérieures ou égales à 17°C) : période 1996-2014 ;
 - 2) Nombre moyen de jour d'été (Températures maximales supérieures ou égales à 25°C) par an : période 1996-2014 ;
 - 3) Nombre moyen de jour de canicule (Températures maximales supérieures ou égales à 30°C) par an : période 1996-2014 ;
 - 4) Intensité de l'ICU pour les températures maximales le 25/07/2019 (Différences de températures maximales par jour par rapport au pixel de référence de type rural moyennées sur le 25/07/2019) ;
 - 5) Intensité de l'ICU lors des vagues de chaleur de la période 1996-2014 pour les températures maximales (Différences de températures maximales par jour par rapport au pixel de référence de type rural moyennées sur la période 1996-2014) ;
 - 6) Intensité de l'ICU pour les températures minimales le 25/07/2019 (Différences de températures minimales par jour par rapport au pixel de référence de type rural le 25/07/2019);
 - 7) Intensité de l'ICU lors des vagues de chaleur de la période 1996-2014 pour les températures maximales (Différences de températures maximales par jour par rapport au pixel de référence de type rural moyennées sur la période 1996-2014) ;
 - 8) Nombre moyen de degré-jour de canicule par an lors des vagues de chaleur de la période 1996-2014 ;
- Indicateurs à 1 m basés sur la simulation de la WBGT (25/07/2019)
 - 9) WBGT : valeurs moyennes ;

- 10) Stress thermique urbain (STU) : valeurs moyennes ;
- 11) WBGT : valeurs maximales ;
- 12) STU : valeurs maximales ;
- 13) WBGT : valeurs à 15h ;
- 14) STU : valeurs à 15h ;
- 15) WBGT : valeurs à 23h ;
- 16) STU : valeurs à 23h ;
- 17) Îlots les plus frais (WBGT inférieure à 29°C tout au long de la journée).

Le Stress Thermique Urbain (STU) a été calculé comme suit :

$$STU = (WBGT_{locale} - WBGT_{min}) / (WBGT_{max} - WBGT_{min}) * 100$$

avec,

$WBGT_{min}$: la valeur la plus basse enregistrée à Liège toute heure confondue ;

$WBGT_{max}$: la valeur la plus haute enregistrée à Liège toute heure confondue ;

$WBGT_{locale}$: WBGT à un endroit donné à une heure donnée.

2.3. PRÉCAUTIONS D'USAGE

Les cartes présentées ci-après constituent des outils d'aide à la décision qui doivent toutefois être utilisés et interprétés en tenant compte de certains éléments.

Tout d'abord, le chapitre précédent a démontré la capacité d'UrbClim à simuler le microclimat urbain de Liège, avec néanmoins quelques réserves :

- Les valeurs absolues des indicateurs d'ICU basés sur les températures minimales sont moins fiables dans le sens où ils sont surestimés ;
- Les intensités maximales de l'ICU atteintes en fond de vallée sont surestimées. Étant donné la physionomie de Liège, ces zones correspondent aux zones les plus urbanisées et par conséquent les plus chaudes ;

Plus particulièrement, pour les indicateurs à 100 m :

- Les indicateurs sont construits à partir de la température de l'air à 2 m au-dessus du sol de sorte que tous les éléments et phénomènes physiques pouvant impacter la température de l'air à cette hauteur, qui ont une spatialité égale ou supérieure à la résolution d'UrbClim (100 m), et qui sont paramétrés dans le modèle, interviennent dans le calcul de ces températures de l'air à 2 m ;
- L'échelle d'analyse ne doit pas être plus fine que 100 m ;
- Les cartes de couverture de sol utilisées comme données d'entrée du modèle sont représentatives de la situation de 2007 et sont statiques dans les simulations. La couverture de sol a entretemps évolué de sorte que les espaces imperméabilisés,

végétalisés, construits après cette date ne sont pas pris en compte dans les indicateurs à 100 m.

Concernant les indicateurs à 1 m basés sur la simulation de la WBGT :

- La WBGT est modélisée à 2 m au-dessus du sol de sorte que tous les éléments et phénomènes physiques qui peuvent impacter la température à cette hauteur, qui ont une spatialité égale ou supérieure à la résolution spatiale du modèle (1 m), et qui sont paramétrés dans le modèle, sont pris en compte par le modèle lors du calcul de ces valeurs (ombrage des arbres, ombres portées par les bâtiments, rayonnement des matériaux de construction, évapotranspiration à l'échelle de l'arbre et des plans d'eau, etc) ;
- En raison de la résolution spatiale de ces indicateurs, l'échelle d'analyse ne doit pas être plus fine que 1 m ;
- Il faut plus analyser la variation spatiale que les valeurs absolues présentées sur les cartes. En effet les valeurs de WBGT ont été calculées pour un seul jour de canicule. Or, cette journée, le 25/07/2019, est la journée la plus extrême (la plus chaude) qu'a connu notre pays depuis 1833. Les valeurs absolues de WBGT seront dès lors extrêmes et ne seront représentatives de journée de canicule aux caractéristiques similaires. Toutefois, les projections climatiques prévoient une intensification des vagues de chaleur de sorte que des journées de canicules aussi intenses que celle du 25/07/2019 seront plus fréquentes dans le futur ;
- En raison du caractère extrême de la journée du 25/07/2019, les cartes de WBGT représentent l'inconfort thermique maximal que peuvent subir les liégeois dans pratiquement le pire des cas ;
- Les cartes de végétation utilisées comme données d'entrée du modèle sont représentatives de la situation de 2019. Il est possible qu'entretemps, la végétation urbaine ait été modifiée ;
- Les cartes représentant le bâti (empreintes des bâtiments et hauteur) utilisées comme données d'entrée du modèle sont également représentatives de la situation de 2019. Le bâti liégeois a entretemps évolué.

2.4.COMMENTAIRES DES CARTES LES PLUS PERTINENTES

2.4.1. JUSQU'À 5 FOIS PLUS DE NUITS CHAUDES DANS LE CENTRE DE LIÈGE QU'À LA CAMPAGNE / AU MOINS 2 FOIS PLUS DE JOURS DE CANICULE DANS LE CENTRE DE LIÈGE QUE DANS LES CAMPAGNES ENVIRONNANTES

Intéressons-nous d'abord aux nuits chaudes ($T_{min} \geq 17^{\circ}\text{C}$) (Figure 24) et aux jours de canicule ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) (Figure 25) :

- Le pattern est identique pour ces deux indices : en raison de l'ICU, les habitants résidant dans les zones les plus densément urbanisées du fond de la vallée de la Meuse subissent en moyenne plus de nuits chaudes et de jours de canicules que les habitants résidants sur les versants de la Meuse et sur les plateaux, là où le bâti est moins dense et la végétation plus dense ;

- Un habitant du centre de ville de Liège subit en moyenne plus de 50 nuits chaudes par an alors qu'un habitant des communes périphériques est et sud de Liège (Dalhem, Blégny, Herve, Fléron, Olne, Trooz, Chaudfontaine, Srpimont, Esneux, Neupré, Nandrin, Seraing, Flémalle, Engis) n'en connaîtra en moyenne qu'une dizaine. C'est donc jusqu' à 5 fois moins que dans le centre de Liège. Attention, les valeurs absolues sont surestimées car UrbClim surestime la température minimale. Toutefois, le ratio est fiable ;
- Concernant le nombre de jours caniculaires, un habitant du centre de Liège subit en moyenne entre 8 et 10 jours de canicule par an alors qu'en périphérie ce nombre est en moyenne inférieur à 4. C'est donc au moins 2 fois moins que dans le centre de Liège ;
- Les nuits chaudes sont plus fréquentes que les jours de canicule car l'îlot de chaleur urbain est plus intense la nuit que le jour ;
- Le pattern identifié pour ces deux indicateurs est aussi valable pour le nombre de jour d'été ($T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) présenté sur la Figure B1 en Annexe B. Un habitant du centre de Liège subit en moyenne entre 40 et 50 jours d'été par an alors qu'un habitant des communes périphériques sud et est de Liège n'en connaîtra qu'une dizaine, 20 tout au plus, soit jusqu'à deux fois moins ;
- On remarque que les cours d'eau ressortent particulièrement fort sur la carte du nombre de jours d'été et du nombre de jours caniculaires. Cela s'explique en grande partie par l'inertie thermique de l'eau : l'eau reste relativement froide de sorte que la couche située à sa surface dépasse rarement les 25 ou les 30°C. Le phénomène est toutefois légèrement exagéré par UrbClim.

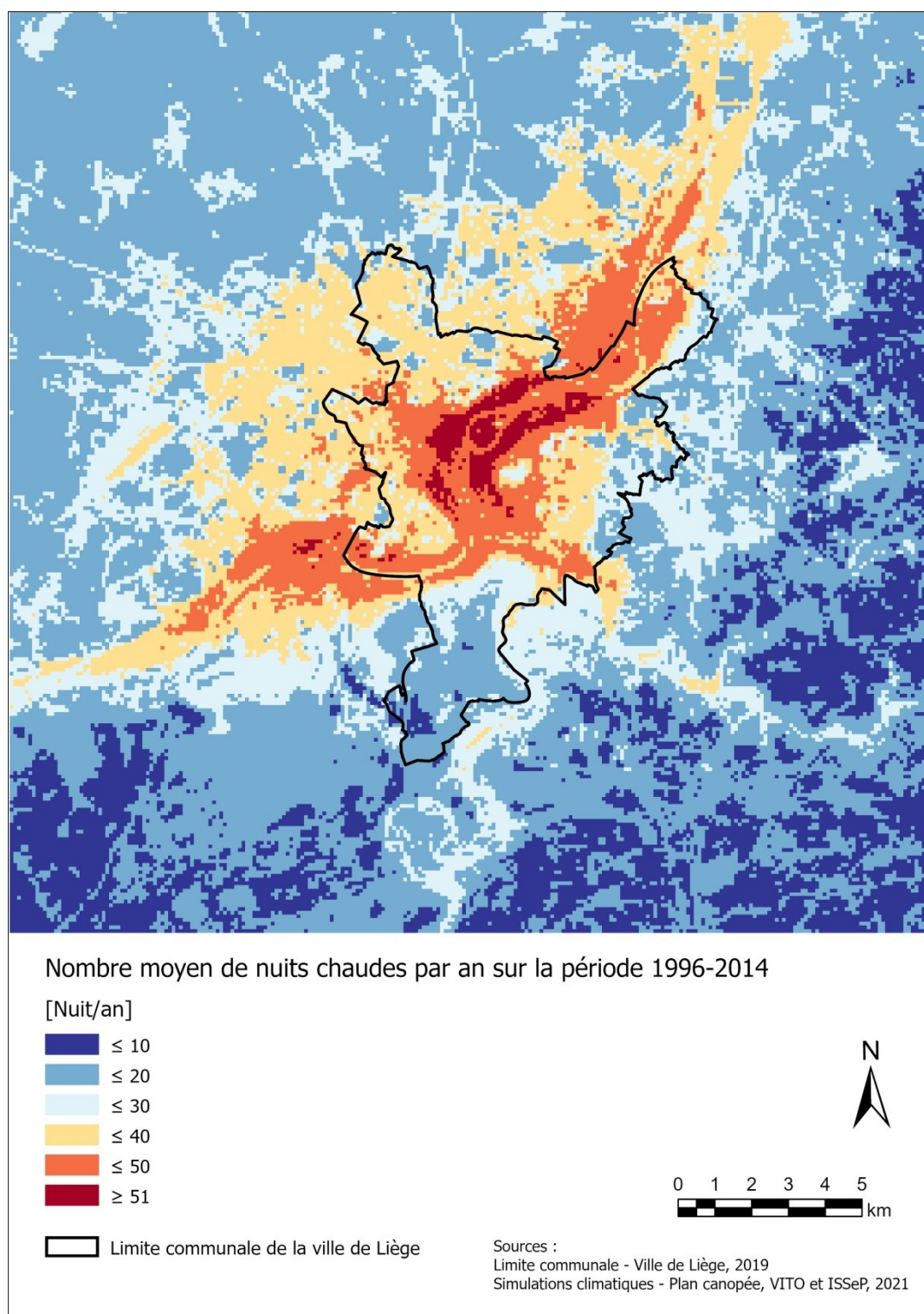


Figure 24. Nombre moyen de nuits chaudes ($T_{min} \geq 17^{\circ}\text{C}$) par an sur la période 1996-2014.

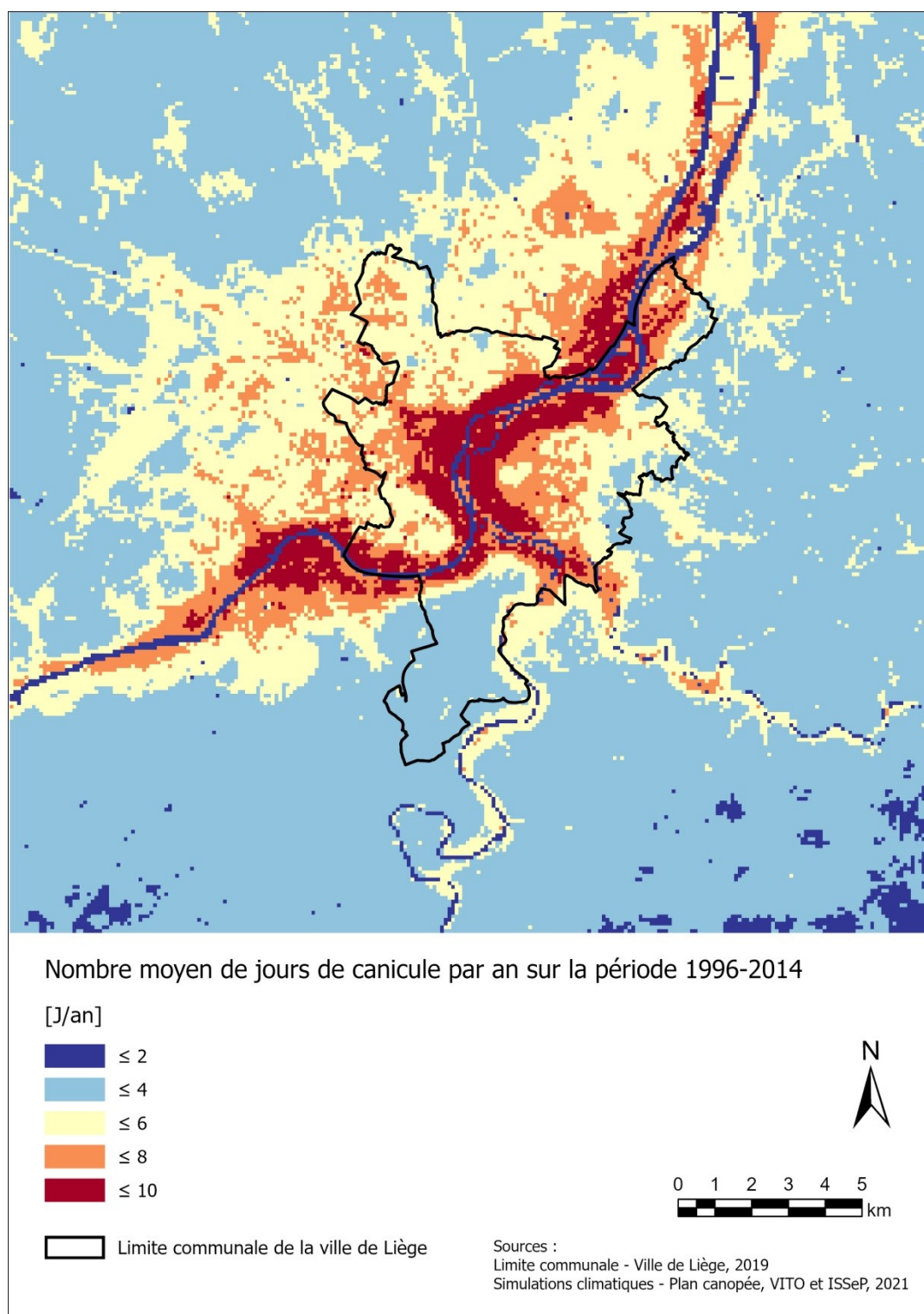


Figure 25. Nombre moyen de jours de canicule ($T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) par an sur la période 1996-2014.

