



Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques

Villes

Cartographie des aléas liés à la chaleur et aux îlots de chaleur urbains

Rapport méthodologique



ICEDD



LIÈGE université
Climatologie



LIÈGE université
Gembloux
Agro-Bio Tech



LEMA



Jeur



ISSeP
Institut scientifique
de service public



JETPACK.AI



UNIVERSITÉ
DE NAMUR

Pouvoir adjudicateur :



Wallonie



SPW
Service public
de Wallonie

Auteurs

Coraline WYARD, chargée de projet, ISSeP - c.wyard@issep.be

Comité de relecture

Manu Harchies - mha@icedd.be

Cellule Télédétection et Géodonnées, ISSeP

Personne de contact

Coraline WYARD, chargée de projet, ISSeP - c.wyard@issep.be

Photo de couverture : Jonas Jaeken from Unsplash

Liège, le 18 mars 2025

Comment citer ce rapport

Wyard, C. Harchies, M. (2025). *Risques climatiques en Wallonie. Indicateur d'aléas liés à la chaleur et aux îlots de chaleur urbain*. Service Public de Wallonie (SPW) - Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC).

Table des matières

1. Introduction.....	4
2. Résumé	4
3. Définition de l'indicateur et périmètre.....	5
4. Matériel et méthode	6
4.1. Données utilisées.....	7
4.2. Création des cartes d'aléas d'ICU pour la Wallonie	10
5. Résultats finaux.....	13
5.1. Les aléas liés à la chaleur et aux ICU en Wallonie	13
6. Discussion.....	22
6.1. Synthèse	22
6.2. Zones à risques et zones d'intervention prioritaire	23
6.3. Recommandations	23
6.4. Limites	24
6.5. Perspectives d'améliorations	25
7. Annexes.....	26
7.1. Synthèses des groupes de travail.....	26
8. Références.....	28

1. Introduction

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats de la construction de la cartographie des **aléas liés à la chaleur et aux îlots de chaleur urbains (ICU)** permettant d'évaluer les risques climatiques en Wallonie pour la thématique des **Villes**.

Avec le changement climatique, les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes, intenses, durables, précoces et même tardives en Belgique (Lamarque et al., 2022). Or, ces vagues de chaleur sont généralement plus intenses en ville, car elles sont amplifiées par le phénomène d'**îlot de chaleur urbain (ICU)**. En effet, les constructions urbaines stockent la chaleur le jour et la restituent la nuit, tandis que leur configuration empêche une bonne ventilation de la ville. La forte activité humaine génère aussi des flux de chaleur. La faible présence du végétal et de l'eau peine à rafraîchir l'air ambiant. En conséquence, la température est plus élevée en ville qu'à la campagne et particulièrement durant la nuit. L'ICU s'additionne au signal de réchauffement global (Gallardo et al., 2022), avec des impacts notamment sur le confort thermique et la santé des citoyens. Un excès de mortalité est observé dans les villes belges lors des vagues de chaleur particulièrement dans les groupes de population vulnérables tels que les personnes âgées, les jeunes enfants, les personnes souffrant de maladies chroniques ou d'affections préexistantes (De Ridder et al., 2020 ; Van De Vel et al., 2021 ; Demoury et al., 2022). Cette cartographie des ICU de Wallonie permet de déterminer l'exposition de la population à la chaleur, d'identifier les zones les plus à risques et de définir des zones d'intervention prioritaires.

2. Résumé

L'îlot de chaleur urbain (ICU) désigne l'élévation localisée des températures enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales et forestières environnantes. En effet, les constructions urbaines stockent la chaleur le jour et la restituent la nuit, tout en limitant une bonne ventilation de la ville. La forte activité humaine génère aussi des flux de chaleur. La rareté du végétal et de l'eau limite le rafraîchissement de l'air. L'ICU s'additionne au signal de réchauffement global avec des impacts notamment sur le confort thermique et la santé des citoyens.

Ce travail vise à cartographier les aléas engendrés par la chaleur et les ICU sur l'ensemble de territoire wallon afin de caractériser la situation actuelle et son évolution possible dans le futur.

L'utilisation de la classification des Zones Climatiques Locales (LCZ) et leur caractérisation thermique à partir de sorties du modèle climatique UrbClim ont permis de réaliser une première caractérisation robuste des îlots de chaleur urbains actuels de Wallonie à une échelle fine (100 m) et d'en estimer l'évolution pour deux scénarios futurs : un monde à +2°C et un monde à +3°C de réchauffement global par rapport à l'ère préindustrielle. Les anomalies thermiques générées par le phénomène d'ICU ont pu être quantifiées. Les aléas nocturnes, diurnes et nocturne-diurne combinés ainsi que leur évolution future ont pu être cartographiés.

Deux faciès d'ICU émergent : un faciès très intense dans les centres et tissus urbains très denses des plus grandes villes wallonnes, et un faciès plus modéré dans les tissus moins denses de type banlieues, centres villageois, zoning commercial et industriel. Les zones urbaines denses et peu végétalisées, notamment dans le Sillon Sambre-et-Meuse, seront particulièrement vulnérables si le réchauffement atteint +3°C. Ces observations soulignent l'importance de maintenir le réchauffement planétaire en-dessous des +2°C, de préserver les zones non bâties et de modifier les environnements urbains (par végétalisation par exemple) pour transformer autant que possible les LCZ où les aléas sont plus élevés.

Les zones à risques apparaissent comme les zones qui affichent des niveaux d'aléas modérés à très élevés. Leur extension spatiale varie suivant le scénario climatique. A court terme, ces zones se

concentrent dans les centres urbains des plus grandes villes avant de gagner les villes de plus petites tailles et les noyaux villageois à mesure que le climat se réchauffe. Les zones d'intervention prioritaires sont à définir en fonction de la variable exposée qui intéresse les utilisateurs (ex : population, entreprises, activités touristiques) et de leur vulnérabilité.

L'approche développée dans cette étude lisse les modulations locales des ICU, et l'évolution des LCZ en fonction de l'urbanisation n'est pas intégrée, créant une incertitude. Des modèles plus complexes et des scénarios évolutifs des LCZ offrirait une analyse plus fine des variations thermiques locales.

3. Définition de l'indicateur et périmètre

La définition des risques associés aux ICU repose sur celle prescrite par le GIEC dans son 6^e rapport d'évaluation (IPCC, 2022a ; 2022b) et reprise dans le rapport TO (Lamarque et al., 2022). Les risques résultent ainsi de la combinaison de trois éléments :

- Le **danger ou l'aléa** se définit par son intensité, son occurrence spatiale (où) et temporelle (quand), et sa durée. Rapporté aux ICU, la notion d'aléa correspond aux événements de forte chaleur ayant pour effet le réchauffement d'intensité variable de tissus urbains localisés (ADULME, 2022) ;
- L'**exposition** se réfère à la présence de personnes, d'écosystèmes, d'infrastructure, ...
- La **vulnérabilité** de la population à l'aléa. Cette dernière est liée à sa **sensibilité** à la chaleur (qui dépend du sexe, de l'âge, de facteurs de co-morbidité) et à sa **capacité d'adaptation** et de gestion (qui dépend de facteurs socio-économiques, d'accessibilité aux îlots de fraîcheur, d'existence de plan de prévention).

L'objectif vise la création de cartes d'aléas liés à la chaleur et aux ICU sur l'ensemble de territoire wallon permettant de caractériser la situation actuelle et son évolution possible dans le futur à une résolution spatiale de 100 m.

La revue de littérature a mis en évidence que les ICU sont de plus en plus étudiés en Wallonie, sans toutefois avoir généré des produits satisfaisant les exigences de cette étude (pour plus de détails, voir le rapport de Benchmarking complet). Les approches possibles pour atteindre le premier objectif de cette étude sont diverses et dépendent des objectifs visés, de la disponibilité en données, et des moyens disponibles :

- Les **mesures de température de l'air** permettent une observation en temps réelle des ICU. Cependant, ces mesures sont ponctuelles, requièrent le déploiement d'un vaste réseau de capteurs, et ne permettent de caractériser que les ICU actuels.
- Les **mesures de températures de surface** aéroportées ou satellitaires ont l'avantage de fournir des mesures en chaque point d'un territoire. La disponibilité de ces données est toutefois tributaire de la nébulosité et les prétraitements à appliquer sont conséquents. En outre, ces données montrent les ICU de surface et leur corrélation avec la température de l'air dépend du moment de la journée.
- Les **simulations numériques** réalisées avec des modèles peuvent être utilisées pour reconstituer les ICU. D'une part, les **modèles de climat urbain** permettent de modéliser physiquement le climat des villes à une échelle très fine (entre 1 et 100 m) pour les scénarios et horizons temporels souhaités. Nous noterons la prépondérance de l'utilisation du modèle UrbClim (De Ridder et al., 2015a) dans les études belges et européennes (Lauwaet et al., 2023). Ce modèle n'est cependant pas libre d'accès. D'autre part, les sorties de **modèles régionaux** sont produites pour des mailles de plusieurs km, entre 2,8 et 7,5 km, de sorte que les villes, et de ce fait les ICU, y sont au mieux grossièrement représentés.

- Les **méthodes statistiques** sont également utilisées pour estimer les ICU. Elles mettent en relation des données climatiques (issues d'études de modélisation ou des campagnes d'observations) et des données caractérisant la morphologie urbaine et l'occupation du sol pour les estimer. Ces données sont mises en relation via des régressions linéaires multiples, du machine learning ou encore des analyses de variance. Ces méthodes permettent de s'affranchir des désavantages des simulations numériques : elles nécessitent moins de puissance de calcul et sont libres d'accès. Le **référentiel des zones climatiques locales (LCZ pour Local Climate Zone en anglais)** est parfois utilisé dans ce type d'étude et permet une première approche des ICU. Ce référentiel repose sur les travaux de Stewart et Oke (2012) qui différencient 17 zones au comportement climatique homogène sur base de leurs propriétés de surface, végétation, hauteur et espacement du bâti, artificialisation du sol. Certains types de LCZ sont ainsi associés à des ICU plus ou moins intenses. La mise en relation de ces LCZ avec des données climatiques (observées ou modélisées) permet de caractériser les ambiances thermiques et de ce fait les ICU rencontrées dans ces LCZ.

La revue de littérature s'est également penchée sur **les indicateurs thermiques utilisés pour caractériser les ICU**. L'intensité moyenne de l'ICU durant l'été (différence de température entre la ville et la campagne environnante), le nombre de jours de vague de chaleur, le nombre de degré-jour de vague de chaleur (HWDD), et le nombre de nuits chaudes reviennent le plus souvent dans les études. Les auteurs ont aussi recours à des indicateurs de température ressentie comme la WBGT et la PET pour mesurer le stress thermique auquel sont soumis les habitants. Ces indicateurs présentent tous des avantages et des inconvénients. Par exemple, l'utilisation du HWDD préconisée par De Ridder et al. (2015b) a l'avantage de prendre en compte la durée et l'intensité des vagues de chaleur mais n'est pas facile à comprendre pour le grand public, au contraire du nombre de jours de vague de chaleur. La WBGT et la PET permettent d'estimer la température ressentie par la population et sont d'ailleurs répertoriées par l'OMS dans son guide pour l'élaboration d'un système d'alerte au cas de vague de chaleur (WMO, 2015). La première a l'avantage d'être utilisée dans la législation belge du travail et d'être la norme ISO pour le confort thermique (ISO 7243:2017). On notera que la définition des vagues de chaleur, de nuit chaude, de jour de canicule, etc. varie d'un pays à l'autre. Les seuils au-delà desquels on parle de stress thermique sont aussi variables.

