HAL
open science

Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy.

F Leconte

To cite this version:

F Leconte. Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy.. Climatologie. Université de Lorraine, 2014. Français. NNT : 2014LORR0255 . tel-01751281v2

HAL Id: tel-01751281

https://theses.hal.science/tel-01751281v2

Submitted on 12 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Lorraine
École Doctorale Ressources Procédés Produits Environnement
Collegium Sciences et Technologies

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité : Science du Bois et des Fibres

François LECONTE

Caractérisation des îlots de chaleur urbains par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy

Rapporteurs :	Marjorie Musy	Ingénieur de Recherche, Laboratoire Cerma, Nantes
	Valéry Masson	ICPEF Chercheur, Laboratoire CNRM-GAME, Toulouse
Examinateurs :	Christiane Weber	Directeur de Recherche, Laboratoire LIVE, Strasbourg
	Céline Phillips	Ingénieur, ADEME, Valbonne
	Gérard Hégron	Directeur de Recherche, IFSTTAR, Nantes
Directeur de thèse :	Mathieu Pétrissans	Professeur, Laboratoire Lermab, Nancy
Encadrants de thèse :	Julien Bouyer	Chargé de recherche, CEREMA Direction Territoriale Est, Nancy
	Rémy Claverie	Chargé de recherche, CEREMA Direction Territoriale Est, Nancy

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)
Laboratoire d'Études et de Recherche sur le MAteriau Bois (LERMAB)
Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (Cerema)

Remerciements

En guise d'avant propos, je tiens à remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie M. Gérard Hégron de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse, et de le présider. Merci à Mme. Marjorie Musy et M. Valéry Masson pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, et pour leur lecture attentive du manuscrit. Mes remerciements s'adressent également à Mme. Christiane Weber et Mme. Céline Phillips, qui ont accepté de participer à mon jury de thèse.

Je remercie chaleureusement Mathieu Pétrissans, mon directeur de thèse, pour la pertinence de ses remarques et pour l'attention qu'il a porté au suivi de cette thèse. Je remercie également Julien Bouyer et Rémi Claverie, tous deux co-encadrants de cette thèse, pour leur disponibilité et la qualité de leurs conseils tout au long de cette thèse. Nos nombreuses discussions scientifiques ont constitué une aide précieuse et ont grandement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Je remercie les membres de l'équipe ICE, passés et présents (Ethel, Ivana, Stephanie, Fatiha, Emmanuelle, Laurent, Guillaume, Mario, Stéphane, Patrick), pour leur accueil et leur gentillesse, ainsi que l'ensemble des membres de la Direction Territoriale Est du Cerema (ex-CETE de l'Est) et du laboratoire LERMAB. Merci à Mathieu et Stéphane, qui ont été mes (co)pilotes durant ces jours et ces nuits passés à sillonner Nancy. Merci également aux camarades doctorants du laboratoire (Abderrahmen, Rémi, Ryad) ainsi qu'aux stagiaires (Charles, Lijie, Clément, Philippe, Nathalie) pour leur bonne humeur communicative.

Je souhaite remercier plus largement celles et ceux qui m'ont accompagné pendant ces trois années, ami-e-s de Nancy et d'ailleurs. Je remercie particulièrement mes parents, mes sœurs, et Rocio pour leurs encouragements et leur soutien.

Résumé

Le quatrième rapport d'avancement du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) indique que les villes européennes seront impactées par des modifications climatiques au cours du XXIième siècle, avec notamment avec des épisodes caniculaires plus fréquents et plus intenses. L'îlot de chaleur urbain (ICU), défini comme l'anomalie positive de température d'air existant entre le centre d'une agglomération et les zones rurales environnantes, peut accentuer l'impact néfaste des canicules en matière d'inconfort thermique extérieur voire de risque sanitaire, et de charge de refroidissement des bâtiments.

Afin de répondre au défi de l'adaptation au changement climatique, les aménageurs ont principalement accès à une information qualitative présentée sous forme de recommandations et de bonnes pratiques. La plupart des modèles numériques existants, de plus en plus performants, requièrent des connaissances et des compétences en climatologie urbaine pour les mettre en œuvre et analyser leurs sorties. Dans ce contexte, il est nécessaire de proposer aux aménageurs de nouvelles approches, produisant une information adaptée pour évaluer quantitativement l'impact climatique de différentes propositions d'aménagement.