2.4.2. EN MOYENNE, JUSQU'À 7°C DE PLUS EN VILLE QU'À LA CAMPAGNE LORS DES ÉPISODES DE CANICULE DE LA PÉRIODE 1996-2014

Intéressons-nous maintenant à l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Différence de températures avec le pixel rural de référence) durant les canicules telles que définies par le Plan fédéral forte chaleur et pics d'ozone (SPF, 2019) (Figure 26 et 27) :

- Les intensités de l'ICU sont plus importantes la nuit (Tmin, Figure 27) que la journée (Tmax, Figure 26) ;
- La nuit, l'intensité de l'ICU est maximale. Le différentiel ville-campagne atteint 7,3°C en moyenne durant les épisodes de canicule de la période 1996-2014. Au sein des limites communales de Liège, le différentiel intra-ville est 6,2°C ;
- En journée, le différentiel ville-campagne atteint 7,0°C en moyenne durant les épisodes de canicule de la période 1996-2014. le différentiel intra-ville est 5,9°C ;
- Les surfaces d'eau ont un effet plus important sur les températures maximales que sur les températures minimales ;
- Les Figures B2 et B3 en Annexe B présentent les mêmes indicateurs pour un jour de canicule spécifique : le 25/07/2019. Les intensités pour ce jour de canicule sont plus grandes que pour la moyenne 1996-2014 car il s'agit du jour le plus chaud jamais enregistré en Belgique depuis 1833. Elles atteignent 9,3°C (cette valeur est atteinte dans la périphérie ouest de Liège) la nuit pour les températures minimales. Le panache thermique urbain est visible sur ces cartes : le vent dominant (sud-est sur la carte B2 et est-sud-est sur la carte B3) étire l'ICU vers le nord-ouest sur la carte B2 et vers l'ouest-nord-ouest sur la carte B3.

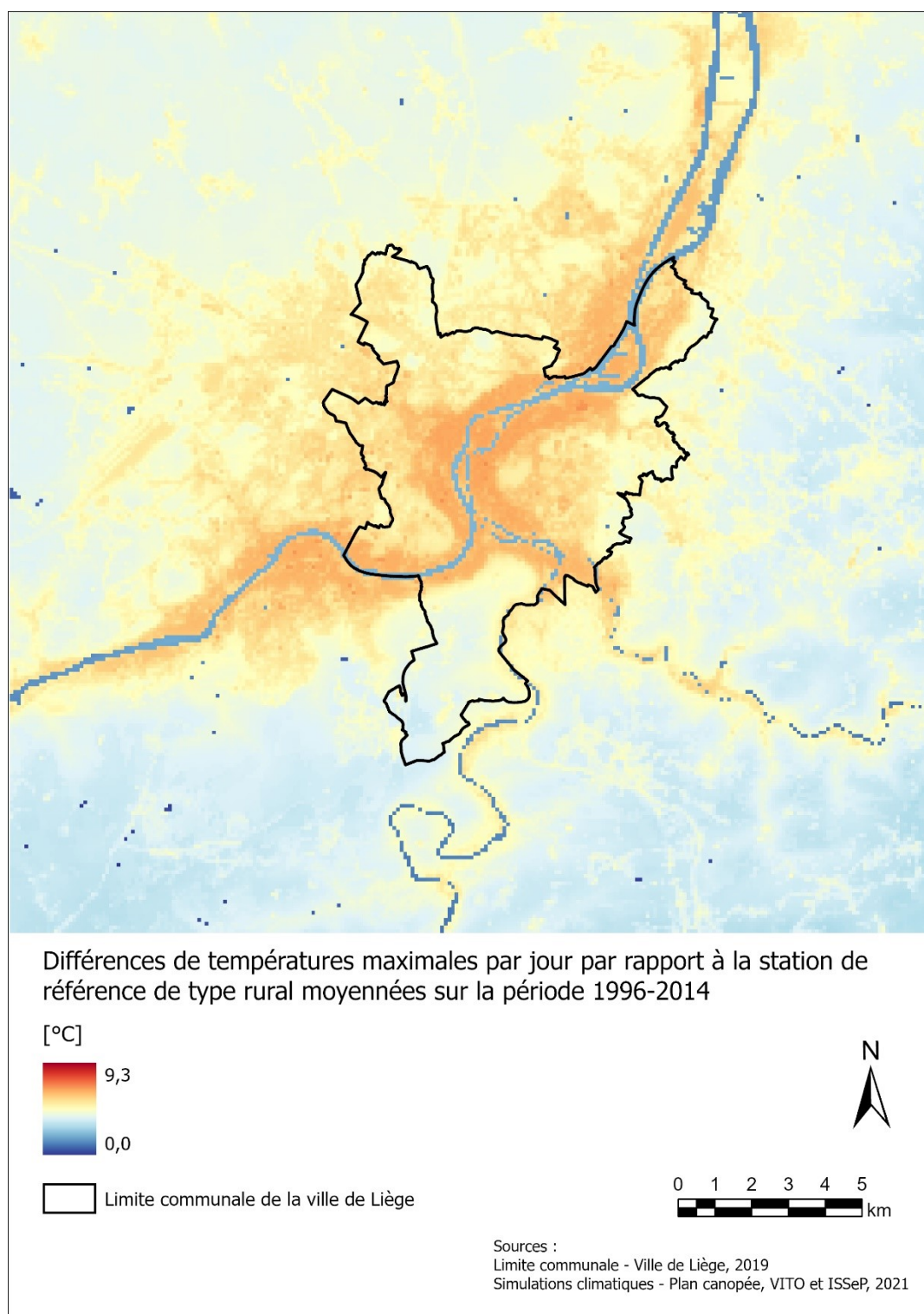


Figure 26. Intensité moyenne de l'ICU pour les températures maximales lors des canicules de la période 1996-2014.

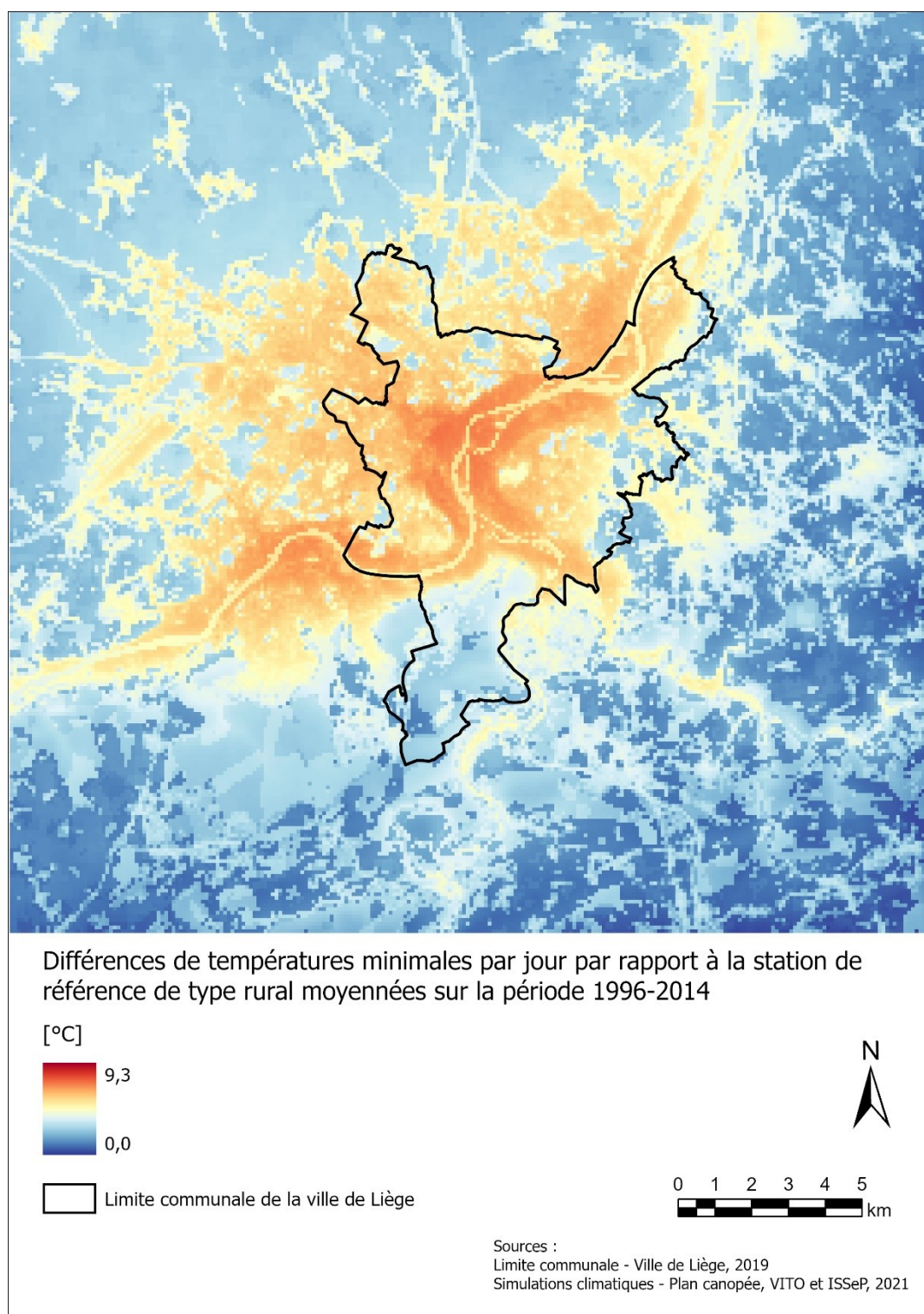


Figure 27. Intensité moyenne de l'ICU pour les températures minimales lors des canicules de la période 1996-2014.

2.4.3. EN COMBINANT DURÉE ET INTENSITÉ DES CANICULES, LE CENTRE DE LIÈGE EST JUSQU'À 4 FOIS PLUS TOUCHÉ PAR L'EFFET DES CANICULES QUE LES CAMPAGNES ENVIRONNANTES.

La Figure 28 combine durée et intensité des canicules et présente ainsi le nombre moyen de degrés jour de canicule par an (°CJ/an) lors des périodes de canicules de 1996-2014. Ainsi, alors que le nombre de jour de canicule s'intéresse à leur fréquence, le nombre de degrés jour de canicule regarde de combien de degrés par an le seuil des canicules est dépassé. On constate ainsi que pour la période investiguée :

- Les habitants des quartiers les plus densément bâtis de Liège connaissent en moyenne 60°CJ de canicule par an de plus (~ 80 °CJ/an) que les habitants vivants dans les zones boisées localisées dans les communes périphériques sud et est de Liège (~ 20 °CJ/an) ;
- Les habitants des quartiers de Liège situés en fond de vallée connaissent 4 fois plus de degrés jour de canicule par an que ceux vivants dans les communes rurales du sud et de l'est de Liège ;
- En plus d'être plus fréquentes en ville qu'à la campagne, les canicules sont ainsi plus intenses dans les zones urbaines densément bâties ;
- La variation spatiale observée (pattern) rejoint logiquement les observations réalisées précédemment : les habitants qui subissent le plus de degrés jour de canicule sont aussi ceux connaissent le plus de journées caniculaires et de nuits chaudes, et inversement.

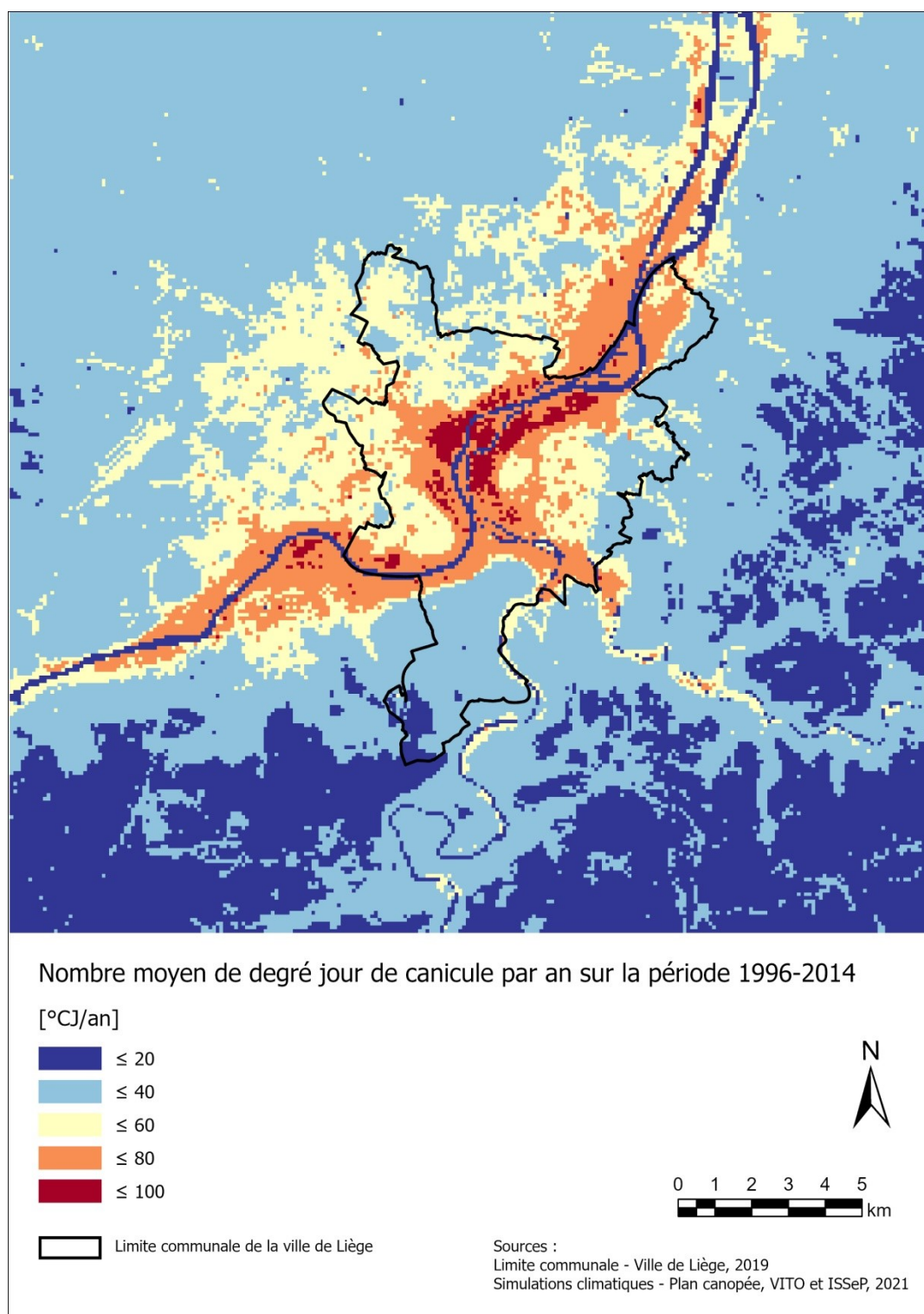


Figure 28. Nombre moyen de degré jour (°CJ) de canicule par an lors des canicules de la période 1996-2014.