4. Matériel et méthode

Cette section présente la méthodologie qui a finalement été retenue pour atteindre les objectifs de cette étude ainsi que les données qui ont été utilisées. La Figure 1 synthétise cette méthodologie.

Pour cartographier les aléas liés aux ICU en Wallonie, l'approche par les zones climatiques locales (LCZ) est la méthode qui s'est révélée la plus pertinente d'un point de vue des objectifs de l'étude et de sa faisabilité en Wallonie (étant donné l'accessibilité des modèles, la disponibilité des données et le budget). Plus précisément, la méthode employée se base sur les méthodes statistiques implémentées sur la métropole de Lille (ADULM, 2022), sur les travaux de Richard et al. (2018) développés sur la métropole de Dijon et sur les recommandations formulées par Stewart et Oke (2012). Pour appliquer cette approche sur la Wallonie, nous utilisons la cartographie globale des LCZ à 100m de Demuzere et al. (2022). Comme données thermiques de références qui permettent de caractériser les ambiances thermiques au sein des différentes LCZ, nous utilisons les sorties d'UrbClim pour les mois d'été (juin, juillet et août) qui sont disponibles pour Liège, Charleroi et leur périphérie (Hooyberghs et al., 2019, Climate Analytics, 2022).

La Section 4.1 décrit les données qui ont été utilisées lors de l’implémentation de ces méthodes. La Section 4.2 détaille les différentes étapes méthodologiques qui ont permis l’obtention des cartes d’aléas d’ICU pour la Wallonie.

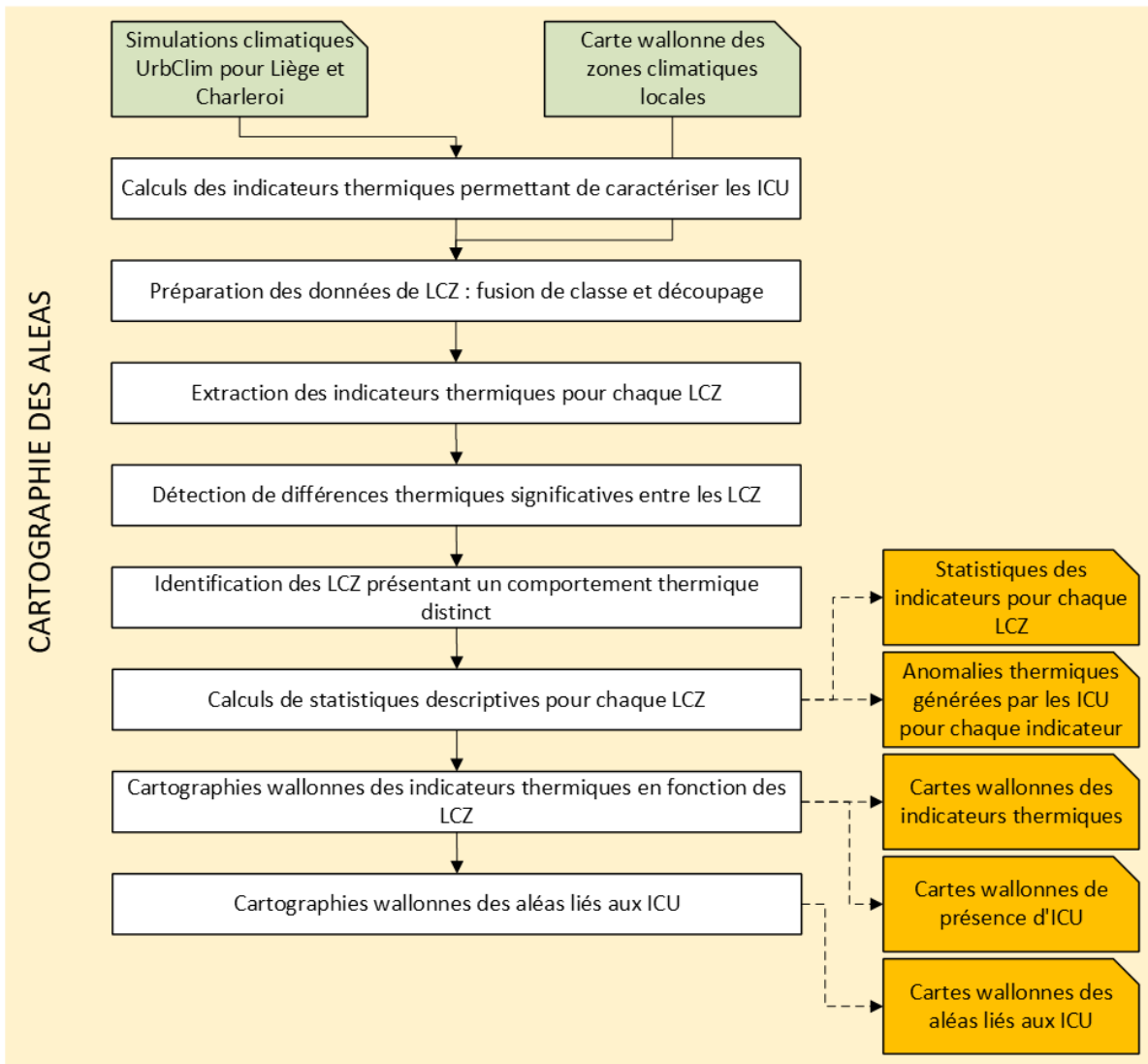


Figure 1. Synthèse de la méthodologie utilisée.

La méthodologie est divisée en deux grandes étapes : le grand rectangle jaune englobe les étapes méthodologiques relatives à la cartographie des aléas liés aux ICU (premier objectif de l’étude), le grand rectangle bleu englobe les étapes méthodologiques relatives à la cartographie du risque lié aux ICU. Les rectangles verts incarnent les données préexistantes qui ont été utilisées et qui sont décrites dans la Section 4.1. Les rectangles orange figurent les résultats qui ont été générés et qui sont décrits dans la Section 5.

4.1. Données utilisées

Modèle climatique urbain UrbClim

Pour **caractériser les ICU pour la période actuelle**, nous nous basons sur des simulations du modèle UrbClim disponible pour la période 2008-2017 (Hooyberghs et al., 2019). Ces données ont été générées en forçant UrbClim avec les réanalyses ERA5 issues du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF).

Pour caractériser les ICU du futur, nous utilisons des projections du modèle UrbClim forcé en combinant les simulations de l'ensemble MESMER-FaIR pour les trois principaux scénarios PROVIDE (Climate Analytics (2022)): (i) Politiques climatiques 2020, (ii) Action climatique retardée, (iii) Changement de trajectoire. Nous avons utilisé le scénario « Politiques climatiques 2020 » horizon 2050 et horizon 2100 de manière à étudier le climat des villes dans des mondes à +2°C et +3°C de réchauffement global par rapport à l'ère préindustrielle.

Notons que le degré de réchauffement global, pour la période actuelle considérée dans cet étude (2008-2017), est déjà de +0,9 à +1°C par rapport à l'ère préindustrielle.

Ces données sont disponibles sur Liège, Charleroi et leur périphérie à une résolution spatiale de 100m. Les emprises spatiales de ces simulations d'UrbClim sont visibles sur la Figure 3(a). Nous utilisons les données horaires de température de l'air à 2m au-dessus du sol durant les mois d'été (juin, juillet et août).

Zones climatiques locales (LCZ)

La cartographie mondiale des LCZ produite par Demuzere et al. (2022) a été utilisée. Cette cartographie, d'une résolution spatiale de 100m, est composée de 10 classes « bâties » et de 7 classes « non bâties » (Figure 2). Elle a été en utilisant des algorithmes d'intelligence artificielle entraînés avec des images d'observation de la Terre. Sa qualité a été évaluée à l'aide d'une validation croisée bootstrap et d'un benchmark thématique pour 150 zones urbaines fonctionnelles sélectionnées à l'aide de données mondiales indépendantes et open-source caractérisant la couverture des sols, l'imperméabilité des surfaces, la hauteur des bâtiments et la chaleur anthropogénique. Les indicateurs de précision dépassent les 70%.

La carte présentée sur la Figure 3 montre la cartographie des LCZ pour la Wallonie (Figure 3 (a)) et leur abondance en dénombrant le nombre de cellules de 100x100m² par LCZ (Figure 3(b)). Les classes de LCZ les plus fréquentes en Wallonie sont la 14 – Végétation basse (D), 11 – Arbres denses (A), 12 – Arbres clairsemés (B), 9 – Constructions peu denses, 6 – Immeubles bas espacés. On remarque aussi que certaines classes sont peu présentes sur le territoire comme les classes 1 – Tours compactes, 3 – Bâtiments bas compacts, 13 – Buissons et broussailles (C). La classe 7 – Constructions légères denses est absente du territoire wallon.

La Figure 3(a) montre aussi les emprises spatiales des simulations UrbClim que nous avons utilisé (voir point précédent) tandis que la Figure 3(c) montre la représentativité de chaque LCZ au sein de ces emprises. On constate que toutes les LCZ y sont bien représentées à l'exception des classes rares mentionnées ci-dessus et des classes 15 – Sol rocailleux ou pavé et 16 – Sol nu ou sableux.