Cette thèse avait pour objectif d'étudier la faisabilité du développement d'un modèle de diagnostic climatique mobilisable pour les phases de planification urbaine. Le travail a consisté à caractériser le phénomène d'ICU à partir de mesures mobiles à haute résolution spatiale dans la canopée urbaine sur l'agglomération de Nancy.

Dans le but de structurer spatialement l'analyse du climat urbain, une classification climatique ("Local Climate Zone", "LCZ") a tout d'abord été appliquée. L'objectif de cette classification est de construire des zones homogènes à la fois du point de vue climatique et du point de vue des caractéristiques urbaines. Au sein d'un échantillon réduit de treize zones, sept indicateurs urbains, relatifs à la morphologie

urbaine et à l'occupation du sol, ont été calculés. Ces indicateurs ont permis d'établir des correspondances entre les fragments urbains de l'échantillon et les différentes typologies de la classification LCZ.

Par la suite, plusieurs séries de mesures mobiles ont été effectuées en période estivale à l'aide d'un véhicule instrumenté, afin d'observer in situ les spécificités climatiques des LCZ recensées dans l'agglomération. L'analyse individuelle des zones climatiques a révélé que celles-ci sont relativement homogènes du point de vue thermique, particulièrement en période nocturne. La comparaison de l'ensemble des comportements thermiques a indiqué que les différences de température d'air entre LCZ sont significatives en période nocturne. L'étude du cycle journalier de température a permis d'observer que les LCZ présentent des températures d'air proches pendant la matinée et la majeure partie de l'après midi, et connaissent un refroidissement nocturne selon deux phases successives. Dans le but de comparer la dynamique de rafraîchissement nocturne sur plusieurs jours, un indicateur climatique a été proposé, puis mis en relation avec les indicateurs urbains calculés.

L'association de la classification LCZ et de mesures mobiles a rendu possible l'analyse détaillée de l'ICU à différentes échelles spatiales. Cette approche "simplifiée" et pédagogique est en mesure de fournir une information quantitative, et peut de ce fait servir de base au développement d'un outil opérationnel de prise en compte du climat local à l'étape de conception du projet urbain.

Abstract

The IPCC fourth assessment report indicates that European cities will be affected by climate changes throughout the 21st century, including heat waves growing more frequent and more intense. The urban heat island (UHI), which is the positive air temperature difference between the city center and the rural areas nearby, can strengthen the negative impact of heat waves in terms of thermal urban comfort, public health and cooling demand of buildings.

In order to tackle the issue of climate change adaptation, qualitative information is already available for urban planners. However, most of the existing numerical models require skills and knowledge in urban climatology in order to use them and to analyze their output. Therefore, it is necessary to define new approaches and to produce information in order to evaluate quantitatively the climatic impact of different urban planning proposals.

This thesis targeted to study the development possibilities of a climate assessment model designed for urban planning purpose. This work aimed to characterize the UHI phenomenon using high spatial resolution mobile measurements in the urban canopy, performed in the conurbation of Nancy.

In order to spatially organize the urban climate analysis, a climatic classification ("Local Climate Zone", "LCZ") has been applied. The objective of this scheme is to build homogeneous zones in terms of climatic behaviour and urban properties. Within a sample of thirteen zones, seven urban indicators – related to urban morphology and land use – have been calculated. These indicators helped to draw connections between urban areas and LCZ types from the classification.

Several mobile measurements campaigns have been performed in the summertime using an instrumented vehicle, in order to observe the climatic patterns of LCZ. The individual analysis has shown homogeneous temperatures within each zone, while the

comparison between the zones has highlighted that there are significant air temperature differences during the nighttime. The study of the daily temperature cycle has shown that LCZ behave similarly in the morning and the beginning of the afternoon, and demonstrate a two-phases cooling period during the night. In order to compare the nighttime cooling dynamic over several days, a climatic indicator has been created and correlated with the calculated urban indicators.

The combination of LCZ classification and mobile measurements has allowed a detailed analysis of the UHI at various spatial scales. This simplified approach can provide quantitative data, and therefore can be used to develop a new decision-support tool adapted to the urban planners needs.