2.4.4. UNE VARIATION DE 8°C EN TEMPÉRATURE RESENTIE AU SEIN MÊME DE LA VILLE DE LIÈGE AU PLUS FORT DE LA CANICULE DE FIN JUILLET 2019.

La journée choisie pour simuler le confort thermique des liégeois à une très haute résolution spatiale est le 25 juillet 2019. Cette journée de canicule est caractérisée par des records de chaleur encore jamais atteints en Belgique : la température de l'air a atteint 39,7°C à Uccle, 39,9°C à Alleur et 40,1°C à Herstal. C'est également le 25 juillet 2019, que nous avons connu la nuit la plus chaude jamais enregistrée en Belgique depuis 1833 : la température n'est pas descendue en dessous de 23,5°C à Uccle, 22,1°C à Alleur, et 22,3°C à Herstal. Nous étions dans le 3e jour d'une canicule qui fut particulièrement intense. L'air était sec : l'humidité des sols était faible en raison de la faiblesse des précipitations tombées au cours des mois de juin et de juillet, le vent soufflait d'ESE apportant de l'air continental chaud et sec. Ce type de canicules, qui était assez rare jusqu'à maintenant, est amené à être plus fréquent au cours du XXIe siècle dans un contexte de changements climatiques.

Étant donné le caractère extrême de cette journée, il est intéressant d'analyser l'**inconfort thermique maximal simulé**. La Figure 29 montre les WBGT maximales représentées avec les seuils internationaux de stress thermiques. Les Figures 30, 31 et 32, présentent des zooms sur les parcs d'Avroy et du Jardin Botanique, la Médiacité et le Chartreuse, les places de l'Yser et du Congrès :

- Les valeurs maximales de WBGT varient de 25,1 à 33,2°C. Ce sont des valeurs extrêmement élevées pour la Belgique mais nous avons aussi choisi la journée la plus chaude de tout l'historique des températures de Belgique. Ces valeurs auraient pu être encore plus élevées si l'humidité de l'air avait été plus importante ;
- On considère que l'organisme humain est soumis à un stress thermique lorsque la température ressentie dépasse les 25°C. Les valeurs affichées sur la Figure 29 indiquent que lors des événements de canicules les plus extrêmes, tous les habitants de Liège subissent un stress thermique lors des heures les plus chaudes de la journée ;
- Il y a ainsi jusqu'à 8°C de différence de température ressentie au sein même des limites communales de Liège ;
- Une végétation arborée permet de réduire l'inconfort thermique (effet de l'évapotranspiration, de l'ombrage, de la réflexion et de l'absorption de l'énergie solaire). Plus sa superficie et sa densité sont grandes, plus leur effet refroidissant est important. Ainsi, par ordre d'importance, on retrouve : les zones boisées (bois du Sart-Tilman, terrils du Thier-à-Liège, Fayembois, bois de Wandre, Chartreuse, Coteaux de la Citadelle, etc), les parcs urbains (Boverie, Avroy, Botanique, ...), les intérieurs d'îlots végétalisés, les rangées d'arbres denses et les arbres isolés.
- Les eaux de surface ont aussi un effet refroidissant mais il est plus faible que celui de la végétation (effet de l'évaporation uniquement). Toutefois, plus les eaux de surface sont vastes et profondes, plus leur effet refroidissant est important (La Meuse vs les étangs présents dans les parcs de la Boverie, d'Avroy, du Jardin Botanique, de Peralta). On considère également que les eaux vives (fleuves, rivières) ont un effet refroidissant plus

important que les plans d'eau (lacs, étangs, mares) en raison de leur aspect dynamique qui permet un brassage des eaux et un renouvellement de la couche d'eau en surface ;

- L'effet des parcs et des rangées d'arbres peut se combiner avec celui des eaux de surface pour produire un effet refroidissant comparable à celui d'une forêt. Ce phénomène est notamment observé le long des rives arborées de la Meuse et de la Dérivation (Boverie, quais du quartier d'Outremeuse, quai de Wallonie) (Figure 32) ;
- Les caractéristiques du bâti influencent également les températures ressenties :
 - L'inconfort est maximal dans les rues et les îlots situés en fond de vallée, loin des rives de la Meuse, sans végétation, densément urbanisés ;
 - Une exposition sud des façades des bâtiments aggrave encore la situation ;
 - Plus les rues sont étroites, plus il y fait frais (ombrage perpétuel des bâtiments). Exemple : les rues du Carré ;
 - En fonction de leur orientation, plus les bâtiments sont hauts, plus leur ombre portée est grande. A contrario, plus ils sont hauts, plus la surface disponible pour absorber la chaleur est importante ;
 - L'orientation des rues influencent également la température ressentie. La température ressentie est plus élevée dans les rues orientées sud-ouest alors que qu'elle est plus faible dans les axes nord-est. La place du Congrès (Outremeuse) en est un bel exemple (Figure 32) ;
 - Ces effets se combinent avantageusement ou non.
- Le relief a également son importance. La température de l'air décroît avec l'altitude (0,65°C/100 m en moyenne). Cet effet est notamment visible au niveau des terrils de Vottem et du Tiers-à-Liège. Cet effet est toutefois marginal comparé à celui de la végétation, du bâti ou même des eaux de surface ;
- Le point commun entre tous ces effets (végétation, eau, bâti) est que leur impact est toujours limité à leur voisinage immédiat. Un arbre isolé n'aura ainsi qu'un rayon d'action de quelques mètres autour de sa couronne.

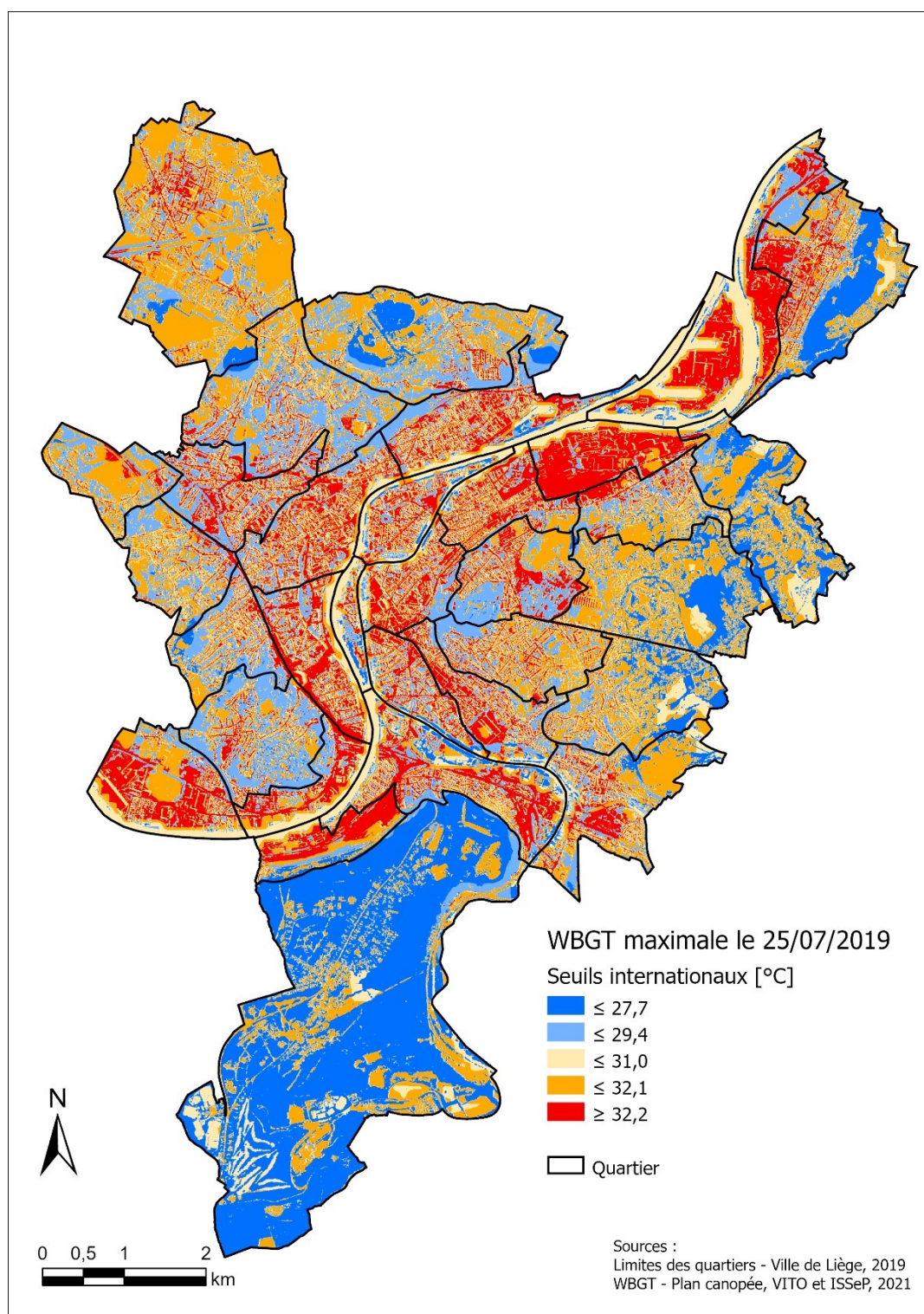


Figure 29. Valeurs maximales de WBGT simulées le 25/07/2019.

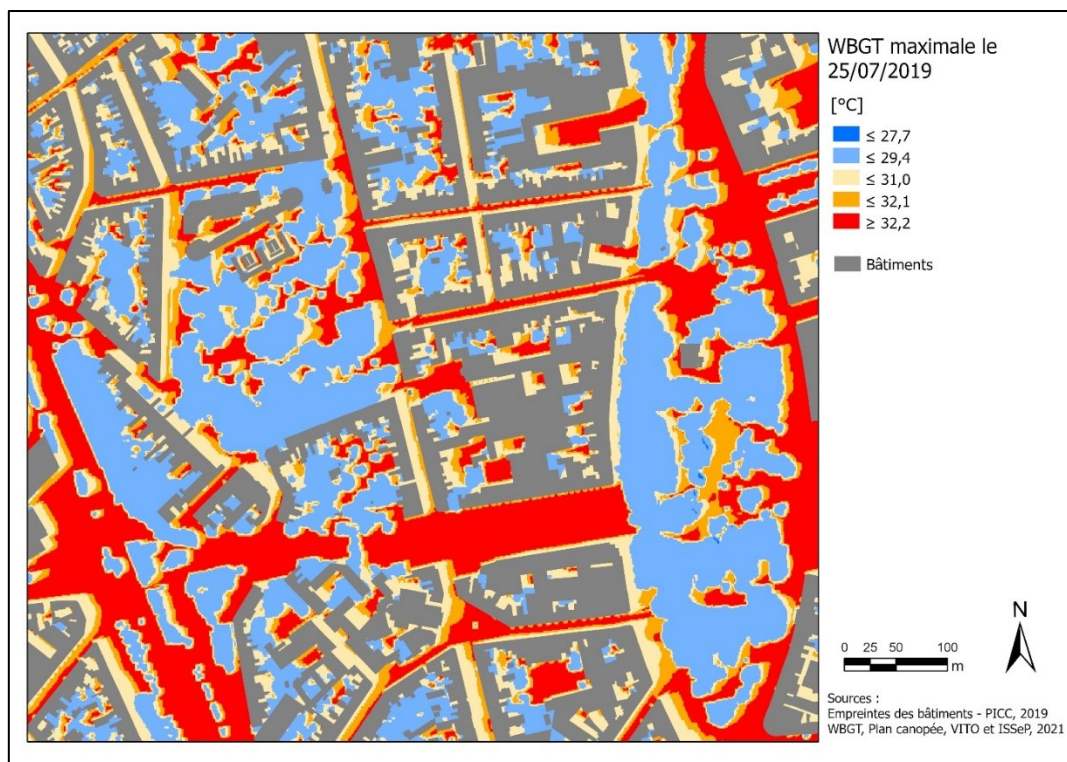


Figure 30. Valeurs maximales de WBGT simulées le 25/07/2019: zoom sur les parcs du Jardin Botanique et d'Avroy.

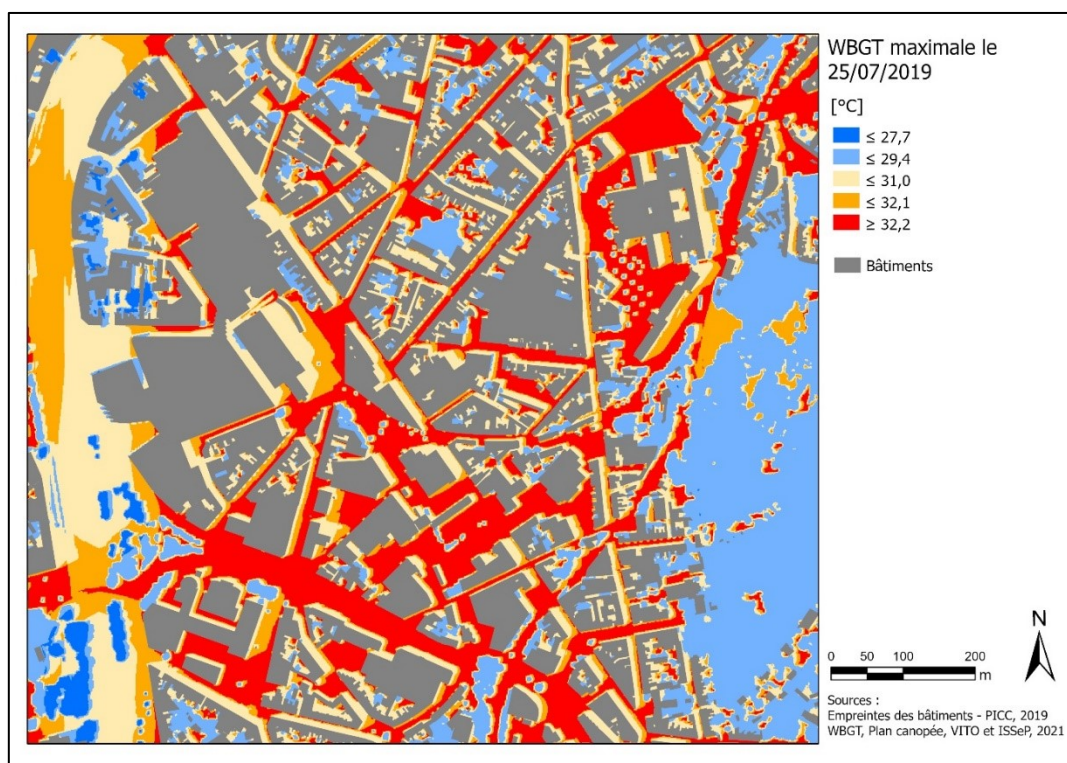


Figure 31. Valeurs maximales de WBGT simulées le 25/07/2019 : zoom sur la Médiacité et la Chartreuse.