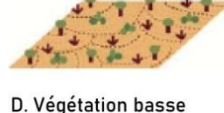




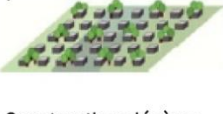






Classes « bâties »	Définition	Classes « non-bâties »	Définition
1. Tours compactes 	Mélange dense de bâtiments de grande hauteur avec des étages multiples. Peu ou pas d'arbres. Sol couvert principalement de matériaux pavés. Matériaux de construction : béton, acier, pierre et verre.	A. Arbres denses 	Paysage fortement boisé de feuillus et/ou de conifères. Sol principalement perméable (plantes basses). Fonction de la zone : forêt naturelle, culture arboricole, ou parc urbain.
2. Immeubles compacts 	Mélange dense de bâtiments de hauteur moyenne (3-9 étages). Peu ou pas d'arbres. Sol couvert principalement de matériaux pavés. Matériaux de construction : pierre, brique, carrelage et béton.	B. Arbres clairsemés 	Paysage légèrement boisé de feuillus et/ou de conifères. Sol principalement perméable (plantes basses). Fonction de la zone : forêt naturelle, culture arboricole, ou parc urbain.
3. Bâtiments bas compacts 	Mélange dense de bâtiments de faible hauteur (1-3 étages). Peu ou pas d'arbres. Sol couvert principalement de matériaux pavés. Matériaux de construction : pierre, brique et béton.	C. Buissons et broussailles 	Disposition d'arbustes, de broussailles et de petits arbres ligneux. Sol principalement perméable (sol nu ou sable). Fonction de la zone : broussailles naturelles ou parc naturel.
4. Tours espacées 	Disposition espacée de bâtiments de grande hauteur avec des étages multiples. Abondance de couverture terrestre perméable (plantes basses, arbres dispersés). Matériaux de construction : béton, acier et verre.	D. Végétation basse 	Paysage sans relief de graminées ou de plantes herbacées/cultures. Peu ou pas d'arbres. Fonction de la zone : prairie naturelle, agriculture ou parc urbain.
5. Immeubles espacés 	Disposition espacée de bâtiments de hauteur moyenne (3-9 étages). Abondance de couverture terrestre perméable (plantes basses, arbres dispersés). Matériaux de construction : béton, acier et verre.	E. Sol rocailleux ou pavé 	Paysage sans relief de roches ou de sol pavé. Peu ou pas d'arbres ni de plantes. Fonction de la zone : désert naturel (roches) ou transport urbain.
6. Bâtiments bas espacés 	Disposition espacée de bâtiments de faible hauteur (1-3 étages). Abondance de couverture terrestre perméable (plantes basses, arbres dispersés). Matériaux de construction : bois, brique, pierre et béton.	F. Sol nu ou sableux 	Paysage sans relief de sol ou de sable. Peu ou pas d'arbres ni de plantes. Fonction de la zone : désert naturel ou transport urbain.
7. Constructions légères denses 	Mélange dense de bâtiments d'un seul étage. Peu ou pas d'arbres. Sol principalement compacté. Matériaux de construction légers (par exemple, bois, chaume, tôle).	G. Eau 	Grandes étendues d'eau comme les mers et les lacs, ou petites étendues d'eau comme les rivières, les réservoirs et les lagunes.
8. Bâtiments bas de grande emprise 	Disposition espacée de grandes structures basses (1-3 étages). Peu ou pas d'arbres. Sol principalement pavé. Matériaux de construction : acier, béton, métal et pierre.	<div style="background-color: #f9e79f; padding: 10px;"> <p>Des propriétés de la couverture de sol variables</p> <p>Les propriétés de la couverture de sol peuvent changer significativement, parfois de façon sporadique, en fonction des conditions météorologiques, des pratiques agricoles, et/ou des cycles saisonniers :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Arbres nus : Arbres feuillus sans feuilles (par exemple, en hiver). Facteur de vue du ciel accru. Albédo réduit. ▪ Couverture neigeuse : Neige couvrant le sol de plus de 10 cm de profondeur. Albédo élevé. ▪ Sol sec : Sol asséché. Faible admittance. Ratio de Bowen élevé. Albédo accru. ▪ Sol humide : Sol gorgé d'eau. Haute admittance. Faible ratio de Bowen. Albédo réduit. </div>	
9. Constructions peu denses 	Disposition éparses de petits ou moyens bâtiments dans un cadre naturel. Abondance de couverture terrestre perméable (plantes basses, arbres dispersés).		
10. Industries lourdes 	Structures industrielles basses et massives (tours, réservoirs, réservoirs). Peu ou pas d'arbres. Sol couvert principalement de matériaux pavés ou durcis. Matériaux de construction : métal, acier et béton.		

Figure 2. Définition des 17 zones climatiques locales (LCZ). Figure adaptée et traduite de Stewart & Oke (2012).

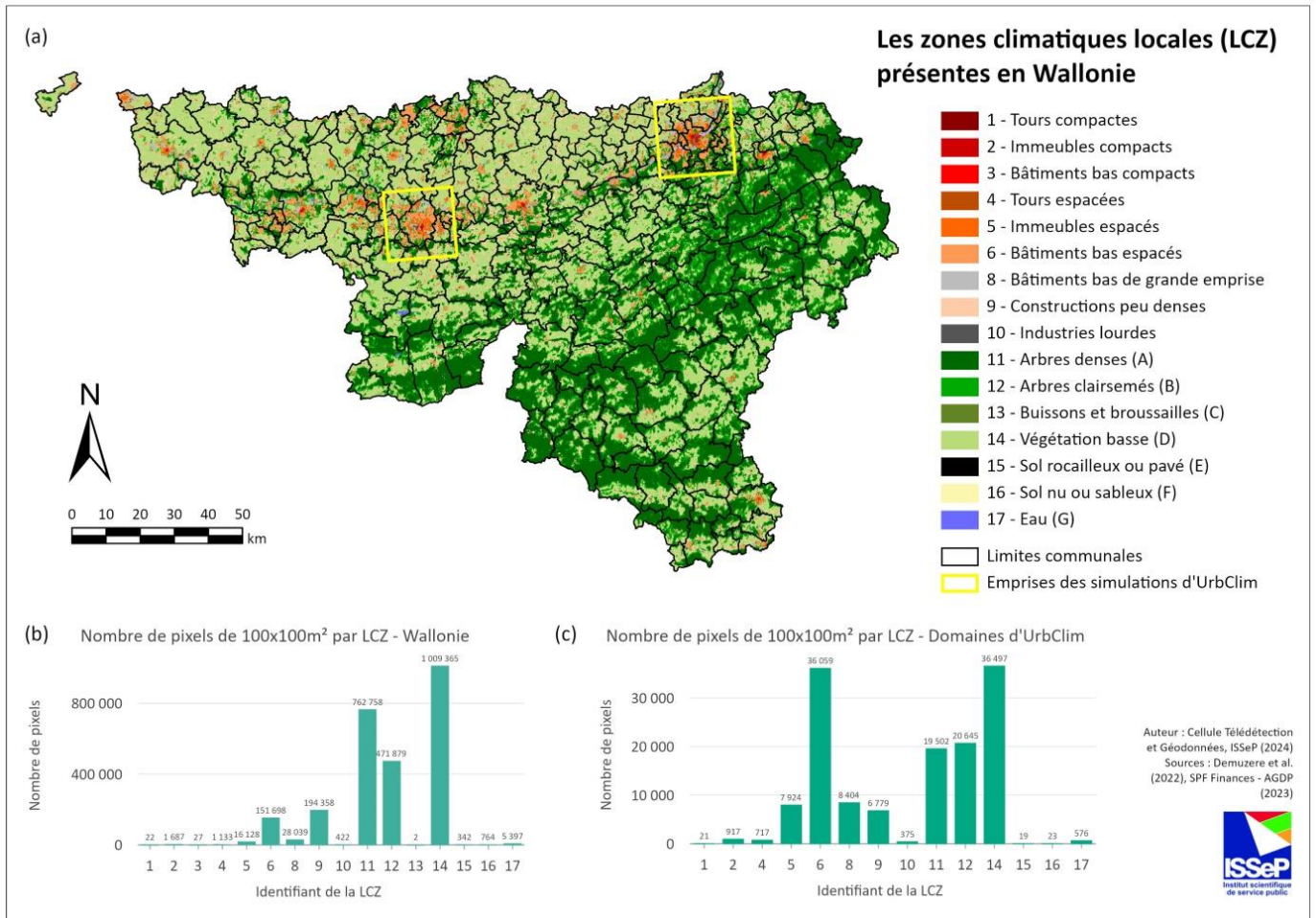


Figure 3. Zones climatiques locales présentes en Wallonie : (a) cartographie, (b) abondance en Wallonie, et (c) abondance au sein des domaines de simulations d'UrbClim.

4.2. Création des cartes d'aléas d'ICU pour la Wallonie

Cette section détaille les différentes étapes méthodologiques qui ont permis l'obtention des cartes d'aléas d'ICU pour la Wallonie (Figure 1).

Calcul des indicateurs thermiques permettant de caractériser les ICU

À partir des sorties du modèle UrbClim décrites dans la Section 4.1, quatre indicateurs thermiques diurnes et nocturnes permettant de caractériser les ICU présents et futurs ont été calculés en se basant sur la revue de littérature résumée dans la Section 3 :

- **Nombre de jours d'été** : jours où la température maximale dépasse les 25°C. Ce nombre permet de caractériser l'ICU diurne ;
- **Nombre de jours de vague de chaleur** : d'après la définition de l'IRM, il y a une vague de chaleur lorsque les températures maximales atteignent au moins 25°C durant au moins 5 jours consécutifs parmi lesquels le seuil des 30°C est atteint durant au moins trois jours. Ce nombre permet de caractériser l'ICU diurne et introduit la notion d'exposition prolongée des citoyens à de fortes chaleurs. Cette exposition prolongée augmente le risque de morbidité et de mortalité ;
- **Nombre de nuits chaudes** : nuits durant lesquelles la température minimale dépasse les 18°C. Cet indicateur permet de caractériser l'ICU nocturne. En outre, les nuits chaudes sont aussi

considérées comme néfastes pour la santé des citoyens car elles dégradent la qualité du sommeil, et de ce fait la récupération des organismes par temps chaud ;

- **Température de l'air à 23h** : moment de la journée durant lequel l'intensité de l'ICU est la plus grande. C'est le moment de la journée où la morphologie urbaine est le facteur qui impacte le plus la température de l'air (Richard et al., 2018).

Ces quatre indicateurs thermiques ont été calculés pour les 3 modélisations climatiques (période de référence, monde à +2°C et monde à +3°C). A titre d'exemple, la Figure 4 montre l'évolution du nombre de jour de vague de chaleur pour Charleroi et Liège simulée par UrbClim. On peut observer que les augmentations du nombre de jours de vague de chaleur ne sont pas uniformes sur le territoire : les zones qui enregistrent les plus grandes augmentations sont les zones urbaines les plus densément bâties en raison de l'ICU qui y amplifie les augmentations de températures. On notera qu'UrbClim simule des augmentations plus importantes dans les zones bâties de Liège en raison d'un bâti plus dense et de l'effet de vallée qui piège la chaleur.

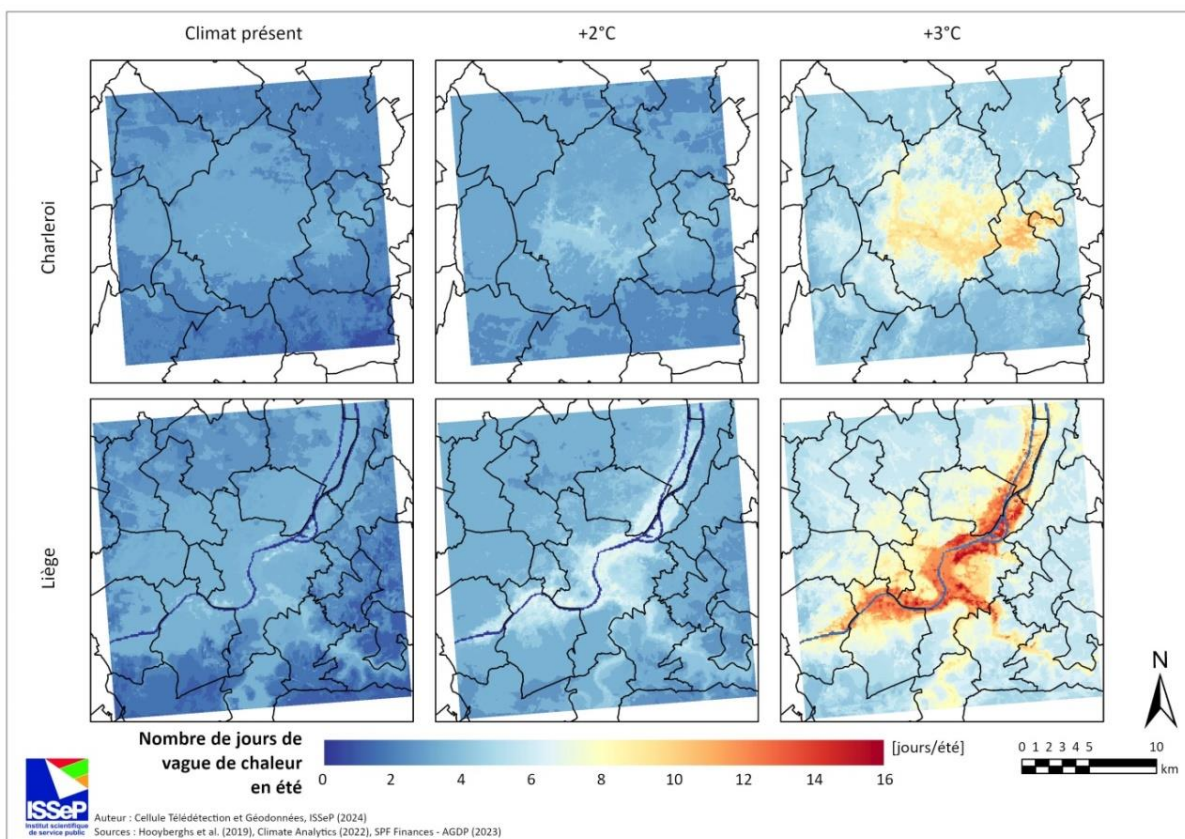


Figure 4. Nombre de jours de vague de chaleur simulés par UrbClim pour Charleroi et Liège pour le climat présent (2008-2017), dans un monde à +2°C et dans un monde à +3°C.