Table des matières

Liste des figures **xiii**

Liste des tableaux **xxiii**

Nomenclature **xxvii**

Introduction générale **1**

1 Phénomènes et méthodes d'investigation en climatologie urbaine **5**

1.1 Introduction 5

1.2 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain 5

1.2.1 Propriétés de la couche limite atmosphérique 5

1.2.2 Définition 8

1.2.3 Facteurs de contrôle 10

1.2.4 Bilan énergétique d'une surface urbaine 11

1.2.5 Causes de l'îlot de chaleur urbain 14

1.2.6 Processus dynamique de formation de l'îlot de chaleur urbain . . 23

1.3 Modèles de simulation du climat urbain 24

1.3.1 Échelles microclimatique et locale 25

1.3.2 Échelles locale et mésoclimatique 26

1.3.3 Synthèse 34

1.4 Méthodes d'observation 35

1.4.1 Mesures de l'îlot de chaleur urbain de surface 35

1.4.2 Mesures de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique 35

1.4.3 Mesures du bilan énergétique urbaine 41

1.4.4 Synthèse 42

1.5 Méthodes de zonage climatique urbain 43

1.5.1 Approches conceptuelles 43
1.5.2 Local Climate Zone 46
1.6 Objectifs, hypothèses et méthodologie 52

2 Application de la classification climatique Local Climate Zone à l'agglomération de Nancy 55
2.1 Introduction 55
2.2 Méthodologie de construction de Local Climate Zone 56
2.2.1 Contexte géographique 56
2.2.2 Détermination des Local Climate Zone 56
2.2.3 Sites de contrôle 61
2.3 Résultats sur le terrain d'étude 63
2.3.1 Cartographie préliminaire sur l'agglomération 63
2.3.2 Construction complète de l'échantillon d'étude 68
2.4 Discussion 89
2.5 Conclusion 91

3 Validation de la classification Local Climate Zone 95
3.1 Introduction 95
3.2 Moyens instrumentaux 96
3.2.1 Dispositif de mesures embarquées 96
3.2.2 Facteurs d'influence en mesure embarquée 96
3.2.3 Résultats et analyse 100
3.3 Protocole de mesures mobiles 103
3.3.1 Itinéraires de mesures 103
3.3.2 Conditions expérimentales 105
3.4 Méthodes de traitement des données expérimentales 106
3.4.1 Traitement des mesures en zone mitoyenne de deux LCZ 106
3.4.2 Traitement des relevés réalisés à faible vitesse et à l'arrêt 107
3.4.3 Correction temporelle de la température d'air 109
3.4.4 Définition des variables d'analyse de la température d'air 111
3.5 Comportements thermiques intra-LCZ 113
3.5.1 Amplitude de température d'air 113
3.5.2 Distribution spatiale de température d'air 116

3.5.3 Sites de contrôle 124
3.6 Discussion 128
3.7 Conclusion 131

4 Quantification et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Nancy 135
4.1 Introduction 135
4.2 Variabilités thermiques inter-LCZ 136
4.2.1 Dynamique thermique journalière 136
4.2.2 Confrontation aux études antérieures 142
4.3 Dynamique thermique intra-LCZ 146
4.3.1 Protocole de mesures mobiles 146
4.3.2 Résultats 147
4.4 Cartographie climatique de l'agglomération de Nancy 149
4.4.1 Influence de la position relative des LCZ 149
4.4.2 Extrapolation à l'ensemble de l'agglomération 152
4.5 Influence des conditions météorologiques 154
4.5.1 Influence de la direction du vent 154
4.5.2 Influence de la vitesse du vent 159
4.5.3 Influence de la nébulosité 163
4.6 Discussion 166
4.7 Conclusion 166

5 Processus de rafraîchissement des LCZ et indicateurs urbains : vers une modélisation 169
5.1 Introduction 169
5.2 Indicateur climatique de rafraîchissement 169
5.2.1 Définition du taux de rafraîchissement 169
5.2.2 Taux de rafraîchissement journalier normalisé 175
5.3 Corrélation entre taux de rafraîchissement normalisé et indicateurs urbains 178
5.3.1 Approche statistique 178
5.3.2 Relation multi-LCZ 181
5.3.3 Relation par type de LCZ 188
5.4 Discussion 188
5.5 Conclusion 190

Conclusion générale **193**

Synthèse 193

Discussion et perspectives 195

Bibliographie **203**

A Description des 17 types de LCZ **217**

B Relevés effectués à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy et à Coincourt **235**