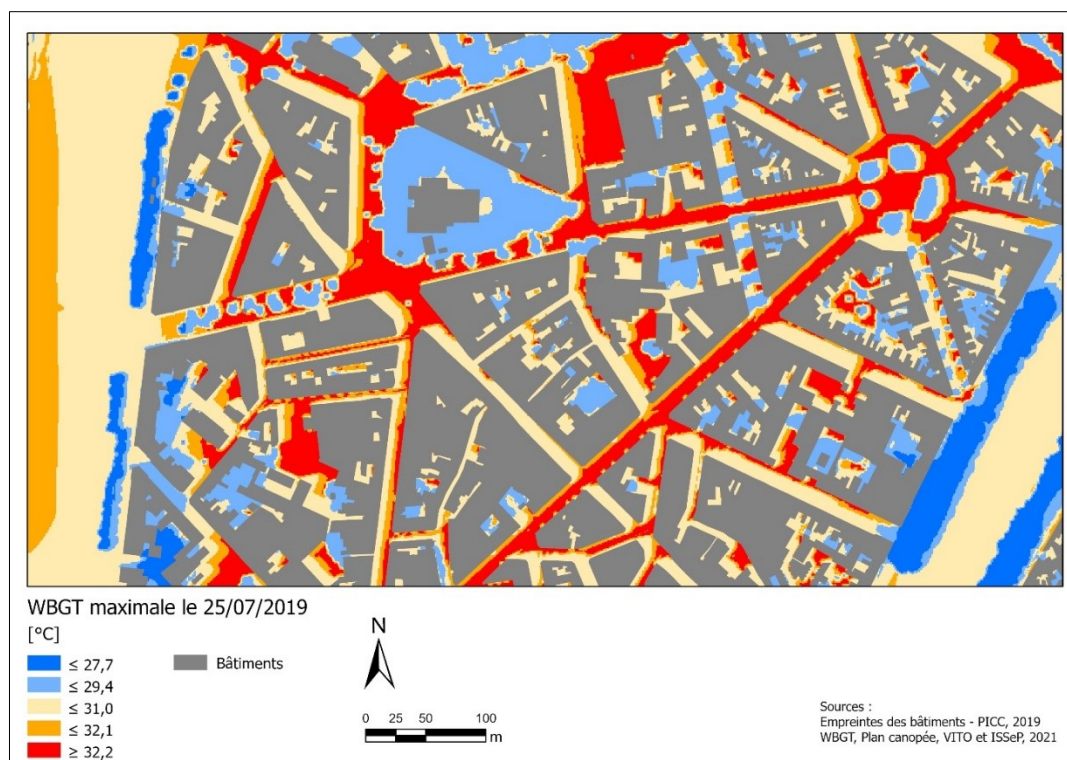


Figure 32. Valeurs maximales de WBGT simulées le 25/07/2019 : zoom sur la place de l'Yser et la place du Congrès.

La carte des valeurs moyennes de WBGT est également très pertinente pour analyser le confort thermique des Liégeois (Figure 33). Cette dernière a l'avantage de combiner à la fois les valeurs nocturnes et diurnes de l'ICU. Notons que les seuils internationaux de WBGT n'étaient pas applicables car les valeurs moyennes de WBGT atteintes à Liège le 25/07/2019 se situaient en-deça de la plage de températures couvertures par ces seuils. Les observations effectuées pour les valeurs maximales de WBGT sont valables pour les valeurs moyennes. Les contrastes de températures sont cependant moins grands.

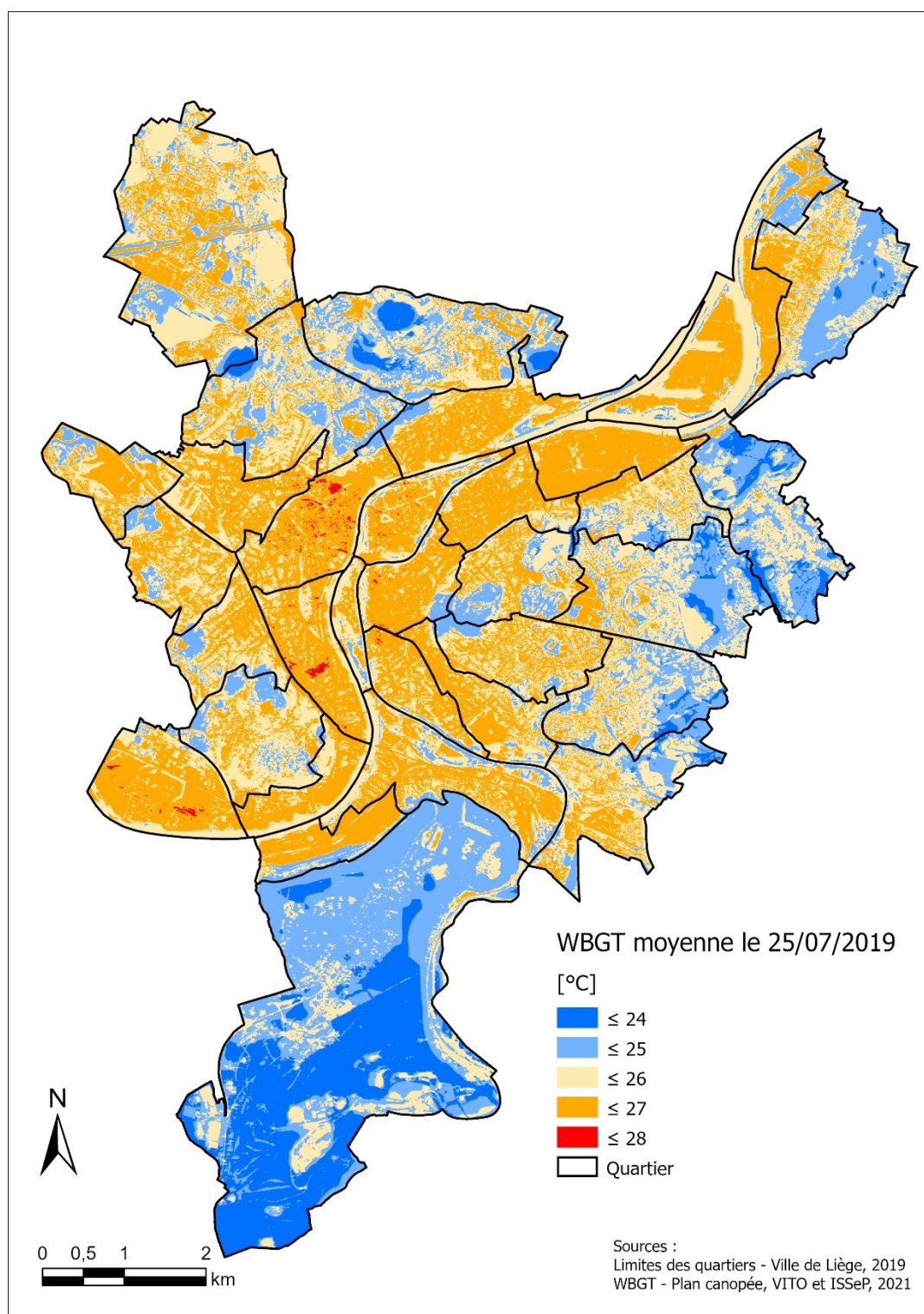


Figure 33. Valeurs moyennes de WBGT simulées le 25/07/2019.

Des cartes des WBGT à 15h et à 23h sont également disponibles en Annexe B (Figure B4 et B5). Ces dernières permettent de comparer des valeurs diurnes de WBGT (15h) à des valeurs nocturnes (23h).

Une autre manière d’appréhender le stress thermique en ville est la création d’un indicateur de stress thermique urbain (STU) basé sur les valeurs de WBGT.

Ce STU exprime l'intensité de l'îlot de chaleur estimé localement (à l'échelle d'un espace public) par rapport à l'îlot de chaleur estimé globalement (à l'échelle du territoire communal). Sa formule est présentée dans la Section 2.2.

Le STU permet de comparer à l'échelle d'un espace public l'intensité de l'îlot de chaleur et de cibler très précisément les endroits utiles à végétaliser pour réduire la température.

La Figure 34 présente un exemple du STU basé sur les valeurs maximales de WBGT. Les Figures B6, B7 et B8 en Annexe B présentent le STU construits sur base des valeurs moyennes, à 15h et à 23h de la WBGT.

L'indicateur STU est très élevé dans les espaces publics minéraux et beaucoup plus faible dans les espaces publics arborés.

Les Figures 35 et 36 affichent le STU d'un espace public minéral, la place de la Résistance, et d'un espace public arboré, le Jardin Botanique. En comparant ces figures, on observe que la présence des arbres permet de réduire localement l'indicateur STU de plus de la moitié.

Le Tableau 20 illustre le calcul du STU pour la Place de la Résistance et le Jardin Botanique.

Tableau 20. Exemples de calcul du STU pour la Place de la Résistance et le Jardin Botanique.

<u>Liège (territoire communal)</u>			<u>Place de la Résistance (a)</u>			<u>Jardin Botanique (b)</u>		
WBGTmin	25,1	°C	WBGTmax(a)	32,5	°C	WBGTmax(b)	28,3	°C
WBGTmax	33,2	°C	WBGTmax(a)- WBGTmin	7,4	°C	WBGTmax(b)- WBGTmin	3,2	°C
WBGTmax- WBGTmin	8,1	°C	STU	91	%	STU	40	%

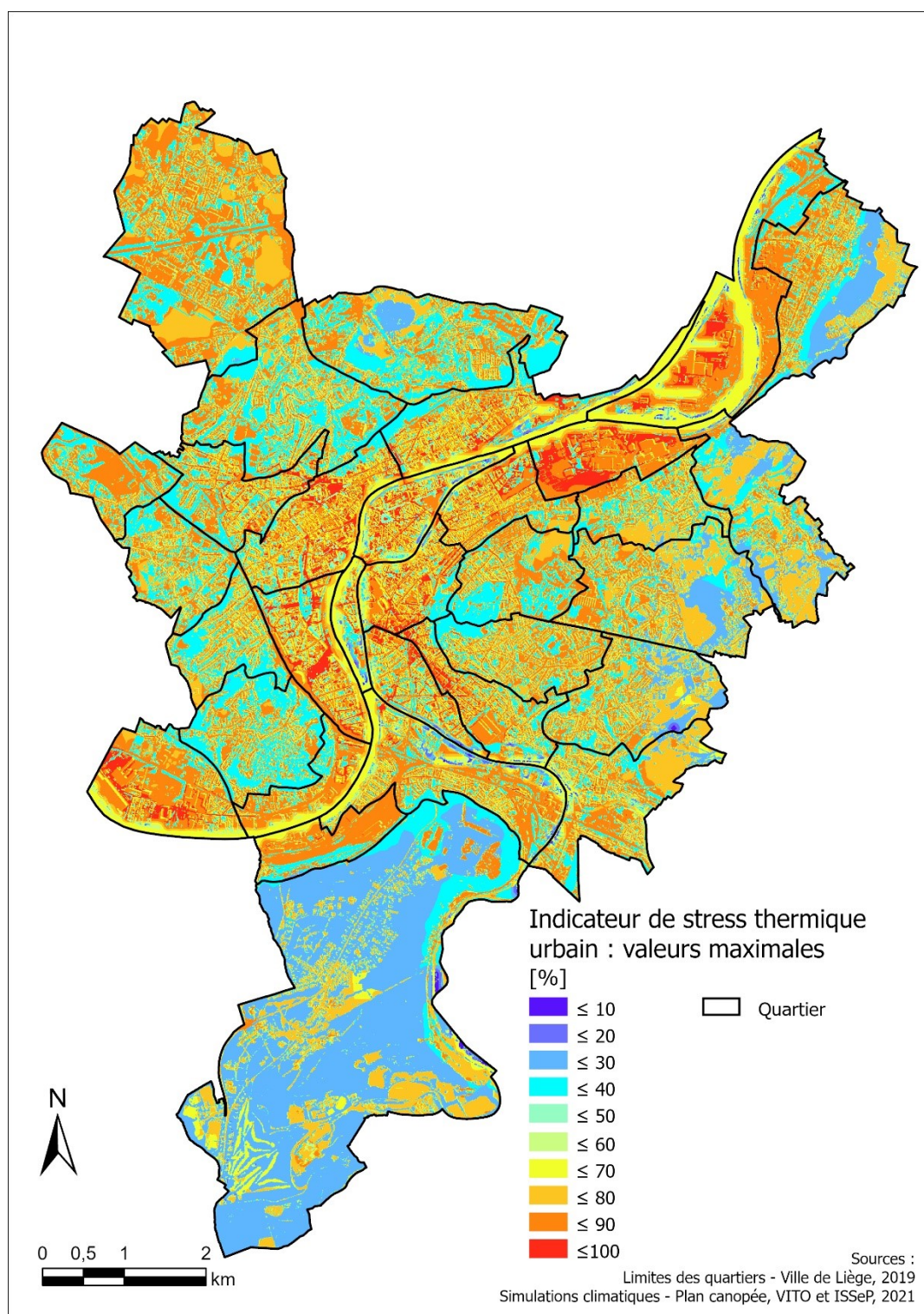


Figure 34. Indicateur de stress thermique urbain (STU) : valeurs basée sur les WBGT maximales simulées le 25/07/2019.