Préparation des données de LCZ : fusion de classes et découpage

Comme certaines classes LCZ sont faiblement représentées en Wallonie (Figure 3(b)) mais aussi au sein des emprises spatiales des simulations d'UrbClim (Figure 3(c)), elles ont été regroupées sur la base de leurs caractéristiques communes afin de garantir la robustesse statistique de notre analyse. Ce regroupement a été effectué sur la base des descriptions détaillées fournies par Stewart et Oke (2012), qui définissent les LCZ selon des critères tels que l'admittance, l'albédo, la perméabilité, la densité de construction, de végétation, et de surface imperméabilisée. Les classes 1 et 3 ont été greffées à la classe 2, de même que la classe 10 à la 8, et la classe 13 à la 16. Cela a permis d'obtenir des groupes suffisamment volumineux pour les analyses statistiques tout en préservant les

distinctions clés entre les différentes LCZ. Notons que les classes 15 et 16 ont été maintenues malgré leur faible représentativité car leurs caractéristiques physiques étaient trop différentes des autres classes.

La carte des LCZ résultante a ensuite été découpée selon l'emprise spatiale des simulations d'UrbClim pour garantir que chaque cellule de la grille UrbClim est correctement attribuée à une classe LCZ.

Extraction des indicateurs thermiques pour chaque LCZ

Les indicateurs thermiques calculés ont été extraits pour chaque point de la grille LCZ découpée. Les valeurs aberrantes présentes dans les jeux de données résultantes ont été supprimées. Elles ont été identifiées comme les valeurs inférieures au premier quartile (Q1) ou supérieures au troisième quartile (Q3) de chaque indicateur thermique pour chaque LCZ. Ces valeurs atypiques sont susceptibles d'indiquer des erreurs possibles de classification dans la carte LCZ.

Détection de différences thermiques significatives entre les LCZ

Une première salve d'analyses statistiques a été réalisée pour confirmer qu'il existe des différences thermiques significatives entre les différentes classes de LCZ. Pour cela, le test statistique paramétrique ANOVA1 et le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis ont été utilisés sur les quatre indicateurs thermiques, à travers les trois scénarios climatiques, aboutissant à un total de douze analyses statistiques distinctes. Avant de procéder à l'ANOVA1, les hypothèses sous-jacentes ont été vérifiées. La normalité des résidus pour chaque LCZ a été vérifiée en utilisant les tests de Shapiro-Wilk et Kolmogorov-Smirnov, et les Q-Q plots ont été tracés pour évaluer visuellement la distribution des résidus par rapport à une distribution normale théorique. Le test de Bartlett a été utilisé pour vérifier l'homogénéité des variances entre les LCZ.

Identification des LCZ présentant un comportement thermique distinct

Après avoir détecté des différences globales significatives avec les LCZ avec l'ANOVA1 et le test de Kruskal-Wallis, des méthodes de comparaison multiple post-hoc (ou à posteriori) ont été utilisées pour identifier les LCZ spécifiques qui diffèrent les unes des autres. Le test de Tukey HSD (Honestly Significant Difference) et le test de Dunn ont été utilisés pour garantir une évaluation exhaustive des différences thermiques.

Calculs des statistiques descriptives pour chaque LCZ

Une fois les analyses statistiques précédentes réalisées, les ambiances thermiques présentes au sein de chaque LCZ sont caractérisées à l'aide de la médiane calculée pour chaque indicateur thermique et chaque scénario climatique. Les anomalies liées au phénomène d'ICU sont aussi calculées en comparant les valeurs obtenues pour les LCZ avec ICU à celles obtenues pour les LCZ sans ICU conformément aux recommandations de Stewart & Oke (2012).

Cartographies wallonnes des indicateurs thermiques en fonction des LCZ

Les quatre indicateurs thermiques sont ensuite cartographiés pour toute la Wallonie à partir des statistiques par LCZ calculées précédemment et la carte wallonne des LCZ présentée à la Figure 3. Ces cartes permettent d'ajouter une dimension spatiale aux évolutions climatiques.

Cette étape permet aussi la création d'une carte de présence des ICU en mettant en évidence les endroits où les LCZ sont génératrices d'un ICU.

Création des cartes d'aléas

Les cartes d'aléas ont ensuite été construites sur base des indicateurs cartographiés. Dans un premier temps, deux cartes ont été construites de manière à caractériser l'aléa diurne et l'aléa nocturne en utilisant les résultats obtenus pour le nombre de jours de vagues de chaleur et le nombre de nuits chaudes. Ces deux indicateurs sont en effet les plus impactant sur la santé humaine. Les valeurs de chacun de ces deux indicateurs thermiques ont été classées en 5 classes d'aléas, à l'image de la

vulnérabilité socio-économique : « Très faible », « Faible », « Modéré », « Élevé », « Très élevé ». Ces classes ont été obtenues en reprenant pour chaque indicateur, l'étendue des valeurs possibles du climat présent jusqu'au scénario +3°C et en divisant par 5 cette étendue pour obtenir 5 classes de largeur égale. Cette classification est ensuite appliquée aux valeurs obtenues pour les 3 scénarios climatiques. L'utilisation de l'étendue des valeurs du climat présent jusqu'au scénario +3°C permet de voir l'évolution spatiale de l'aléa. En effet, si les classes d'aléas avaient été déterminées sur la seule base des valeurs modélisées pour le présent, la majorité du territoire wallon serait passée dans la classe d'aléa « Très élevé » dès le scénario +2°C pour le nombre de nuits chaudes (+3°C pour le nombre de jours de vagues de chaleur) et nous n'aurions pas pu observer les disparités spatiales futures.

Dans un second temps, les deux cartes d'aléas diurne et nocturne ont été synthétisées en une seule carte en moyennant les classes d'aléas (au préalable numérotées de 1 à 5) pour chaque pixel.

Des cartes d'aléas pour 3 scénarios climatiques ont ainsi été produites à une résolution de 100 m : climat présent, monde à +2°C et monde à +3°C par rapport à l'ère préindustrielle.

5. Résultats finaux

5.1. Les aléas liés à la chaleur et aux ICU en Wallonie

Les analyses statistiques décrites dans la Section 4.2 ont confirmé qu'il existe des différences thermiques significatives entre les LCZ en Wallonie et que pratiquement tous les LCZ présentent des ambiances thermiques significativement distinctes à quelques exceptions près :

- les LCZ 2 (immeubles compacts) et 4 (tours espacées) présentent des similitudes au moins pour les indicateurs thermiques diurnes (nombre de jours de vagues de chaleur et nombre de jours d'été) ;
- il existe une incertitude concernant les LCZ 15 et 16 qui présentent des similitudes avec un grand nombre de LCZ. Le faible nombre de points disponibles pour ces LCZ limite notre capacité à conclure de manière définitive sur leurs différences thermiques.

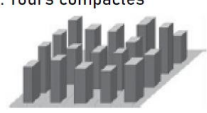






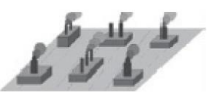

Ces résultats renforcent la robustesse de notre analyse et soulignent l'impact des caractéristiques urbaines définies par les LCZ sur les conditions thermiques locales.




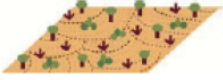
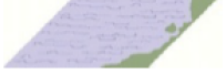
Ces hypothèses confirmées, les ambiances thermiques au sein de chaque LCZ ont pu être caractérisées en utilisant la médiane de chaque indicateur thermique calculée pour chaque LCZ (Tableau 1). On constate :

- En valeur absolue, les LCZ les plus densément bâties et pauvres en végétation, c'est-à-dire les LCZ 1-4, sont celles où les quatre indicateurs affichent les valeurs les plus élevées. Les LCZ 5, 6, 8, 10 affichent des valeurs intermédiaires, tandis que les LCZ 11, 12, 14 affichent les valeurs les plus basses. On peut ainsi conclure que les LCZ 1-4 correspondent aux LCZ où l'ICU est le plus intense tandis que les LCZ 5, 6, 8, 10 représentent une situation intermédiaire par rapport aux LCZ 11, 12, 14 où le phénomène d'ICU est absent. Notons que la LCZ 9 (Constructions peu denses) a un comportement similaires aux LCZ sans ICU.
- L'augmentation relative par rapport au présent du nombre de jour de vagues de chaleur est plus importante dans les LCZ 1-4.
- Concernant le nombre de nuit chaudes, l'augmentation relative est plus importante dans les LCZ les plus densément végétalisées (LCZ 9, 11, 12, 14). En effet, le couvert végétal va avoir tendance à conserver la chaleur accumulée en journée.

- Lorsque l'on regarde les augmentations relatives moyennes pour chaque indicateur par rapport au présent, on constate que les augmentations générées par des climats plus chauds sont exponentielles sauf pour la température à 23h. Par exemple, pour le nombre de nuits chaudes, il y aurait en moyenne +53,2% dans un futur à +2°C, et +198% (nombre de nuits chaudes) dans un futur à +3°C. Cela signifie que dans un futur à +3°C, il y aurait près de 3 fois plus de nuits chaudes en été qu'actuellement.

Tableau 1. Indicateurs thermiques médians simulés au sein des différentes zones climatiques locales de Wallonie pour le présent et augmentation potentielle dans des climats à +2°C et +3°C.

	Nombre de jours de vague de chaleur [jours/été]			Nombre de jours d'été [jours/été]			Nombre de nuits chaudes [nuits/été]			Température moyenne à 23h [°C]		
	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C
1. Tours compactes 												
2. Immeubles compactes 	3,5	+69%	+237%	24,8	+19%	+60%	17,8	+40%	+128%	17,7	+5%	+5%
3. Bâtiments bas compacts 												
4. Tours espacées 	3,5	+66%	+249%	25,0	+19%	+60%	15,9	+47%	+142%	17,6	+5%	+5%
5. Immeubles espacés 	3,3	+24%	+164%	22,1	+21%	+57%	10,9	+50%	+165%	16,9	+5%	+8%
6. Bâtiments bas espacés 	3,1	+10%	+110%	19,5	+21%	+63%	7,7	+51%	+200%	16,3	+5%	+8%
8. Bâtiments bas de grande emprise 												
10. Industries lourdes 	3,4	+18%	+135%	21,7	+21%	+59%	10,6	+49%	+172%	16,8	+5%	+8%
9. Constructions peu denses 	2,1	+48%	+143%	16,9	+27%	+72%	4,2	+60%	+250%	15,4	+5%	+9%

A. Arbres denses 	2,1	+52%	+148%	16,7	+28%	+74%	5,0	+58%	+218%	15,6	+5%	+9%
B. Arbres clairsemés 	2,4	+42%	+137%	17,5	+27%	+72%	4,0	+60%	+258%	15,2	+5%	+9%
D. Végétation basse 	2,2	+41%	+118%	16,8	+29%	+72%	2,7	+81%	+307%	14,8	+5%	+11%
E. Sol rocailleux ou pavé 	3,4	+0%	+115%	20,3	+19%	+61%	8,5	+48%	+194%	16,4	+5%	+5%
F. Sol nu ou sableux 	3,4	+18%	+100%	19,0	+24%	+68%	4,2	+52%	+240%	15,1	+6%	+10%
C. Buissons et broussailles 	0,1	+0%	+140%	7,8	+37%	+158%	11,5	+71%	+223%	16,9	+5%	+5%
G. Eau 												
Moyenne	2,8	+35%	+157%	19,6	+24%	+70%	9,0	+53%	+198%	16,3	+5%	+8%

Sur base de ces constats, l’anomalie engendrée par le phénomène d’ICU a été calculée en comparant les valeurs des indicateurs observée dans les LCZ où le phénomène d’ICU est présent (LCZ 1-6, 8, 10) à celle obtenues pour les LCZ où le phénomène est absent (LCZ 11, 12, 14) (Tableau 2). On constate que le phénomène d’ICU a beaucoup plus d’impact sur les températures nocturnes, matérialisés ici par le nombre de nuits chaudes, en accord avec la littérature. Par exemple, pour le climat présent, il peut y avoir plus de 4 fois de nuit chaudes (+332%) dans les lieux où l’ICU est le plus fort (Centres et tissus urbains très denses – LCZ 1-4) par rapport aux zones rurales où le phénomène est absent. Dans les tissus moins denses (LCZ 5, 6, 8, 10), il peut y avoir jusqu’à 2,5 fois plus de nuits chaudes (+150%) par rapport aux zones sans ICU.