C Récapitulatif des sessions de mesure en périodes diurne et nocturne **239**

Liste des figures

1.1 Imbrication des échelles spatiales de la climatologie urbaine ([Bouyer, 2009], adapté de [Oke, 2004]). 6
1.2 Profil horizontal d'un îlot de chaleur urbain [Claverie *et al.*, 2011]. 9
1.3 Cycle journalier de l'îlot de chaleur urbain [Oke, 1987]. (a) Température d'air en zone urbaine et en zone rurale. (b) Taux de rafraîchissement en zone urbaine et en zone rurale. (c) Différence de température d'air entre une zone urbaine et une zone rurale, correspondant à l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain. 10
1.4 Représentation des termes présents dans l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de [Oke, 1987]). 12
1.5 Illustration du phénomène de piégeage radiatif dans le cas d'une rue canyon ([Ringenbach, 2004], adapté de [Estournel, 1982]). 15
1.6 Représentation de profils de vent verticaux en zone urbaine et en zone dégagée [Plate et Kiefer, 2001]. 17
1.7 Illustration du concept de zone source en milieu urbain [Stewart, 2011]. . 37
1.8 Application de l'approche dite de "Division logique du territoire" pour la création de sous-classes hypothétiques. Les territoires sont classés selon quatre paramètres utilisés successivement, à savoir le type d'objet présent dans la zone, la hauteur de ces objets, la densité spatiale de ces objets dans la zone et le caractère perméable ou imperméable des surfaces situées dans la zone [Stewart, 2011]. 47
1.9 Présentation des 17 types de LCZ existants. Il existe 10 types de LCZ urbanisés et 7 types de LCZ non urbanisés. Lors de l'identification, il est possible d'ajouter un indice pour préciser une propriété concernant les bâtiments ou l'occupation du sol [Stewart, 2011]. 48

1.10 Structure d'un type de LCZ [Stewart, 2011]. 49
1.11 Expression de l'amplitude de l'ICU comme l'écart de température entre deux LCZ. Trois sessions de mesure sont représentées dans trois agglomérations différentes. Les écarts prennent pour référence la LCZ dont le numéro est le plus faible (Compact highrise, Compact midrise ou Compact lowrise) [Stewart, 2011]. 51

2.1 (a) Localisation de l'agglomération de Nancy. (b) Agglomération de Nancy (échelle 1 :75000). (c) Courbes de niveau au pas de 1 mètre pour l'agglomération de Nancy (échelle 1 :75000). 57
2.2 Exemple de visualisation des contours et de la hauteur des bâtiments (source : IGN). 58
2.3 (a) Valeurs de facteur de vue du ciel (SAGA GIS / QGIS). (b) Surface urbaine prise en compte dans le calcul du facteur de vue du ciel à l'échelle de la LCZ (colorisée en violet) (SAGA GIS / QGIS). 59
2.4 Exemple de détermination des fractions de surface perméable et imperméable. Les surfaces bâties sont colorisées en bleu, les surfaces perméables en vert et les surfaces imperméables en rouge. 61
2.5 Cartographie préliminaire des LCZ pour l'agglomération de Nancy. . . . 64
2.6 Exemple de construction d'un site de contrôle. La zone bleue représente le site de contrôle et la partie mauve correspond à la zone de calcul des indicateurs urbains. 68
2.7 (a) Vue aérienne de la LCZ CE1 et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour CE1. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 71
2.8 (a) Vue aérienne de la LCZ CE3 et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour CE3. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 72
2.9 (a) Vue aérienne de la LCZ OUE et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour OUE. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 73

2.10 (a) Vue aérienne de la LCZ CEN et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour CEN. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 74
2.11 (a) Vue aérienne de la LCZ TRM et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour TRM. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 75
2.12 (a) Vue aérienne de la LCZ NAT et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour NAT. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 76
2.13 (a) Vue aérienne de la LCZ THL et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour THL. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 77
2.14 (a) Vue aérienne de la LCZ SMA et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour SMA. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 78
2.15 (a) Vue aérienne de la LCZ PVE et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour PVE. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 80
2.16 (a) Vue aérienne de la LCZ MBR et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour MBR. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 81
2.17 (a) Vue aérienne de la LCZ JAR et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour JAR. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 83
2.18 (a) Vue aérienne de la LCZ SEI et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour SEI. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 84
2.19 (a) Vue aérienne de la LCZ PUL et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour PUL. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2. 85

2.20 (a) Ensemble de valeurs prises en compte pour le calcul du SVF à l'échelle de la LCZ JAR (colorisées en bleu). Le cadre rouge représente les dimensions de la figure (b). (b) Portions de rues prises en compte pour le calcul du SVF au niveau des deux sites de contrôle de la LCZ JAR (colorisées en rouge). 89