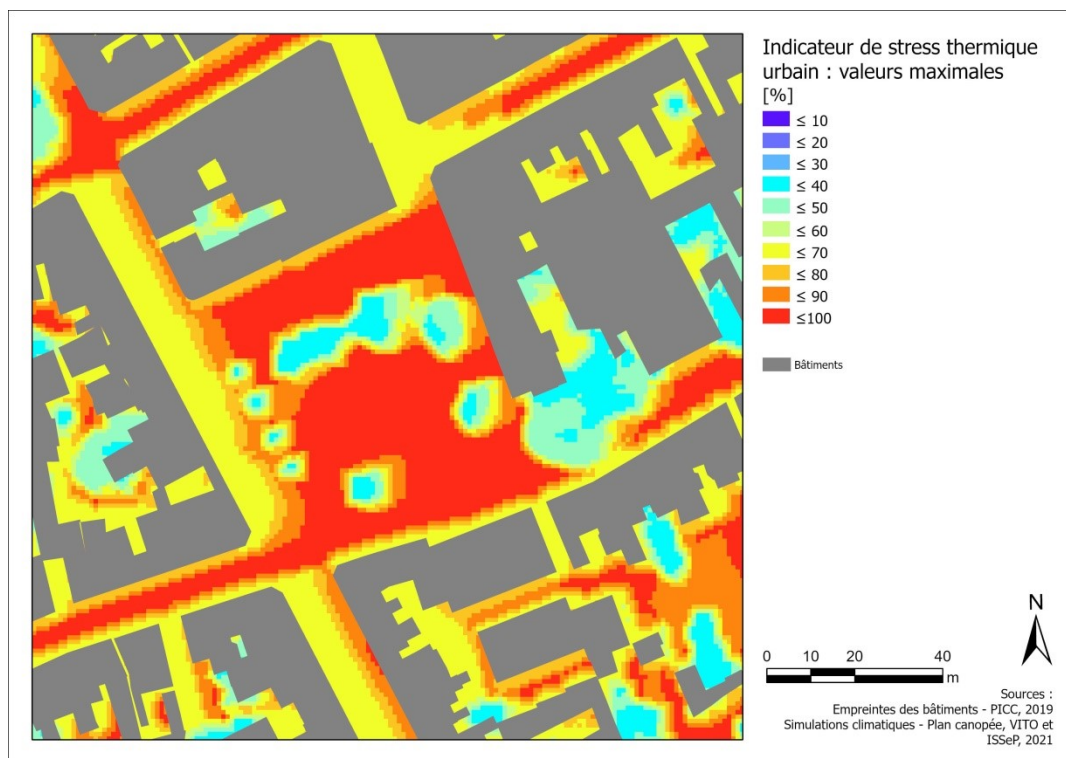


Figure 35. Indicateur de stress thermique urbain (STU) : valeurs basée sur les WBGT maximales simulées le 25/07/2019 – Focus sur la Place de la Résistance.

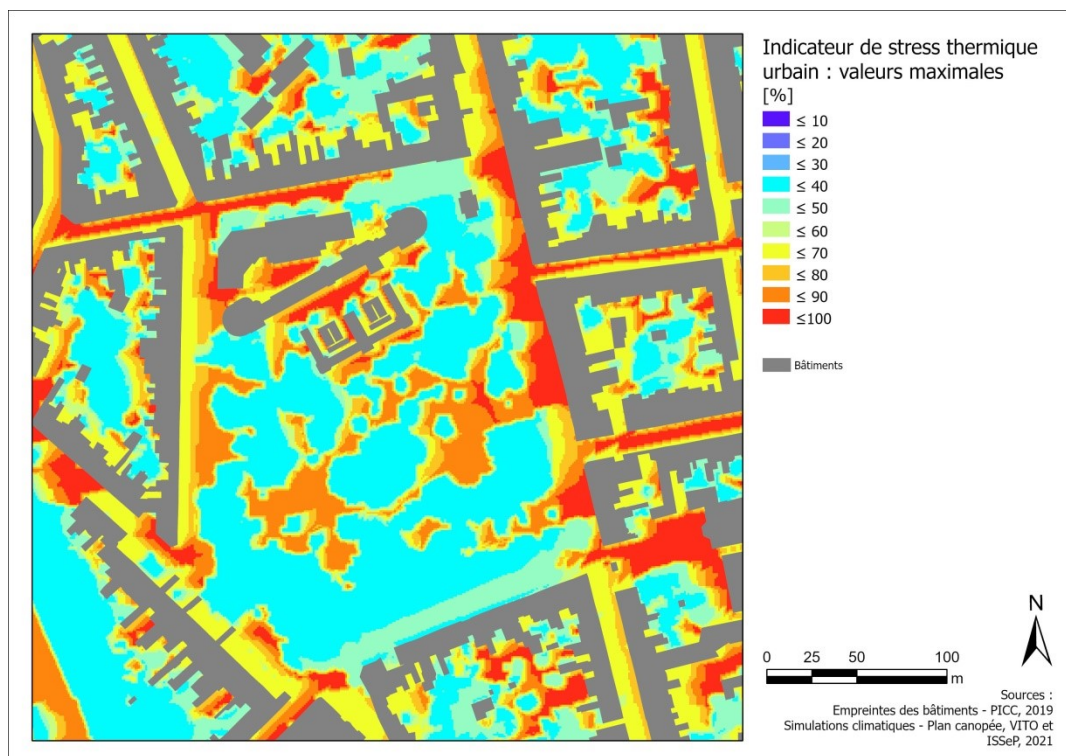


Figure 36. Indicateur de stress thermique urbain (STU) : valeurs basée sur les WBGT maximales simulées le 25/07/2019 – Focus sur le Jardin Botanique.

2.4.5. PARCS URBAINS, FORÊTS ET RIVES ARBORÉES DE LA MEUSE : DES REFUGES EN CAS DE CANICULE

La Figure 37 localise les îlots les plus frais au sein des limites communales de Liège. Ces îlots ont été définis comme les localisations où la WBGT est restée inférieure à 29°C tout au long de la journée. Signalons que le seuil des 25°C est communément utilisé pour définir les îlots de fraîcheur. Cependant, en raison du caractère extrême du jour de canicule modélisé, aucun endroit à Liège ne remplissait ce critère. On peut ainsi dire qu'en cas de chaleur extrême, toute la ville est en stress thermique à un moment ou à un autre de la journée. Il y a toutefois des endroits qui restent relativement plus confortables que les autres. Ces derniers correspondent aux zones bleues sur la Figure 37 :

- Les zones boisées denses du Sart-Tilman, de la Chartreuse, de Cointe, des Coteaux de la Citadelle, de Fayembois, des bois de Wandre, des terrils du Thier-à-Liège offrent les refuges le plus vaste en cas de canicule ;
- Dans les quartiers centraux de Liège, les refuges sont rares :
 - Les parcs urbains arborés : Boverie, Avroy, Jardin Botanique, etc. illustrant l'intérêt des forêts urbaines ;
 - Les quais de la Meuse et de la Dérivation en Outremeuse où la présence de rangées de grands arbres est combinée à l'effet de la Meuse et à un ombrage causé par les bâtiments.

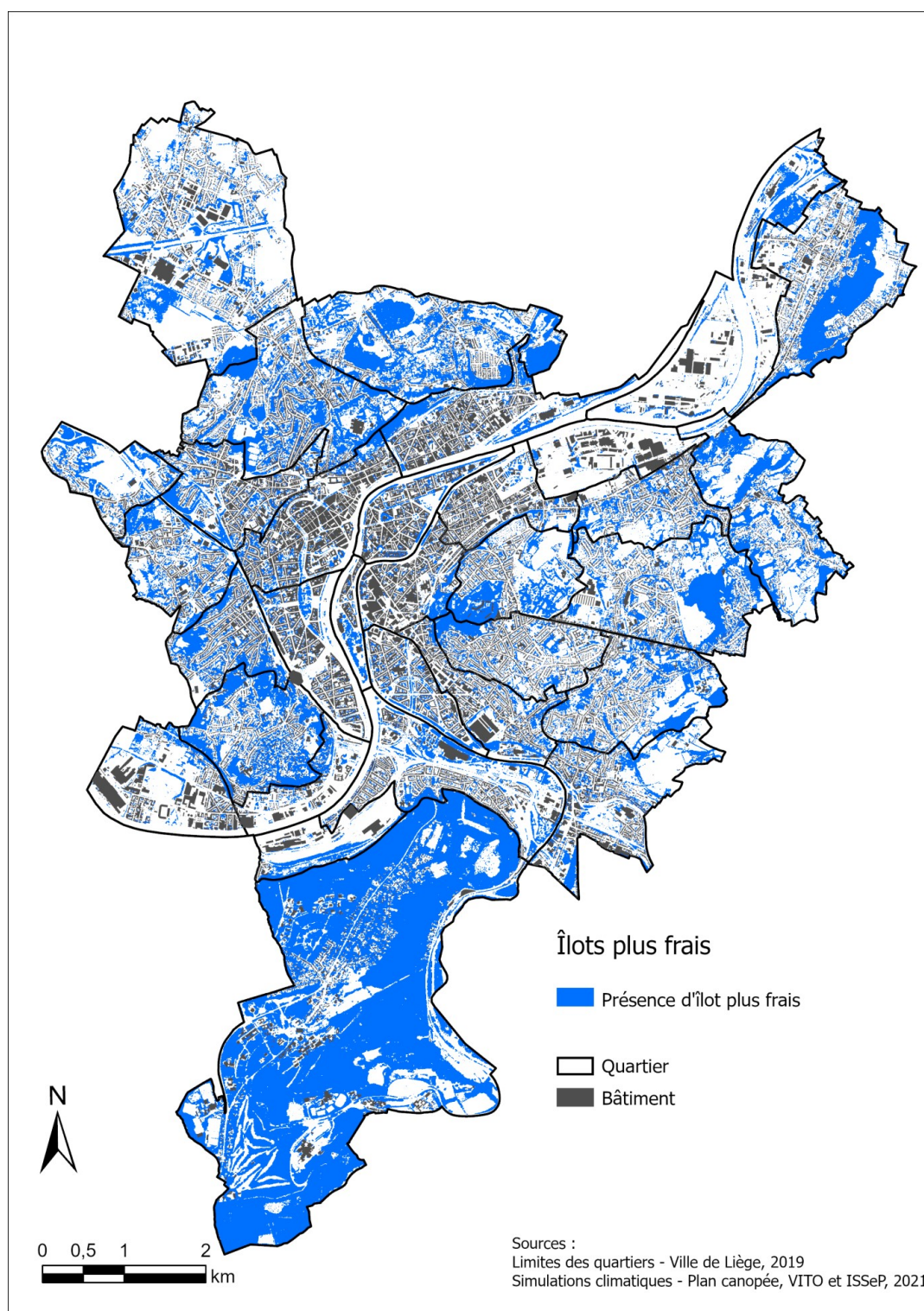


Figure 37. Ilots les plus frais (WBGT inférieure à 29°C pour toutes les heures de la journée) simulés le 25/07/2019.

2.5.CONCLUSION

L'îlot de chaleur urbain (ICU) de Liège a été caractérisé à l'aide de 17 indicateurs. Les cartes générées pour chacun de ces indicateurs constituent de précieux outils d'aide à la décision qui

doivent toutefois être utilisés et interprétés en tenant compte des limitations du modèle et de ses données d'entrées utilisés pour réaliser les simulations climatiques.

Sur la période 1996-2014, l'analyse des indicateurs basés sur la modélisation de la température de l'air à 2 m (au-dessus de la surface) à une résolution spatiale de 100 m montre que les habitants du centre de Liège connaissent en moyenne 5 fois plus de nuits chaudes et de jours d'été que les habitants des communes périphériques sud et est de Liège. Les habitants du centre de Liège connaissent jusqu'à 2 fois plus de jours de canicule (entre 8 et 10 jours de canicule par an) qu'en périphérie (moins de 4 jours par an). Lors de vagues de chaleurs, il y a en moyenne jusqu'à 7°C de différence entre ville et campagne sur la période 1996-2014.

Toutefois, l'expérience physiologique du stress thermique fait intervenir davantage de facteurs que la seule température de l'air : l'exposition au rayonnement solaire, le vent et l'humidité de l'air jouent également un rôle sur la température ressentie. La modélisation de la température au thermomètre-globe mouillé (*wet-bulb globe temperature* en anglais, WBGT) à 1 m de résolution pour la journée du 25 juillet 2019 a permis d'appréhender les disparités de la température ressentie et les facteurs l'influençant au sein des limites communales de Liège. La journée du 25 juillet a été choisie pour son caractère extrême : il s'agit de la journée historique la plus chaude de Belgique. En outre, les projections climatiques pour le XXI^e siècle prévoient une augmentation de la fréquence de ce type d'événements. En raison du caractère extrême de la journée choisie pour modéliser la WBGT, les valeurs maximales modélisées ont l'avantage de représenter l'inconfort thermique maximal ressenti par les Liégeois dans « le pire des cas ». Ces valeurs varient de 25 à 33°C en température ressentie ce qui représente une variation de 8°C en fonction de l'endroit où l'on se trouve dans Liège. La résolution de 1 m de ces cartes de WBGT fournit davantage de détails spatiaux qui permettent d'identifier et de caractériser les éléments qui impactent le plus la température ressentie :

- La végétation arborée contribue le plus à améliorer le confort thermique en ville. Plus elle est dense et étendue, plus son effet est important ;
- Les eaux de surface, dont principalement la Meuse, contribuent aussi à améliorer le confort thermique. Leur effet varie en fonction de la taille (surface), de la profondeur des eaux de surface et de leur aspect dynamique ou statique (eaux vives/plans d'eau) ;
- Les caractéristiques du bâti influencent la température ressentie. Outre la densité du bâti qui est responsable de l'ICU, la hauteur des bâtiments, l'orientation des façades, l'orientation des rues ou encore leur largeur impactent localement la température ressentie. Celle-ci sera par exemple moins élevée dans des rues orientées nord-est alors qu'elle sera plus élevée sur des axes sud-ouest.

Tous ces effets se combinent plus ou moins avantageusement. Leur point commun est que leur champ d'action est toujours limité à leur voisinage immédiat. Ainsi, le confort thermique des Liégeois est fortement amélioré lorsque les trames vertes et bleues se combinent à grandes échelles. L'analyse des îlots les plus frais confirme l'impact positif d'une combinaison de ces trames. Dans les quartiers centraux de Liège, ces îlots se limitent au parc de la Boverie et aux rives arborées de la Meuse et de la Dérivation, leur caractéristique commune étant que l'effet d'une végétation arborée se conjugue à l'effet des eaux de surface.