Tableau 2. Anomalies générées par le phénomène d'ICU sur les valeurs des indicateurs sans ICU.

	Nombre de jours de vague de chaleur [jours/été]			Nombre de jours d'été [jours/été]			Nombre de nuits chaudes [nuits/été]			Température moyenne à 23h [°C]		
	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C
Anomalie dans les LCZ où l'ICU est le plus fort (LCZ 1-4) = Centres et tissus urbains très denses)	+57%	+81%	+129%	+46%	+36%	+36%	+332%	+277%	+188%	+16%	+16%	+12%
Anomalie dans les LCZ où l'ICU est modéré (LCZ 5, 6, 8, 10) = Banlieues, centres villageois, zoning)	+46%	+19%	+48%	+24%	+17%	+14%	+150%	+128%	+96%	+10%	+9%	+9%
Anomalie moyenne dans les LCZ où il y a un ICU (LCZ 1-6, 8, 10)	+50%	+44%	+80%	+33%	+25%	+23%	+223%	+188%	+133%	+12%	+12%	+10%

La cartographie des LCZ présentée sur la Figure 3 combinée aux analyses précédentes, permet de mettre en évidence les parties du territoire wallon touchées par le phénomène d'ICU (Figure 5). Ces zones correspondent LCZ 1-6, 8, 10. Une distinction est faite entre les zones où l'ICU est le plus intense (LCZ 1-4) et les zones où l'ICU est présent mais de manière plus modérée (LCZ 5, 6, 8, 10). On observe que l'ICU est particulièrement présent dans le Sillon-Sambre-et-Meuse. La plupart des zones avec ICU ont un faciès d'ICU modéré : seuls les centres-villes des plus grandes villes Wallonnes présentent un faciès d'ICU très intense. A l'échelle communale, certaines parties du territoire communal des grandes villes restent épargnées par le phénomène d'ICU. A l'inverse, les centres villageois des communes rurales sont tout de même touchés par le phénomène d'ICU.

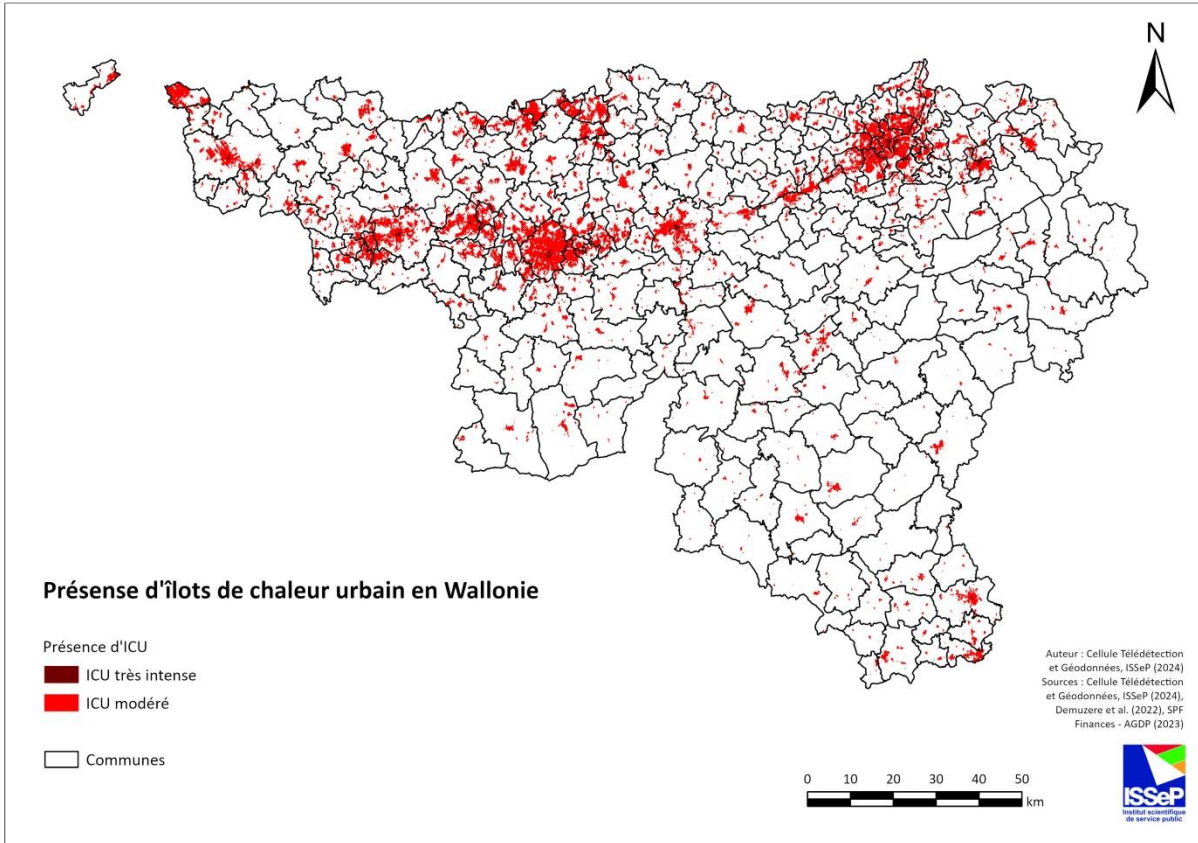


Figure 5. Parties du territoire wallon touchées par le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

La cartographie des quatre indicateurs basés sur ces statistiques par LCZ et la cartographie wallonne des LCZ (Figure 3) permet d'ajouter une dimension spatiale aux évolutions climatiques renseignées dans le Tableau 1 (Figure 6 à 9). On observe ainsi que les indicateurs sont logiquement plus élevés dans les zones d'ICU.

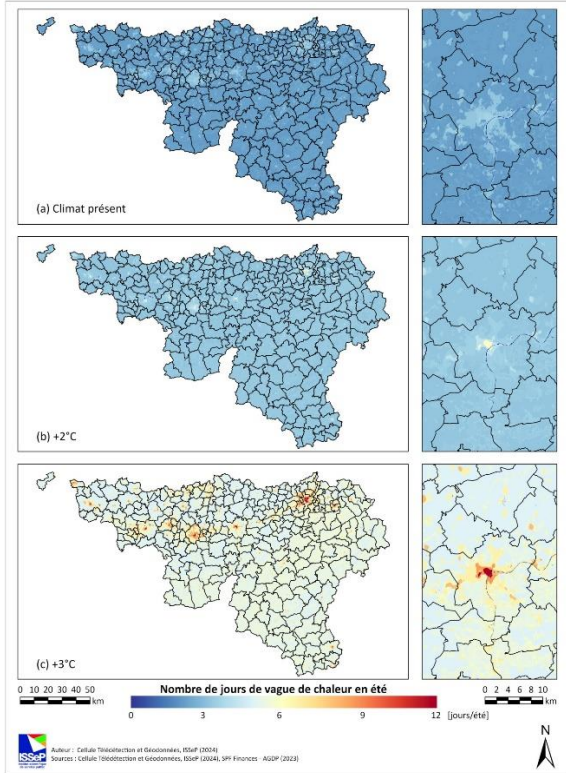


Figure 6. Cartographies wallonnes du nombre de jours de vague de chaleur en été selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

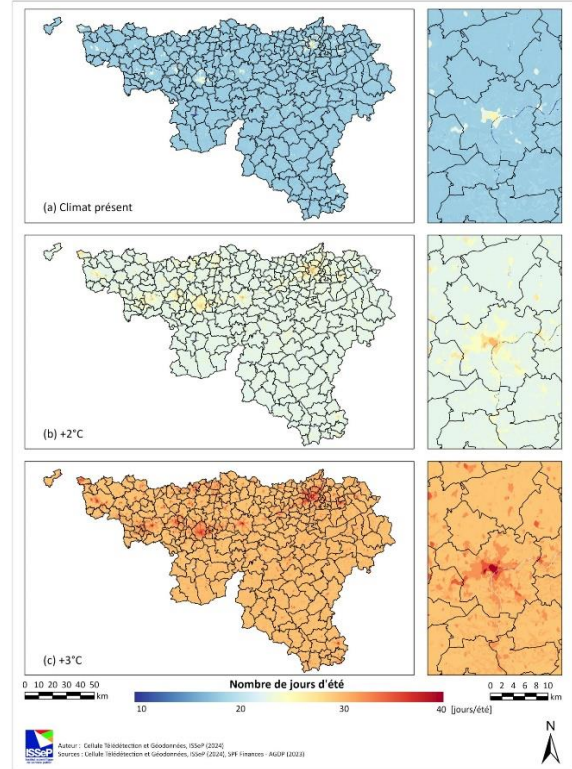


Figure 7. Cartographies wallonnes du nombre de jours d'été en été selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

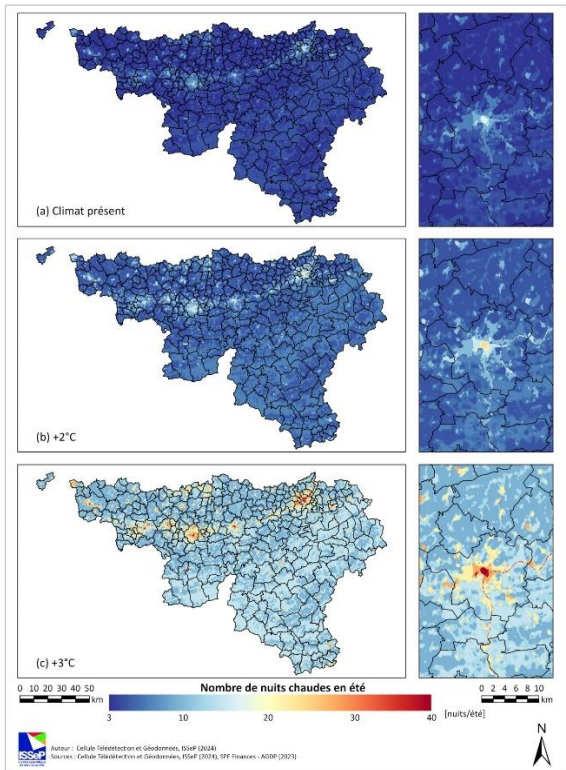


Figure 8. Cartographies wallonnes du nombre de nuits chaudes selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