3.1 (a) Véhicule instrumenté. (b) Boîtier à effet hélicoïde et système de ventilation. 96

3.2 Photographies prises au niveau des quatre points cardinaux pour l'aérodrome d'Essey-lès-Nancy. (a) vue Ouest. (b) vue Nord. (c) vue Est. (d) vue Sud. (e) Vue aérienne du site de mesure (Lat/Long : 48°41′ N 6°13′ E). 98

3.3 Photographies prises au niveau des quatre points cardinaux pour Coincourt. (a) vue Ouest. (b) vue Nord. (c) vue Est. (d) vue Sud. (e) Vue aérienne du site de mesure (Lat/Long : 48°42′ N 6°36′ E). 99

3.4 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 12 mars 2012 en période diurne à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon. 101

3.5 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 27 mars 2012 en période diurne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon. 102

3.6 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 27 mars 2012 en période nocturne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon. 102

3.7 Itinéraires de mesures dans les LCZ en période diurne et nocturne. Le temps de parcours est d'environ 2h30 dans les deux cas. Les points de départ et d'arrivée sont signalés par le marqueur rouge. (a) six LCZ étudiées en 2012. (b) treize LCZ étudiées en 2013. 104

3.8 Exemple de traitement des mesures en zone mitoyenne entre deux LCZ. Les points verts sont les points conservés, les points rouges sont les points écartés. La zone non prise en compte correspond à une bande d'environ 40 m de large. 107
3.9 (a) Profils de température d'air correspondant à l'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1} pour la LCZ OUE. (b) Localisation des points écartés lors de l'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1} pour la LCZ OUE. En vert, l'ensemble des points de mesures. En orange, les points de mesures conservés après l'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1}. . . 108
3.10 Exemple de correction temporelle de température d'air pour une température de référence située au début de la session. Le profil de température brute est en rouge, le profil de température corrigé est en vert. 111
3.11 Amplitude de température d'air $\Delta T_{air,p}$ pour les 13 LCZ étudiées. Les triangles rouges correspondent aux trajets effectués en 2012, et les ronds bleus correspondent aux trajets réalisés en 2013. (a) Période diurne. (b) Période nocturne. 114
3.12 Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air $\overline{\delta T_{air,m}}$ calculés pour les LCZ suivantes : (a) OUE diurne. (b) OUE nocturne. (c) CEN diurne. (d) CEN nocturne. (e) TRM diurne. (f) TRM nocturne. 117
3.13 Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air $\overline{\delta T_{air,m}}$ calculés pour les LCZ suivantes : (a) NAT diurne. (b) NAT nocturne. (c) THL diurne. (d) THL nocturne. (e) SMA diurne. (f) SMA nocturne. 118
3.14 Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air $\overline{\delta T_{air,m}}$ calculés pour les LCZ suivantes : (a) MBR diurne. (b) MBR nocturne. (c) PVE diurne. (d) PVE nocturne. 119
3.15 Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air $\overline{\delta T_{air,m}}$ calculés pour les LCZ suivantes : (a) JAR diurne. (b) JAR nocturne. (c) SEI diurne. (d) SEI nocturne. (e) PUL diurne. (f) PUL nocturne. 120
3.16 Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air $\overline{\delta T_{air,m}}$ calculés pour les LCZ suivantes : (a) CE1 diurne. (b) CE1 nocturne. (c) CE3 diurne. (d) CE3 nocturne. 121

3.17 Différence entre $T_{air,SC1}$ et $T_{air,SC2}$ ($T_{air,SC1}$ - $T_{air,SC2}$). (a) Période diurne. (b) Période nocturne. 125
3.18 Différence entre $T_{air,SCn}$ et $\overline{T_{air,p}}$ ($T_{air,SCn}$ - $\overline{T_{air,p}}$). (a) Période diurne. (b) Période nocturne. 126