BIBLIOGRAPHIE

- Berk, A., Bernstein, L. S., & Robertson, D. C. (1987). MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN. *dtic*, 40. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA185384>
- Bruxelles Environnement. (2014). *Focus: Îlots de chaleur*. (<https://environnement.brussels/lenvironnement-etat-des-lieux/rapports-sur-letat-de-lenvironnement/rapport-2011-2014/climat/focus-0>, consulté le 11/08/2021)
- De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015, Juin). UrbClim – A fast urban boundary layer climate model, *Urban Climate*, 12, 21-48. doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001
- García-Díaz, M., Lauwaet, D., Hooyberghs, H., Ballester, J., De Ridder, K., & Rodó, X. (2016). Advantages of using a fast urban boundary layer model as compared to a full mesoscale model to simulate the urban heat island of Barcelona. *Geoscientific Model Development*, 9, 4439–4450.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- IRM. (2020). *Qu'est-ce que l'effet d'îlot de chaleur urbain ?* Retrieved 08 11, 2021, from (<https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/les-toits-blancs-et-les-arbres-aident-les-citadins-durant-les-periodes-de-chaleur>, consulté le 11/08/2021)
- Lauwaet, D., Hooyberghs, H., Maiheu, B., Lefebvre, W., Driesen, G., Van Looy, S., & De Ridder, K. (2015). Detailed urban heat island projections for cities worldwide: dynamical downscaling CMIP5 global climate models. *Climate*, 3, 391-415. doi.org/10.3390/cli3020391.
- Lauwaet, D., De Ridder, K., Saeed, S., Brisson, E., Chatterjee, F., van Lipzig, N.P.M., Maiheu, B., & Hooyberghs, H. (2016). Assessing the current and future urban heat island of Brussels. *Urban Climate*, 15, 1-15.
- Lauwaet, D., Maiheu, B., De Ridder, K., Boënné, W., Hooyberghs, H., Demuzere, M., & Verdonck, M.-L. (2020). A New Method to Assess Fine-Scale Outdoor Thermal Comfort for Urban Agglomerations. *Climate*, 8, 6. doi.org/10.3390/cli8010006
- OMM (2010). Guide du Système mondial d'observation. OMM n°488, 254 p. (https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4328, consulté le 12/10/2021).
- Poelmans, L., Uljee, I., Van der Meulen, M., Verachtert, E., Lauwaet, D., Hallot E. (2018). SMARTPOP –WP 4: Multi-level modelling of Land Use and population Dynamics. Rapport final, 96p. (<https://esri.issep.be/webdata/smartpop/SR SmartPop Annex4 WP4 ModellingLU.PDF>, consulté le 12/10/2021).
- SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement (2019). Plan fédéral forte chaleur et pics d'ozone. Contribution du Service Public Fédéral Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement, 14 p.

https://www.health.belgium.be/sites/default/files/uploads/fields/fpshealth_theme_file/federaal_ozon_en_hitteplan_2019_fr_0.pdf, consulté le 13/10/2021).

- 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. *MDPI*, 8(9), 696. doi.org/10.3390/rs8090696
- Zhou, B., Lauwaet, D., Hooyberghs, H., De Ridder, K., Kropp, J. P., & Rybski, D. (2016). Assessing seasonality in the surface urban heat island of London. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(3), 493-505.

ANNEXES A

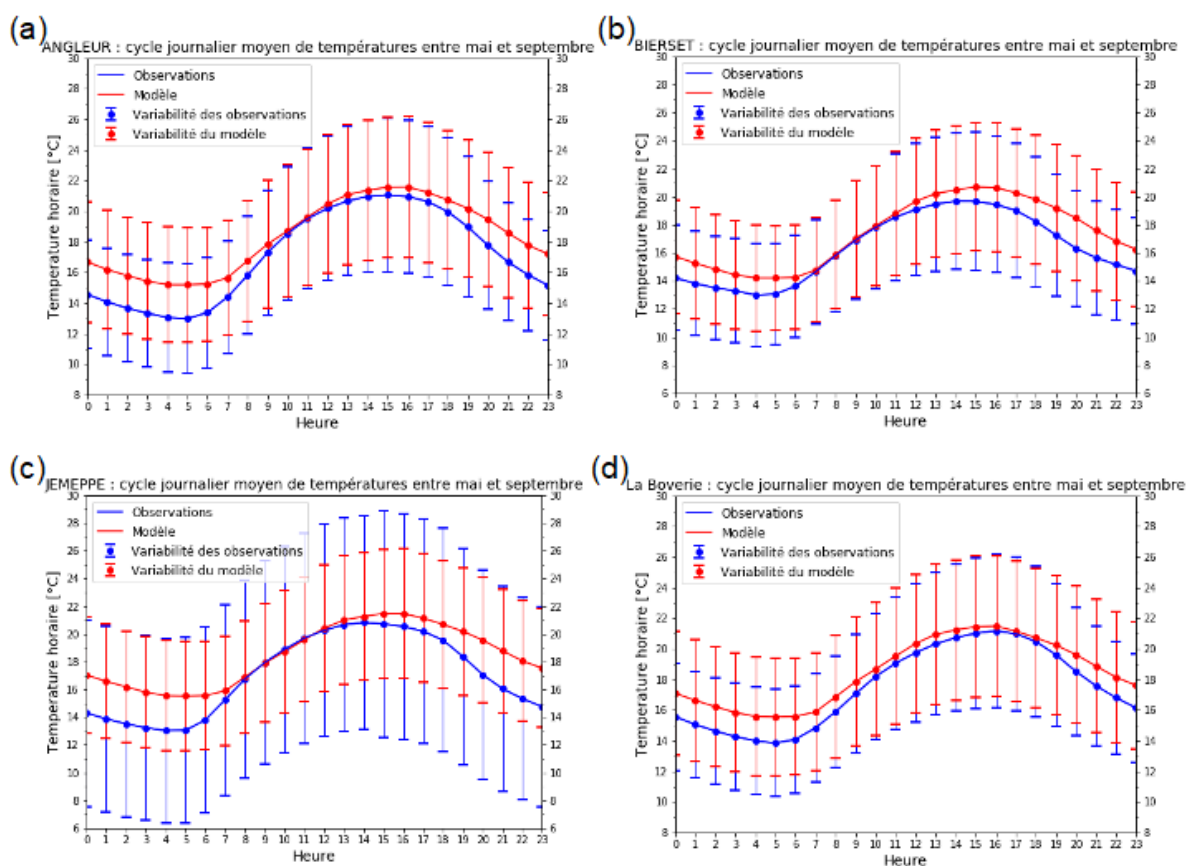


Figure A1. Cycle journalier moyen des températures observées et simulées entre mai et septembre à (a) Angleur, (b) Bierset, (c) Jemeppe, (d) La Boverie, pour la période 1996-2014.

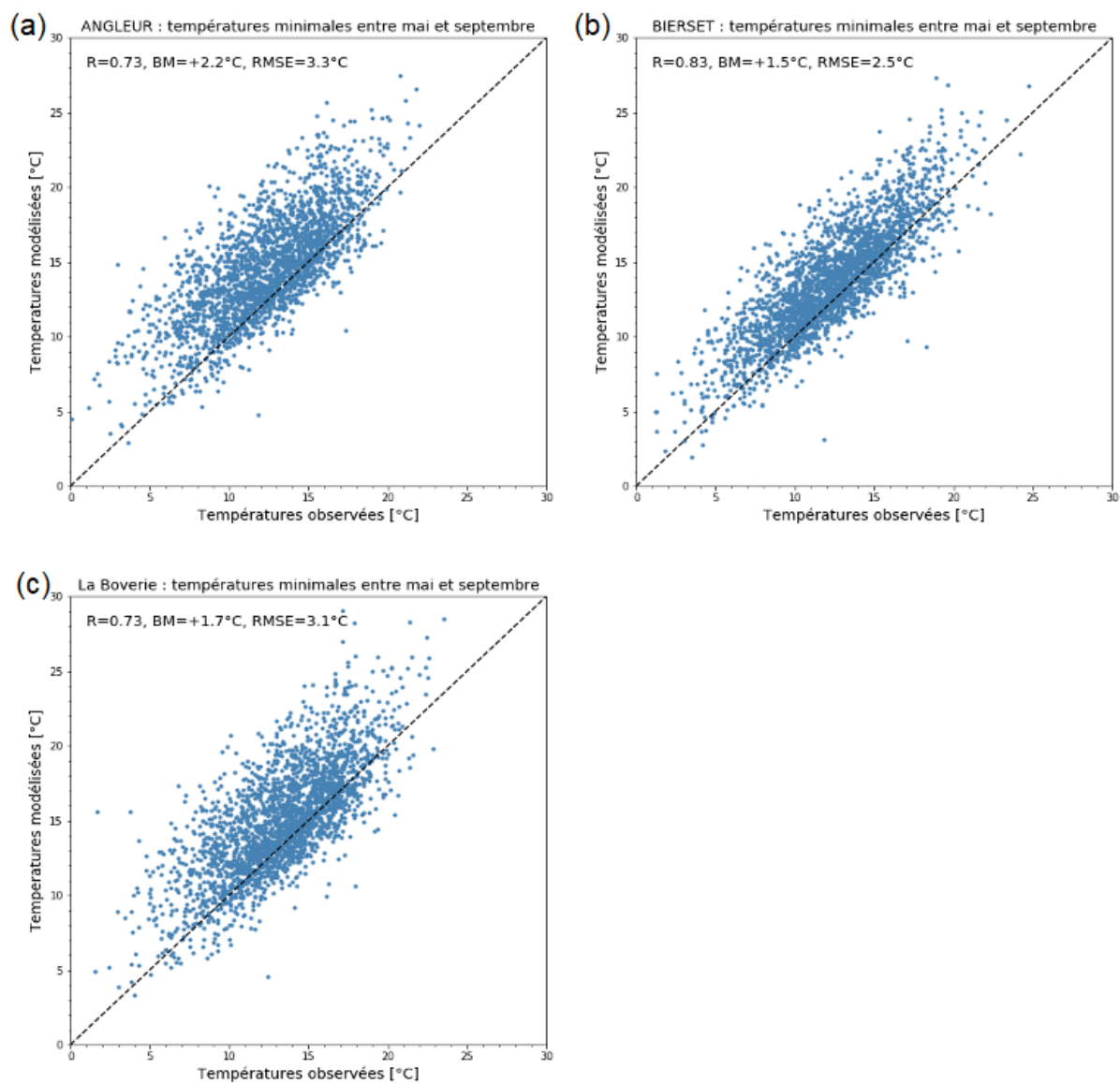


Figure A2. Températures minimales modélisées vs observées entre mai et septembre à (a) Angleur, (b) Bierset, et (c) La Boverie, pour la période 1996-2014.

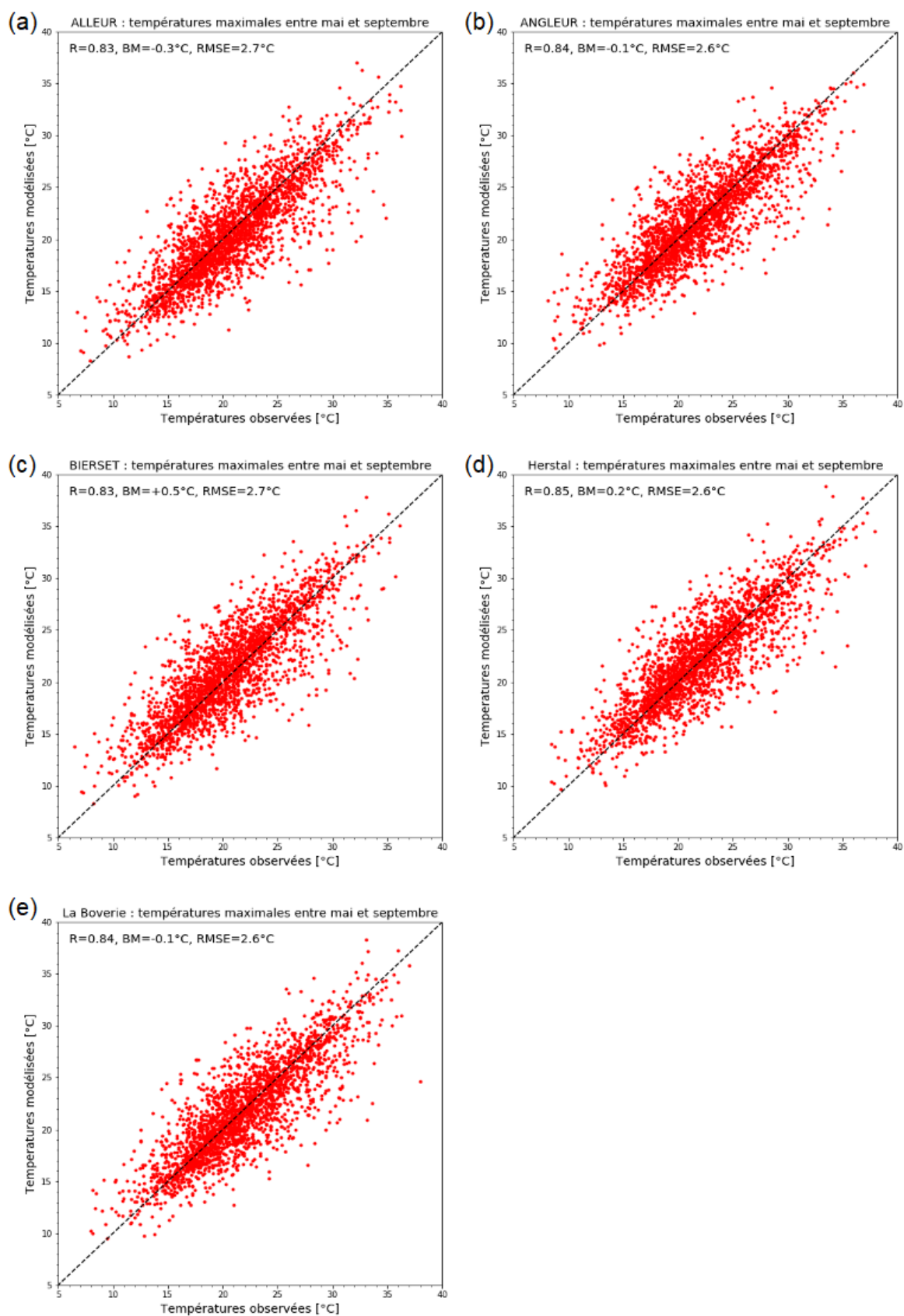


Figure A3. Températures maximales modélisées vs observées entre mai et septembre à (a) Alleur, (b) Angleur, (c) Bierset, (d) Herstal, et (e) La Boverie, pour la période 1996-2014.

Tableau A1 - Corrélation entre la température horaire de l'air (T2m) mesurée à Herstal et les mesures réalisées à Alleur, Angleur, Bierset, Jemeppe, et La Boverie entre les mois de mai et septembre de la période 1996-2014.