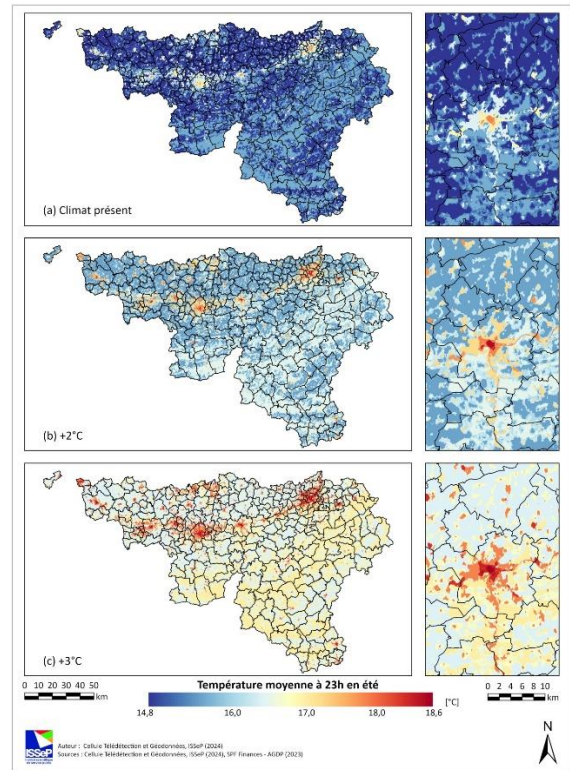


Figure 9. Cartographies wallonnes de la température moyenne à 23h en été selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

Les aléas nocturne, diurne et diurne-nocturne combiné sont présentés sur les Figures 10 à 12, tandis que la catégorie d’aléa associée à chaque LCZ pour chaque type d’aléa et de scénario est synthétisée dans le Tableau 3.

De manière globale, quel que soit le type d’aléa, on observe des aléas plus intenses dans les zones densément bâties (LCZ 1-6, 8, 10) quel que soit le scénario climatique mettant en évidence les zones avec ICU décrites précédemment.

Dans un monde à +2°C, l’ensemble de la Wallonie subira des vagues de chaleur similaires à celles observées actuellement dans les centres urbains. L’effet sur la température nocturne se fera ressentir surtout dans les centres urbains mais n’affectera pas encore les zones rurales : l’aléa nocturne s’y maintient dans la catégorie très faible.

Dans un monde à +3°C l’aléa diurne s’intensifie particulièrement dans les noyaux villageois et urbains et l’aléa nocturne s’intensifie partout en Wallonie (à un niveau similaire aux centres urbains actuels) tout en devenant particulièrement intense dans les centres urbains.

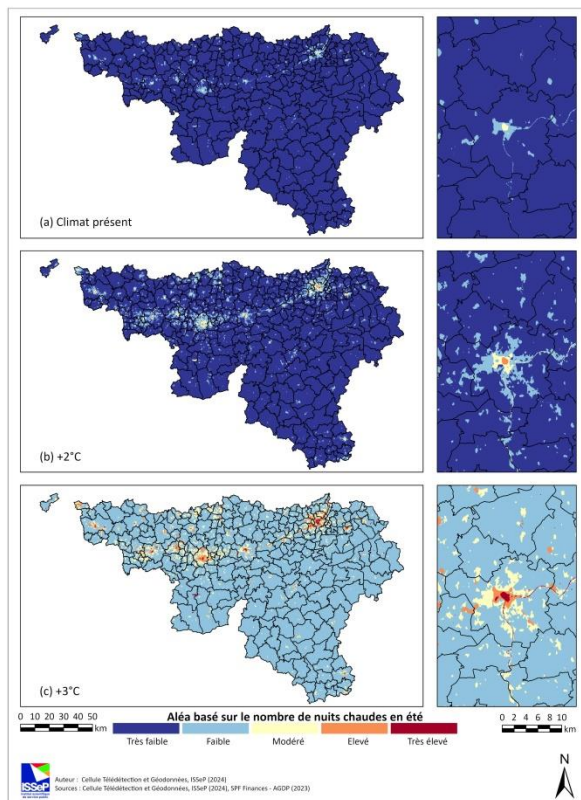


Figure 10. Cartographies de l’aléa nocturne basé sur le nombre de nuits chaudes en été selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

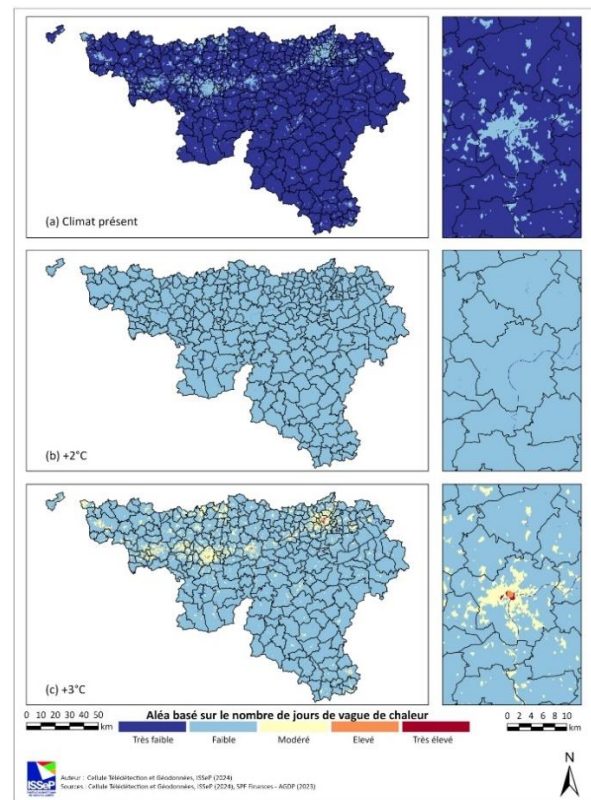


Figure 11. Cartographies de l’aléa diurne basé sur le nombre de jours de vague de chaleur en été selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

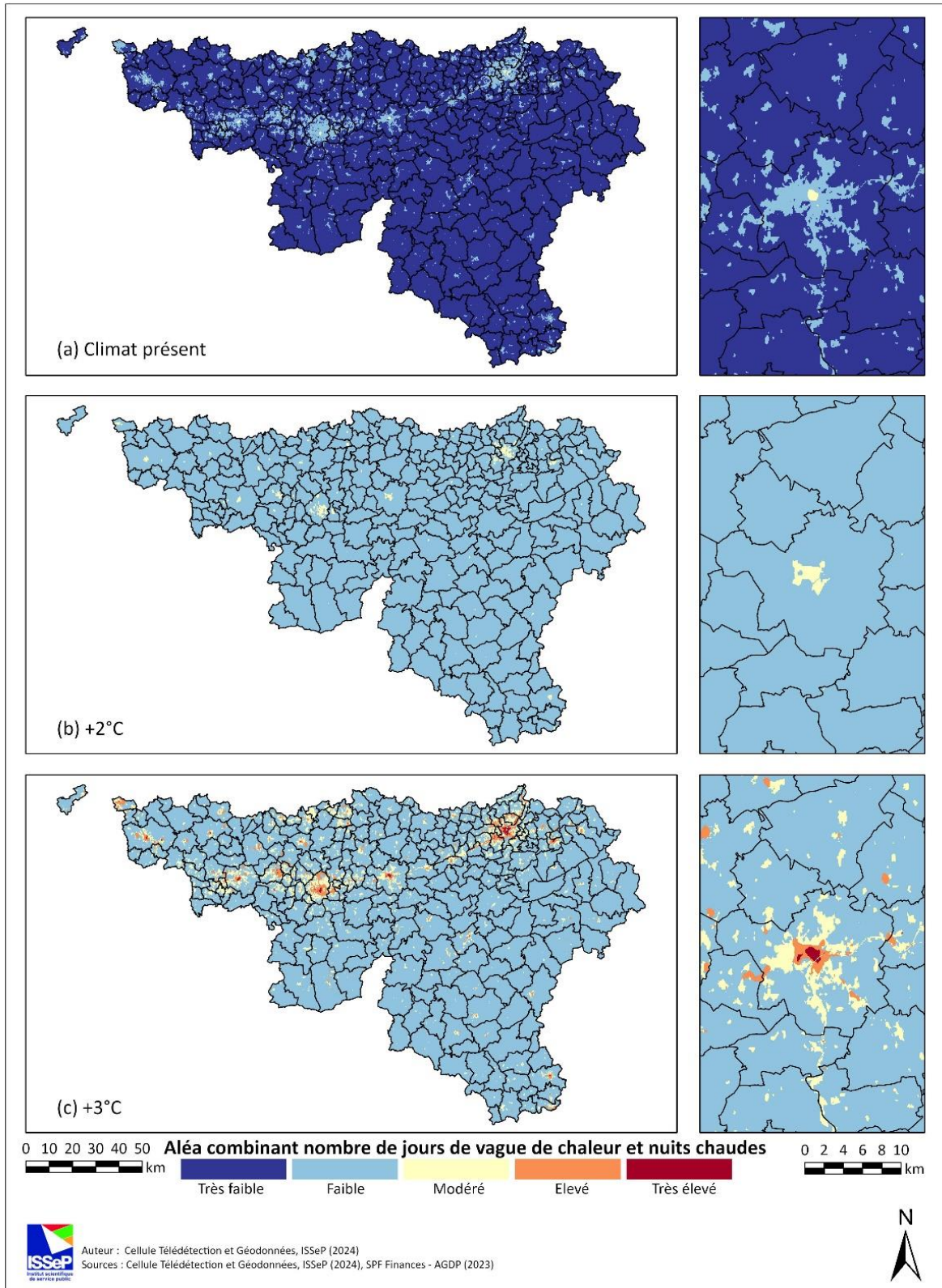
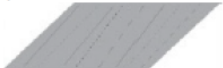

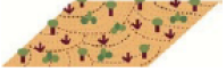



Figure 12. Cartographies de l'aléa combinant le nombre de jours de vagues de chaleur et le nombre de nuits chaudes en été (aléa combiné diurne-nocturne) selon 3 scénarios climatiques. Les figures de droite représentent des zooms centrés sur la commune de Namur.

Tableau 3. Catégorie d'aléa attribuée à chaque LCZ pour chaque type d'aléa (nocturne, diurne, nocturne-diurne combiné) et chaque scénario climatique.