R	HERSTAL
ALLEUR	0,96
ANGLEUR	0,98
BIERSET	0,98
JEMEPPE	0,98
LA BOVERIE*	0,99

**période d'étude limitée à 1996-2012*

ANNEXES B

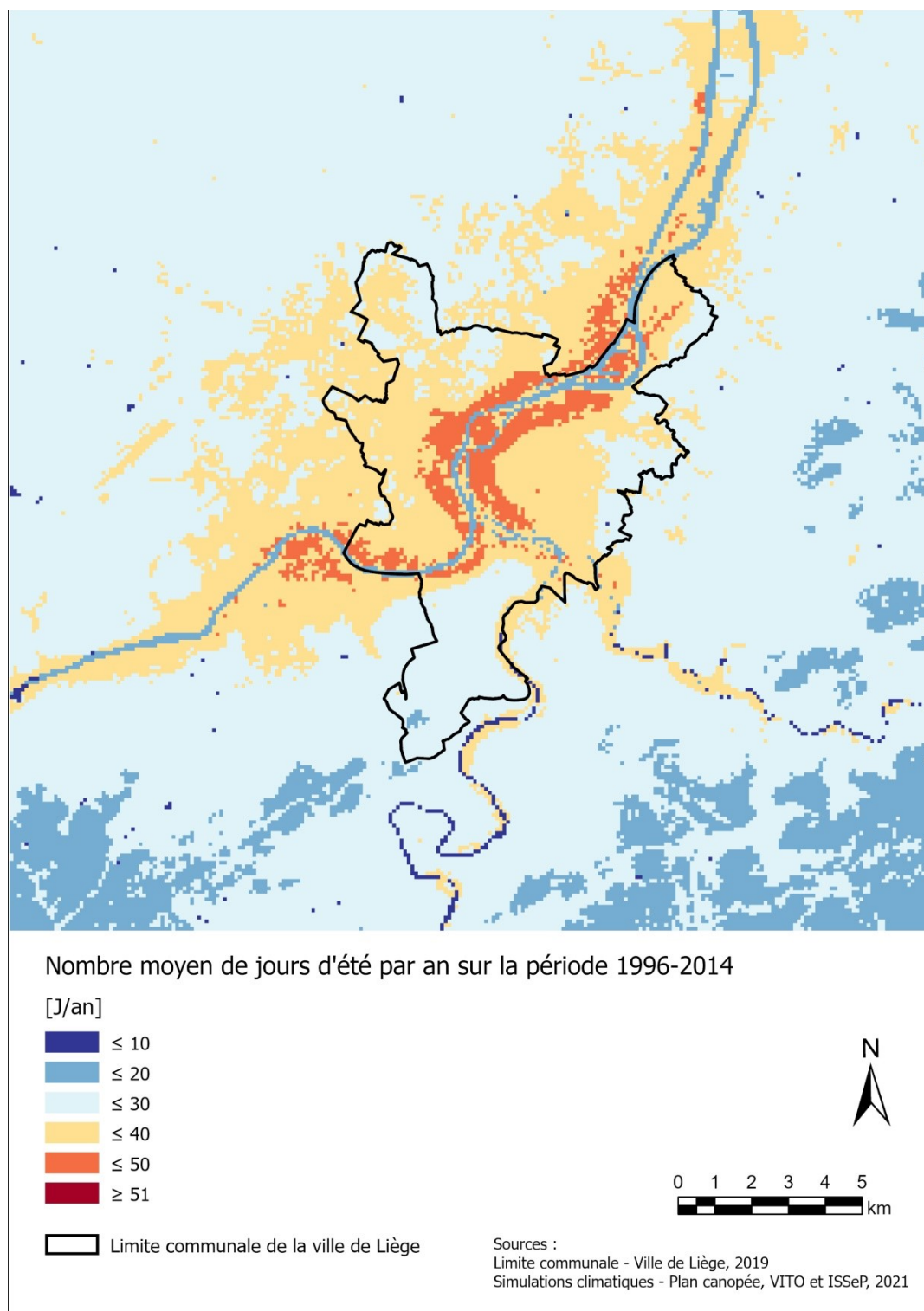


Figure B1. Nombre moyens de jour d'été ($T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) par an sur la période 1996-2014.

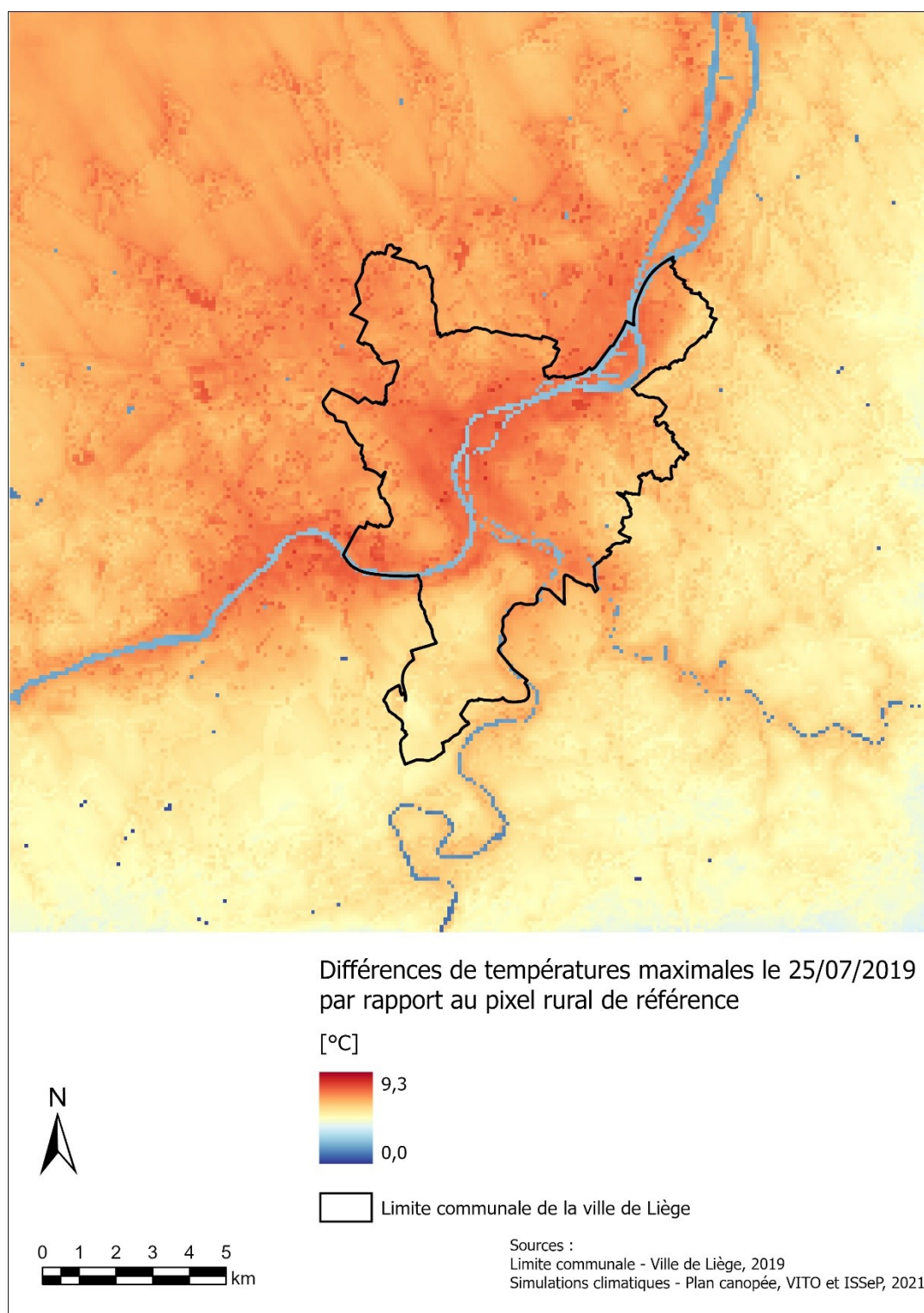


Figure B2. Intensité de l'ICU pour les températures maximales le 25/07/2019.

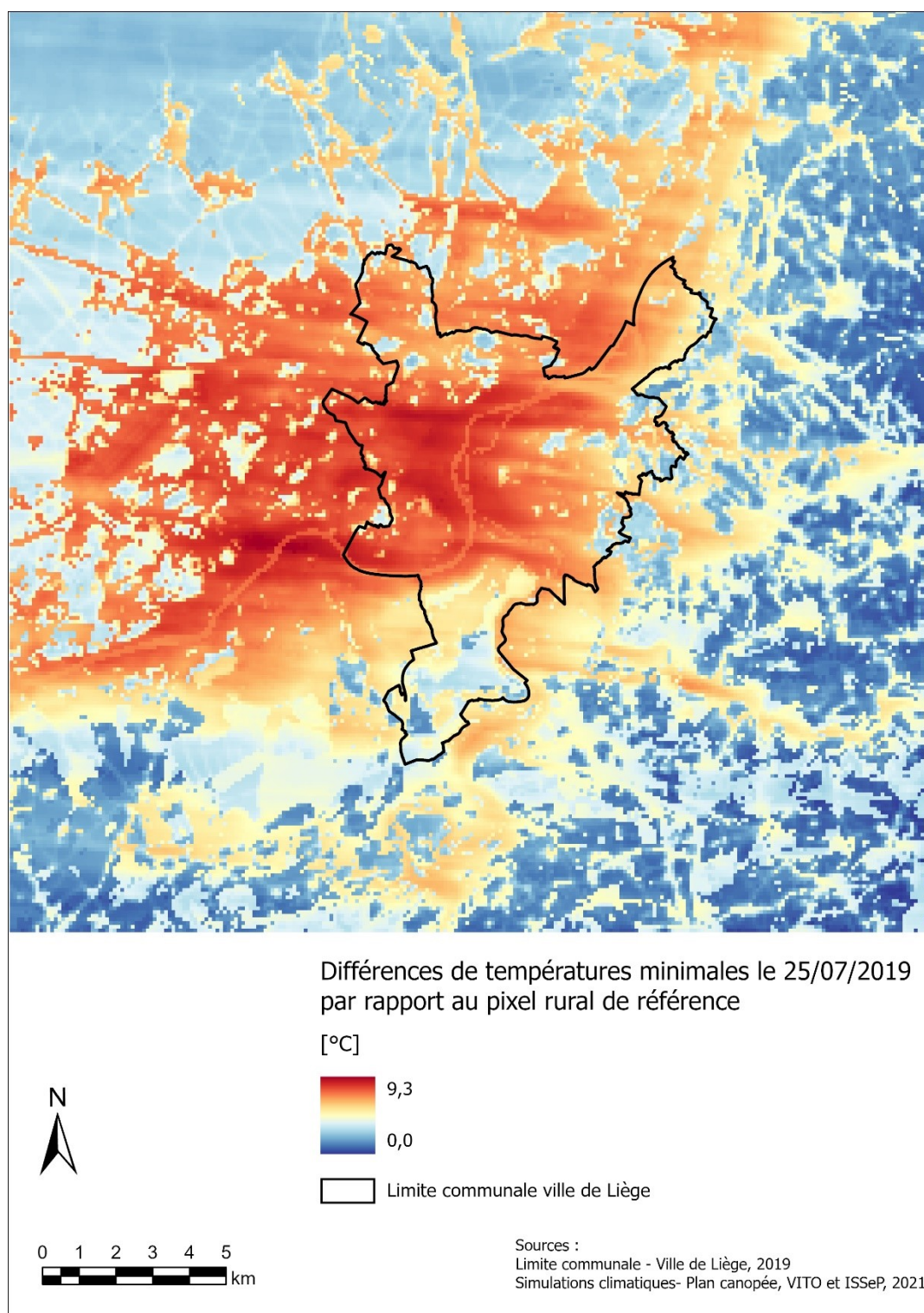


Figure B3. Intensité de l'ICU pour les températures minimales le 25/07/2019.

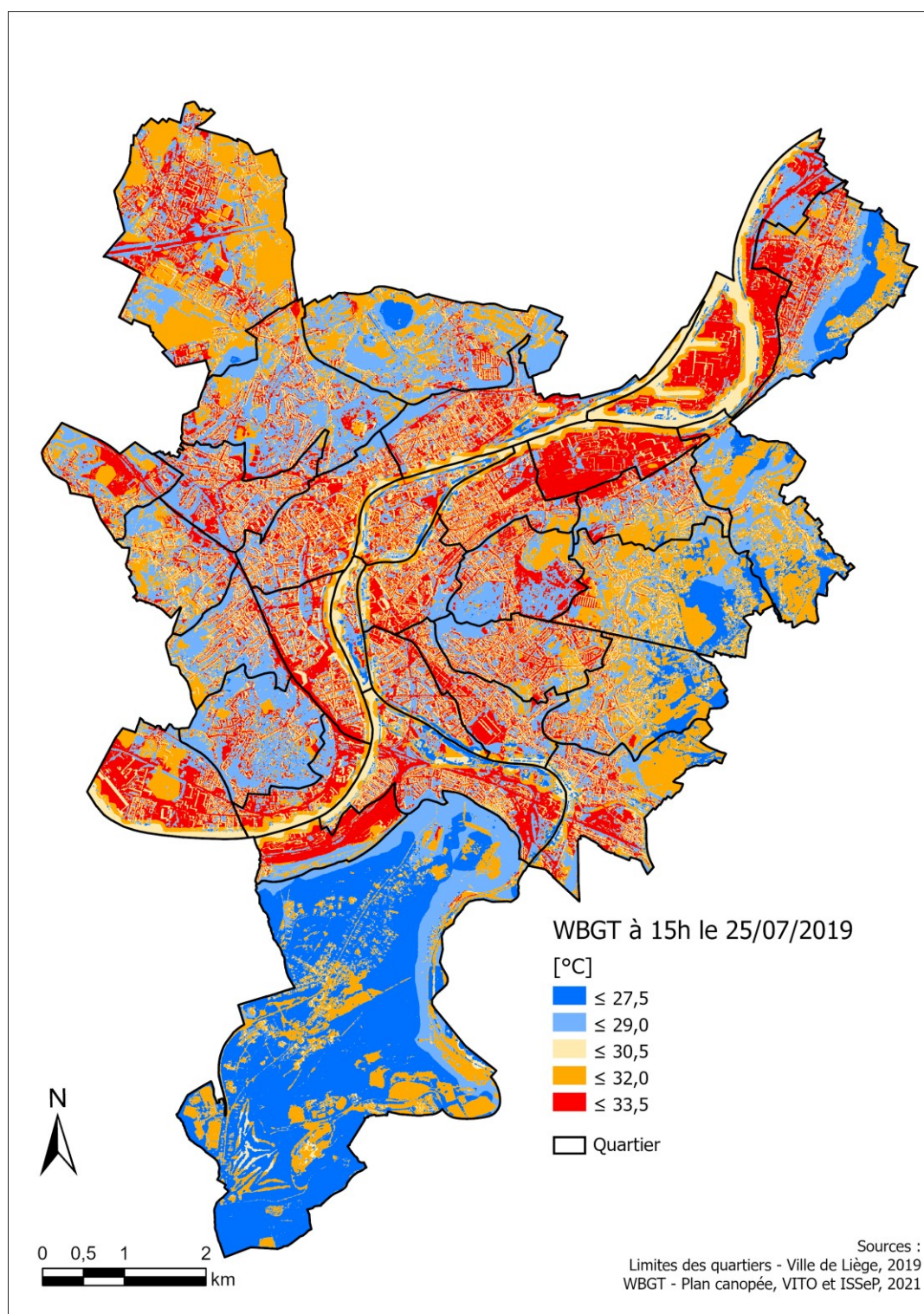


Figure B4. Valeurs WBGT à 15h simulées le 25/07/2019.

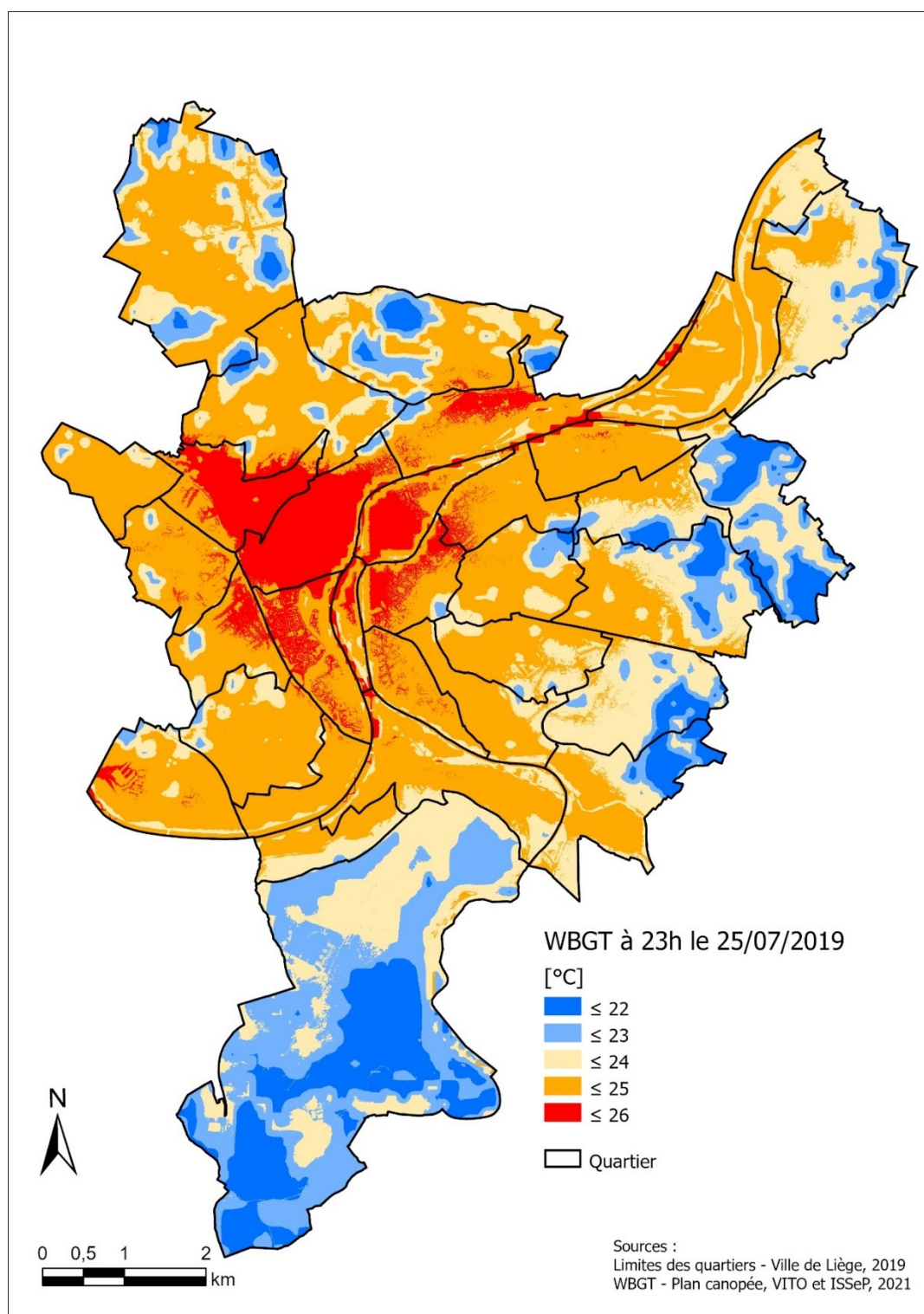


Figure B5. Valeurs WBGT à 23h simulées le 25/07/2019.

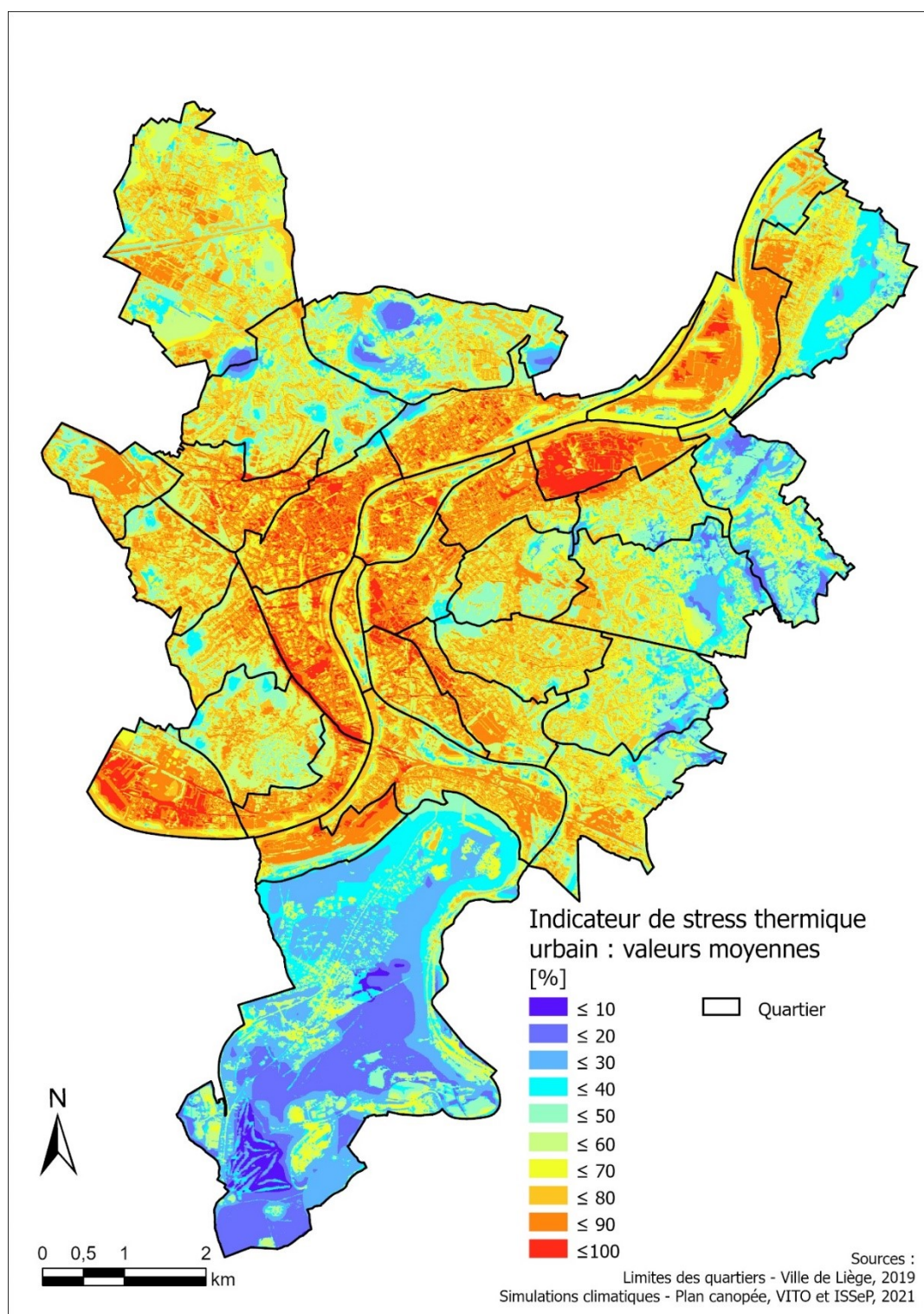


Figure B6. Indicateur de stress thermique urbain (STU) valeurs basées sur la WBGT moyenne simulées le 25/07/2019.

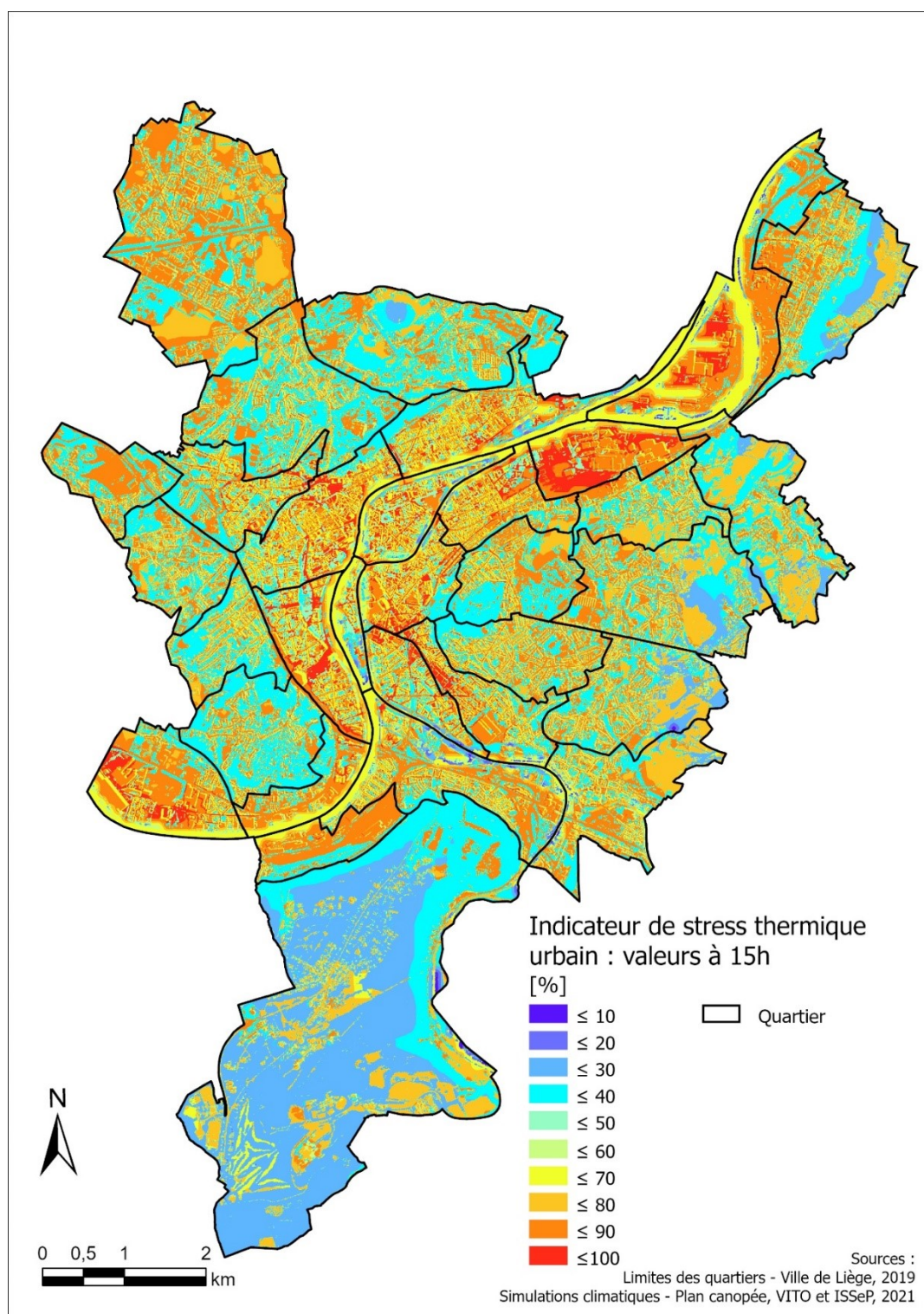


Figure B7. Indicateur de stress thermique urbain (STU) : valeurs basées sur la WBGT simulées à 15h le 25/07/2019.

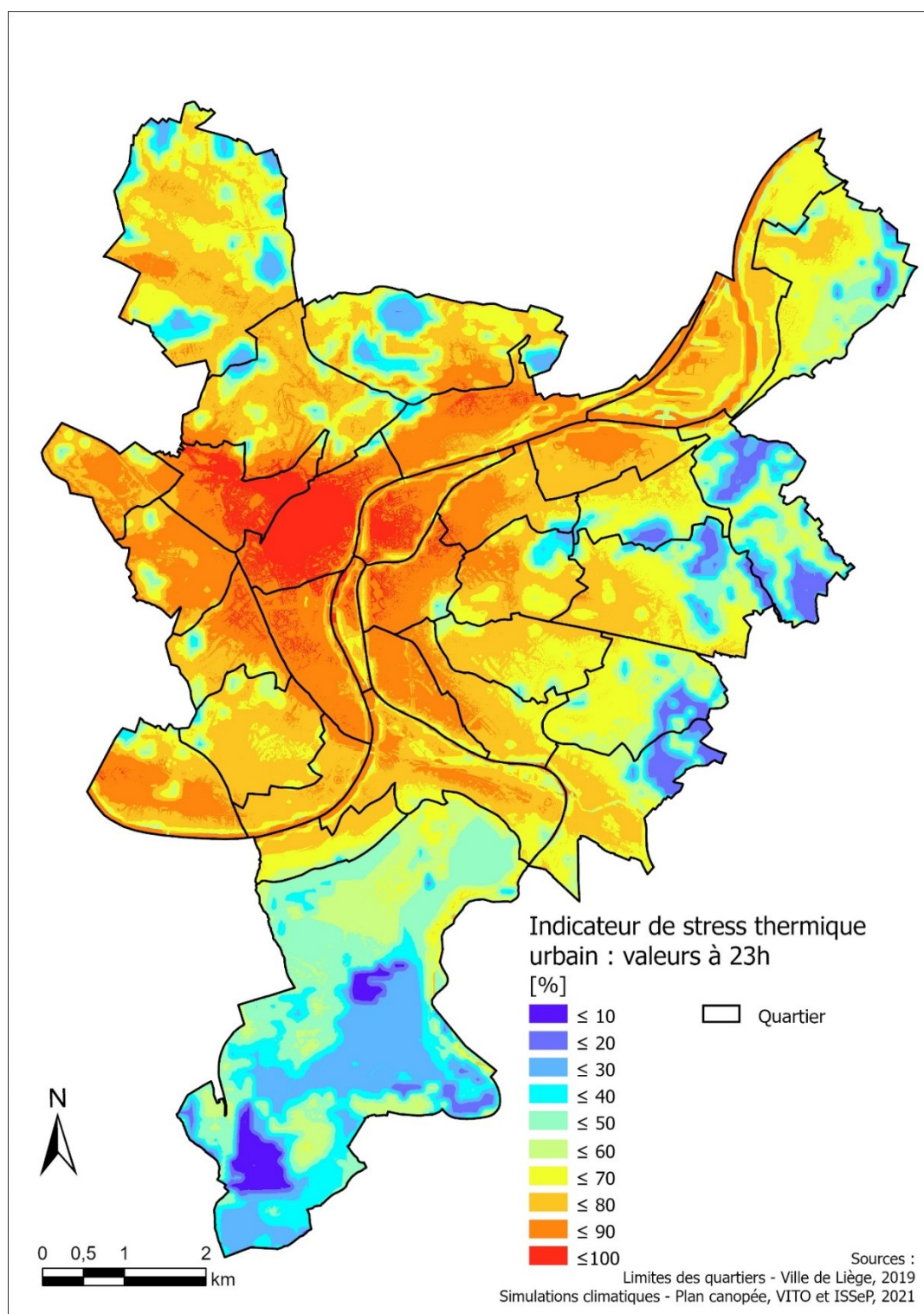


Figure B8. Indicateur de stress thermique urbain (STU) : valeurs basées sur la WBGT simulées à 23h le 25/07/2019.