	Aléa nocturne			Aléa diurne			Aléa combiné		
	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C	Présent	Futur +2°C	Futur +3°C
1. Tours compactes 									
2. Immeubles compacts 	Modéré	Elevé	Très élevé	Faible	Faible	Elevé	Modéré	Modéré	Très élevé
3. Bâtiments bas compacts 									
4. Tours espacées 	Faible	Modéré	Très élevé	Faible	Faible	Très élevé	Faible	Modéré	Très élevé
5. Immeubles espacés 	Faible	Modéré	Elevé	Faible	Faible	Modéré	Faible	Modéré	Elevé
6. Bâtiments bas espacés 	Très Faible	Faible	Modéré	Faible	Faible	Modéré	Faible	Faible	Modéré
8. Bâtiments bas de grande emprise 									
10. Industries lourdes 	Faible	Faible	Elevé	Faible	Faible	Modéré	Faible	Faible	Elevé
9. Constructions peu denses 	Très Faible	Très Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible
A. Arbres denses 	Très Faible	Très Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible
B. Arbres clairsemés 	Très Faible	Très Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible
D. Végétation basse 	Très Faible	Très Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible	Très Faible	Faible	Faible

<p>E. Sol rocailleux ou pavé</p> 	Faible	Faible	Elevé	Faible	Faible	Modéré	Faible	Faible	Elevé
<p>F. Sol nu ou sableux</p> 	Très Faible	Très Faible	Faible	Faible	Faible	Modéré	Faible	Faible	Modéré
<p>C. Buissons et broussailles</p> 									
<p>G. Eau</p> 	Faible	Modéré	Très élevé	Très Faible	Très Faible	Très Faible	Faible	Faible	Modéré

6. Discussion

6.1. Synthèse

L'utilisation de la classification des Zones Climatiques Locales (LCZ) et leur caractérisation thermique à partir de sorties du modèle climatique UrbClim ont permis de réaliser une première caractérisation robuste des îlots de chaleur urbains actuels de Wallonie à une échelle fine et d'en estimer l'évolution pour deux scénarios futurs : un monde à +2°C et un monde à +3°C de réchauffement global par rapport à l'ère préindustrielle. Les anomalies thermiques générées par le phénomène d'ICU ont pu être quantifiées. Les aléas nocturnes, diurnes et nocturne-diurne combinés ainsi que leur évolution future ont pu être cartographiés. L'échelle de travail et à laquelle les données ont été produites est de 100 m. A cette échelle, les changements de températures engendrés par le réchauffement climatique dominant ceux qui sont générés par des modifications très locales de la couverture de sol et des aménagements urbains petite ampleur. Ainsi les résultats générés pour les deux scénarios futurs sont valables pour au moins 10 ans.

Deux faciès d'ICU ont pu être mis en évidence : un faciès très intense qui se concentre dans les centres et tissus urbains très denses des plus grandes villes wallonnes, et un faciès plus modéré dans les tissus moins denses de type banlieues, centres villageois, zoning commercial et industriel. Les anomalies thermiques générées par ces ICU ont pu être calculées et montrent l'impact très fort des ICU sur les températures nocturnes : pour le climat présent, il peut y avoir 4 fois plus de nuits chaudes dans les lieux où l'ICU est le plus fort par rapport aux zones rurales où le phénomène est absent. Dans les tissus moins denses, il peut y avoir jusqu'à 2,5 fois plus de nuits chaudes par rapport aux zones sans ICU.

Les analyses montrent que les zones du territoire où le tissu urbain est dense et peu végétalisé sont les zones où les aléas vont devenir les plus importants dans des climats plus chauds. Les aléas vont devenir particulièrement intenses dans ces zones si les +3°C de réchauffement global sont atteints dans le futur. Ces zones se concentrent principalement dans le Sillon Sambre-et-Meuse. Le reste du territoire restera relativement épargné avec un aléa qui se maintient dans la catégorie « faible » que ce soit dans un monde à +2° ou à +3°C. Ces observations soulignent l'importance de maintenir le réchauffement planétaire en-dessous des +2°C, de préserver les zones non bâties et de modifier les environnements urbains (par végétalisation par exemple) pour transformer autant que possible les LCZ où les aléas sont plus élevés.

Les analyses statistiques ont également permis de quantifier l'impact des caractéristiques urbaines sur diverses variables climatiques et sur l'intensité des aléas. Ces informations s'avèrent dès lors précieuses pour orienter les stratégies d'atténuation et d'adaptation.

6.2. Zones à risques et zones d'intervention prioritaire

L'étude diagnostic, dont cette cartographie des aléas liés à la chaleur et aux ICU fait partie, a pour objectif d'identifier les zones à risques et les zones d'intervention prioritaire sur le territoire wallon.

Dans cette étude, sont considérées comme **zones à risques**, les zones soumises à des niveaux d'aléas modérés à très élevés. Leur extension géographique varie suivant le scénario climatique considéré :

- A court terme (climat présent), les zones à risques se concentrent dans les centres urbains des plus grandes villes wallonnes ;
- A moyen terme (monde à +2°C de réchauffement), les zones à risques s'étendent dans les grandes villes et commencent à gagner certaines villes de plus petites tailles ;
- A plus long terme, si les +3°C de réchauffement global sont atteints, les zones à risques s'étendraient particulièrement et gagnant aussi les noyaux villageois. Le Sillon-Sambre-et-Meuse serait particulièrement touché. Pratiquement toutes les communes auront au moins une fraction de leur territoire en zones à risques.

Il est à noter que l'échelle d'aléa est basée sur une répartition des valeurs wallonnes en cinq catégories car malheureusement il n'y avait pas de littérature pour définir des valeurs seuils.

Les **zones d'intervention prioritaire** sont à définir en fonction de la variable exposée qui intéresse l'utilisateur final, et de sa vulnérabilité si elle est disponible. Plusieurs rapports permettent ainsi d'identifier ces zones d'intervention prioritaire selon que l'on s'intéresse :

- aux risques encourus par la population (Wyard et Jacquemin, 2025) ;
- aux risques encourus par les entreprises (Fettweis, 2025) ;
- aux risques encourus par les activités touristiques (Decrop & Fanal, 2025).

6.3. Recommandations

Choix du scénario climatique

Le choix parmi les trois scénarios investigués dans cette étude (climat présent, monde à +2°C et monde à +3°C) dépend des objectifs poursuivis par les utilisateurs et leurs hypothèses de travail (Diagnostic actuel ? Se préparer au pire ? Hypothèse que les objectifs des Accords de Paris seront atteints (limiter le réchauffement planétaire à +2°C en 2100) ? etc.). Les horizons temporels au cours desquels seront atteints les différents seuils de réchauffement global (+2° et +3°C) dépendent des efforts d'atténuation qui seront déployés à l'échelle planétaire dès à présent et dans le futur. Ils sont dès lors soumis à de fortes incertitudes. Des estimations globales pour différents scénarios socio-économiques (SSP) sont disponibles dans le dernier rapport du GIEC (Figure 13 ; IPCC, 2022c).

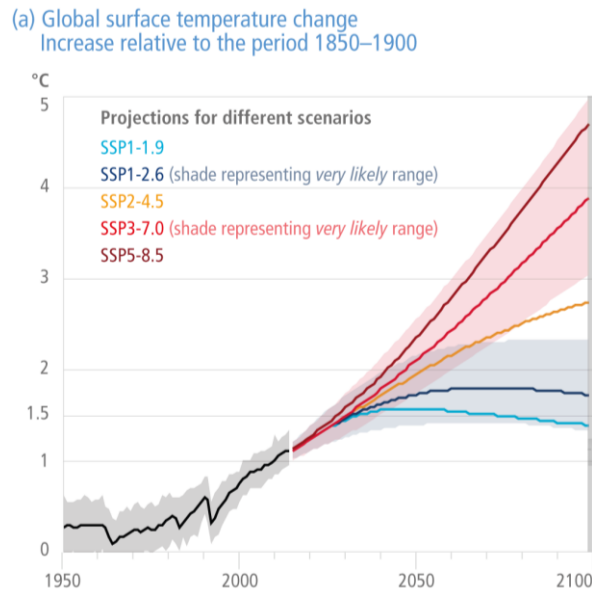


Figure 13. Impact potentiel des changements climatiques sur les températures moyennes globales pour différents scénarios socio-économiques (SSP) (Source : IPCC, 2022c).

Choix du type d'aléa

L'utilisation de l'aléa nocturne, diurne ou combiné dépend du but visé par les utilisateurs. Si l'on s'intéresse à l'impact de la chaleur sur des activités qui ont lieu en journée (ex : activité professionnelle), l'utilisation de l'aléa diurne sera privilégiée, et inversement. Par exemple, Fettweis (2025) s'est intéressé à l'impact de la chaleur sur les entreprises. Comme les travailleurs y sont présents principalement en journée, l'aléa diurne a été utilisé. Decrop & Fanal (2025) se sont quant à eux intéressés à l'impact de la chaleur sur le tourisme. Comme les activités touristiques se déroulent principalement en journée et qu'il fallait aussi tenir compte du confort thermique lors des nuitées en hébergement touristique, l'aléa combiné a été privilégié.

Utilisation des cartes

A l'échelle régionale, les cartes produites permettent de localiser les endroits du territoire wallon où des îlots de chaleur sont présents. A l'échelle communale, les cartes permettent de localiser les zones les plus chaudes. Il est recommandé de combiner ces informations avec l'ensemble des données et connaissances plus précises des communes en vue d'enrichir l'analyse. Notons l'existence des cartes de risques pour la population liées à la chaleur (Wyrd & Jacquemin, 2025), les cartes d'exposition des entreprises à la chaleur (Fettweis, 2025) et les cartes d'exposition du tourisme et du patrimoine à la chaleur (Decrop & Fanal, 2025).

6.4. Limites

L'utilisation des LCZ et de méthodes statistiques bivariées ont tendance à lisser les patterns des ICU (Richard et al., 2018). Bien que les méthodes statistiques utilisées soient robustes, il existe toujours une variabilité intra-groupe au sein des LCZ qui n'est pas capturée par l'analyse. Des variations locales spécifiques, dues à la topographie, au voisinage, aux matériaux de construction, aux activités humaines spécifiques (transport et circulation routière, activités industrielles et commerciales, utilisation de système de climatisation et de chauffage), aux caractéristiques de la végétation, peuvent en effet moduler localement les conditions thermiques au sein des mêmes LCZ.

Certains groupes LCZ, comme les groupes « 15 – Sol rocailleux ou pavé (E) » et « 16 – Sol nu ou sableux (F) », étaient faiblement représentés dans les données. Cette faible représentation limite la

capacité à tirer des conclusions définitives sur ces groupes, introduisant une incertitude dans les résultats.

L'évolution des emprises spatiales des LCZ dans le futur, dues notamment à l'urbanisation, n'est pas prise en compte dans notre analyse et constitue dès lors une source d'incertitude. La caractérisation thermique des LCZ permet toutefois de quantifier l'impact potentiel des aménagements urbains sur les indicateurs thermiques utilisés dans cette étude. Toutefois, à une échelle de 100 m, les changements de températures engendrés par le réchauffement climatique dominant ceux qui sont générés par des modifications très locales de la couverture de sol et des aménagements urbains petite ampleur.

6.5. Perspectives d'améliorations

Pour améliorer la représentativité des analyses, il est recommandé de collecter davantage de données pour les groupes LCZ faiblement représentés. Un échantillonnage plus large permettrait de réduire l'incertitude et d'obtenir des conclusions plus robustes pour ces groupes.

Il serait bénéfique de compléter l'analyse LCZ par des études plus locales, tenant compte des microclimats et des particularités locales qui peuvent influencer les conditions thermiques. Cela pourrait inclure l'analyse de la végétation, des matériaux de construction, et des activités humaines spécifiques.

L'utilisation de modèle plus complexes, comme les modèles de climat urbain (e.g. Broeckx et al., 2023), les régressions linéaires multiples ou le machine learning (e.g. Alonso & Renard, 2020 ; Oukawa et al., 2022) permettrait de mieux prendre en compte l'impact des caractéristiques locales sur les variations thermiques et les interactions complexes entre les LCZ.

L'introduction de scénarios d'évolution des LCZ permettrait de prendre en compte l'évolution potentielle du bâti dans les scénarios futurs.

7. Annexes

7.1. Synthèses des groupes de travail

Sélection des scénarios climatiques d'UrbClim compatibles avec les scénarios du MAR

Une discussion a eu lieu avec Xavier Fettweis et Manu Harchies (29/02-01/03/2024) afin de déterminer quels scénarios futurs d'UrbClim utiliser, ces derniers étant différents de ceux utilisés par MAR. Nous avons choisi les scénarios et les horizons temporels qui permettaient de se rapprocher le plus de ceux du MAR. Nous sommes ainsi parvenus à trouver une correspondance pour simuler le climat des villes dans des mondes à +2°C et +3°C.

Partage des données d'aléas

L'aléa diurne a été partagé à Reginald Fettweis pour son travail sur la vulnérabilité des entreprises (19/08/2024).

L'aléa combiné a été partagé à Julian Jacquemin pour son travail sur la vulnérabilité des logements à la chaleur (29/08/2024).

L'aléa combiné a été partagé à Aurore Fanal pour son travail sur le tourisme (17/09/2024).

Groupe de travail avec les utilisateurs finaux

Deux matinées d'échanges avec les utilisateurs finaux ont été organisées les 14 et 15 janvier 2025. Le but était de leur présenter les résultats finaux de la cartographie des aléas liés à la chaleur (Wyrd, 2025 (présent rapport)) et de l'évaluation des risques qui en découlent (Wyrd & Jacquemin, 2025), de répondre à leurs questions et de recueillir leur feedback. 60 personnes étaient présentes : 31 acteurs communaux et 29 acteurs transversaux.

Les utilisateurs ont bien accueilli les résultats qui leur ont été présentés soulignant leur potentiel comme outil de sensibilisation et comme base de travail pour l'élaboration des schémas de développement communal (SDC). Les questions des utilisateurs se sont essentiellement focalisées sur 4 aspects : la méthodologie, la mise à jour des données, l'utilisation pratique des résultats et le besoin de recommandations opérationnelles en terme d'adaptation :

- a) **Méthodologie** : Les utilisateurs ont posé des questions concernant les données qui ont été utilisées pour la cartographie des ICU, leur qualité, si la présence de végétation est prise en compte. Comment sont gérés les secteurs statistiques avec peu ou pas de population.
 - L'équipe a pu préciser que toutes ces informations étaient bien détaillées dans les deux rapports méthodologiques relatifs aux ICU (Wyrd, 2025 ; Wyrd & Jacquemin, 2025).
- b) **Mise à jour des données** : Les utilisateurs se demandent comment les données seront mises à jour notamment en vue de prendre en compte les aménagements futurs.
 - L'équipe a pu préciser que les résultats de l'étude étaient au moins valables pour les 10 prochaines années. En effet, étant donné notre échelle de travail de 100 m, c'est le signal du réchauffement qui domine par rapport aux aménagements locaux (construction, plantation d'arbres).
- c) **Utilisation pratique des données** :
 - **Résolution spatiale des résultats** : Les utilisateurs ont confirmé que l'échelle de 100 m est une bonne base de travail notamment pour les SDC. Toutefois, l'échelle du secteur statistique est moins pratique.
 - Les données d'exposition et de risque sont en effet fournies à l'échelle du secteur statistique. Cette échelle permet déjà d'identifier les quartiers prioritaires. Ensuite, les données d'aléas fournies à 100 m permettent d'affiner l'analyse. Ces données peuvent

être croisées avec l'ensemble des données et les connaissances plus précises des communes.

- **Scénarios climatiques futurs** : Les utilisateurs ont demandé des précisions sur les scénarios futurs à +2°C et +3°C inclus dans l'étude. Ils se sont interrogés sur le scénario à privilégier pour la planification urbaine, notamment dans le cadre d'élaboration des SDC ; et sur l'horizon temporel probable pour atteindre ces niveaux de réchauffement.
 - L'équipe a pu préciser que toutes les trajectoires pourront être comparées car elles seront disponibles sur WalOnMap. Les horizons temporels dépendent des efforts d'atténuation qui seront fournis à l'avenir et sont donc soumis à de fortes incertitudes. Des estimations globales pour différents scénarios sont disponibles dans le dernier rapport du GIEC.
 - **Durée de validité des résultats** : Cette question rejoint celle de la mise à jour des données (voir point b)).
 - **Prise en compte de l'évolution socio-démographique future de la Wallonie** : Les utilisateurs se demandent quelle sera l'évolution socio-démographique future de la Wallonie et comment en tenir compte.
 - L'équipe a confirmé que l'approche développée dans cette étude est conservatrice concernant l'exposition et la vulnérabilité. Le vieillissement de la population qui est prévu devrait avoir un impact négatif sur la vulnérabilité de la population Wallonne et donc le risque.
- b) **Besoin de recommandation en termes d'adaptation** : Les utilisateurs ont fait part de leur besoin de guides opérationnels liés à l'adaptation du territoire à la chaleur, et aux aléas climatiques en général, en vue d'intégrer cette dimension climatique dans leur schéma de développement communal et leur guide communal d'urbanisme, ces derniers permettent en effet d'ancrer les bonnes pratiques au niveau local. L'accent a été mis sur le besoin d'information concernant l'adaptation des logements existants et des nouvelles constructions, et la formation des différents acteurs du territoire (dont les architectes).
- L'équipe va relayer ce besoin auprès des personnes en charge du Volet 4 de cette étude qui traite de l'adaptation.

Les rapports méthodologiques, en particulier leur section "Discussion", ont été modifiés de manière à souligner ces éléments.

8. Références

ADULM (2022). Atlas des îlots de chaleur de la métropole lilloise. 32 p. https://www.adu-lille-metropole.org/wp-content/uploads/2022/11/Atlas-des-ICU_ADULM.pdf (accès le 26/10/2023)

Alonso, L., & Renard, F. (2020). A new approach for understanding urban microclimate by integrating complementary predictors at different scales in regression and machine learning models. *Remote Sensing*, 12(15), 2434. <https://doi.org/10.3390/rs12152434>

Broeckx, S., Lefebvre, F., Lauwaet, D., Beckx, C., Verachtert, E., Wolfs, V., Schoeters, K., Cauwenberg, P., Hilgersom, K., Gabriëls, K., Vaes, G., Lemeire, E., Raman, M. (2023). Uitbreiding van het Klimaatportaal-Vlaanderen met klimaatadaptatietools Methodologische beschrijving. VITO. https://www.vmm.be/publicaties/rapport_klimaatadaptatietools_methodologisch_tw.pdf (accès le 06/10/2023)

Climate Analytics, 2022. PROVIDE Climate Risk Dashboard. Available at: <https://climate-risk-dashboard.climateanalytics.org/>

De Ridder, K., Lauwaet, D., & Maiheu, B. (2015a). UrbClim – A fast urban boundary layer climate model, *Urban Climate*. *Urban Climate*, 12, 21-48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001>

De Ridder, K., B. Maiheu, H. Wouters, N. van Lipzig, 2015b. Indicateurs van het stedelijk hitte-eiland in Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van MIRA, Milieurapport Vlaanderen, MIRA/2015/05, 147 pp. Available at <http://www.milieurapport.be/>

De Ridder, K., Couderé, K., Depoorter, M., Liekens, I., Pourria, X., Steinmets, D., Vanuytrecht, E., Verhaegen, K., Wouters, H. (2020). Evaluation of the socio-economic impact of climate change in Belgium. Study commissioned by the national climate commission (2020/RMA/R/2271).

Decrop, A. & Fanal, A. (2025). Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l’adaptation aux changements climatiques – Tourisme et Patrimoine. Rapport méthodologique.

Demoury, C., Aerts, R., Vandeninden, B., Van Schaeybroeck, B., & De Clercq, E. M. (2022). Impact of Short-Term Exposure to Extreme Temperatures on Mortality: A Multi-City Study in Belgium. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 3763. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19073763>

Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., & Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8), 3835–3873. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>

Estoque, R.C., Ooba, M., Seposo, X.T. et al. Heat health risk assessment in Philippine cities using remotely sensed data and social-ecological indicators. *Nat Commun* 11, 1581 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15218-8>

Fettweis, R. (2025). Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l’adaptation aux changements climatiques – Vulnérabilité des entreprises aux risques d’îlots de chaleur urbains. Rapport méthodologique.

Gallardo, L., Hamdi, R., Islam, A. K. M. S., Klaus, I., Klimont, Z., Krishnaswamy, J., Pinto, I., Otto, F., Raghavan, K., Revi, A., Sörensson, A. A., & Szopa, S. (2022). What the latest physical science of climate change means for cities and urban areas. Indian Institute for Human Settlements. <https://doi.org/10.24943/SUPSV108.2022>

Hooyberghs, H., 2018. Kwetsbaarheidsanalyse in het kader van het Warmteplan Vlaanderen. Studie uitgevoerd in opdracht van 2018/UnitRMA/R. Communication personnelle

Hooyberghs, H., Berckmans, J., Lauwaet, D., Lefebvre, F., De Ridder, K., (2019): Climate variables for cities in Europe from 2008 to 2017. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.c6459d3a>

IPCC, 2022a. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

IPCC, 2022b. Glossary GT2. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group 2 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf

IPCC, 2022c: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Kazmierczak, A., 2015. Mapping flood disadvantage in Scotland 2015 Final report for the Scottish Government. <https://www.gov.scot/publications/mapping-flood-disadvantage-scotland-2015-main-report/>

Lamarque P., Tondeur A., Marbaix P., Gaino B., van Ypersele J.P. (2022). L'adaptation aux changements climatiques en Wallonie : synthèse et points d'attention pour l'actualisation des connaissances. Plateforme wallonne pour le GIEC. https://plateforme-wallonne-giec.be/assets/documents/Adaptation/PwG-SyntheseAdaptation_2022_complet_rev1.pdf

Lauwaet, D., Berckmans, J., Hooyberghs, H., Wouters, H., Driesen, G., Lefebvre, F., & De Ridder, K. (2023). High Resolution Modelling of the Urban Heat Island of 100 European Cities. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4406167>

Loozen, Y., & Habran, S., (2025). Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques - Indicateur de vulnérabilité sociale. Rapport méthodologique.

Oukawa, G. Y., Krecl, P., & Targino, A. C. (2022). Fine-scale modeling of the urban heat island: A comparison of multiple linear regression and random forest approaches. *Science of the total environment*, 815, 152836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152836>

Richard, Y., Emery, J., Dudek, J., Pergaud, J., Chateau-Smith, C., Zito, S., Rega, M., Vairet, T., Castel, T., Thévenin, T., & Pohl, B. (2018). How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban climate*, 26, 258-274. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.002>

Stewart, I.D., & Oke, T.R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull Am Meteorol Soc.* 93(12), 1879-1900. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Van de Vel, K., Vandengerghe, D., Bruffaets, N., De Clercq, E., De Ridder, K., Devleeschauwer, B., Koppen, G., Vanuytrecht, E., Willen, P. (2021). Impact of climate change on the healthcare system in Belgium. Study commissioned by the federal

WMO (2015). Vagues de chaleur et santé : guide pour l'élaboration de systèmes.

Wyard, C. (2025). Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques - Villes : Cartographie des aléas liés à la chaleur et aux îlots de chaleur urbains. Rapport méthodologique, 33 p.

Wyard, C. & Jacquemin, J. (2025). Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques - Villes : Risques liés à la chaleur et aux îlots de chaleur urbains. Rapport méthodologique.



Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable asbl

Boulevard Frère Orban 4

B-5000 NAMUR

00 32 81 25 04 80

www.icedd.be

icedd@icedd.be

N° registre de commerce : sans objet

N° TVA : BE0407.573.214

Représenté par : Gauthier Keutgen, Secrétaire Général

N° de compte bancaire : BE59 5230 4208 3426 / BIC TRIOBEBB