4.1 Températures d'air $\overline{T_{air}}$ relevées dans les treize LCZ étudiées. Ces relevés sont triés par type de LCZ et présentés par jour de mesure. (a) Période diurne, 3 relevés en 2012, 11 relevés en 2013. (b) Période nocturne, 7 relevés en 2012, 10 relevés en 2013. 137
4.2 Illustration des différences de température d'air entre LCZ en période nocturne proposée par Stewart [Stewart, 2011]. 145
4.3 Itinéraire pour les mesures mobiles à fréquence horaire. Les quatre LCZ étudiées sont repérées par un marqueur rouge. 147
4.4 Température d'air $\overline{T_{air}}$ à fréquence horaire dans quatre LCZ. En partant de la gauche, les trois lignes rouges verticales représentent respectivement l'heure de lever du soleil, l'heure du coucher du soleil, et 3h après le coucher du soleil. (a) 2 août 2013. (b) 21 août 2013. 148
4.5 Cartographie des écarts de température moyen construite à partir des 13 LCZ étudiées. Les valeurs utilisées sont présentées dans la table 4.1. Les écarts sont exprimés à partir de la LCZ présentant la température d'air la plus basse. Dans le cas de ces deux figures, il s'agit de CE3 $\Delta T_{air,LCZ\ X-CE3}$. (a) Période diurne. (b) Période nocturne. 150
4.6 Extrapolation de la cartographie des écarts de température moyen à toutes les LCZ de l'agglomération. Les treize LCZ étudiées sont entourées en blanc. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-Low\ plants}$. (a) Période diurne. (b) Période nocturne. 153
4.7 (a) Rose des vents pour les mesures réalisées en cas de nébulosité inférieure ou égale à 2 octas. Les sessions présentant une direction du vent variable ont été écartées. (b) Histogramme des vitesses de vent en cas de nébulosité inférieure ou égale à 2 octas. 155

4.8 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la direction du vent en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vent de secteur nord-est (Vitesse moyenne = 4,2 m.s^{-1}, 10 juillet et 16 juillet). (b) Vent de secteur est (Vitesse moyenne = 2,8 m.s^{-1}, 21 juillet et 4 septembre).156
4.9 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la direction du vent en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. Vent de secteur sud (Vitesse moyenne = 3,0 m.s^{-1}, 1 août et 5 septembre). 157
4.10 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la direction du vent en période nocturne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vent de secteur nord-est (Vitesse moyenne = 2,1 m.s^{-1}, 9 juillet et 19 juillet). (b) Vent de secteur sud-est (Vitesse moyenne = 1,6 m.s^{-1}, 2 juillet et 2 août). 158
4.11 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la vitesse du vent en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vitesse de vent modérée (Vitesse moyenne = 5,4 m.s^{-1}, 8 juillet et 10 juillet). (b) Vitesse de vent faible (Vitesse moyenne = 1,9 m.s^{-1}, 15 août et 16 août). 160
4.12 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la vitesse du vent en période nocturne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vitesse de vent modérée (Vitesse moyenne = 3,1 m.s^{-1}, 11 juillet et 19 juillet). (b) Vitesse de vent faible (Vitesse moyenne = 1,1 m.s^{-1}, 22 juillet et 15 août). 161
4.13 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la nébulosité en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Nébulosité forte (7 octas, Vitesse moyenne du vent = 3,6 m.s^{-1}, 17 juillet, 9 août et 22 août). (b) Nébulosité faible (0 octas, Vitesse moyenne du vent = 2,8 m.s^{-1}, 1 août, 4 septembre et 5 septembre). 164

4.14 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la nébulosité en période nocturne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Nébulosité forte (4 octas, Vitesse moyenne du vent = 1,2 m.s^{-1}, 18 juillet, 23 août et 31 août). (b) Nébulosité faible (0 octas, Vitesse moyenne du vent = 1,4 m.s^{-1}, 9 juillet, 2 août et 15 août). 165

5.1 Schématisation du rafraîchissement nocturne en deux phases par type de LCZ. 170

5.2 Taux de rafraîchissement à fréquence horaire dans quatre LCZ. Chaque point de la figure représente un taux de rafraîchissement calculé selon l'équation (5.2). En partant de la gauche, les trois lignes rouges verticales représentent respectivement l'heure de lever du soleil, l'heure du coucher du soleil, et 3 h après le coucher du soleil. (a) 2 août 2013. (b) 21 août 2013.172

5.3 Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de l'heure de mesure. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Milieu de nuit (Nébulosité 0 octas, Vitesse moyenne du vent = 1,2 m.s^{-1}, 9 juillet et 15 août). (b) Fin de nuit (Nébulosité 0 octas, Vitesse moyenne du vent = 0,8 m.s^{-1}, 5 septembre et 6 septembre). 174

5.4 Illustration du calcul du taux de rafraîchissement normalisé à partir des mesures effectuées dans les treize LCZ en période diurne et nocturne. La lettre D correspond aux mesures diurnes, et la lettre N correspond aux mesures nocturnes. La partie bleue correspond à la durée de la phase 1 (P1), la partie verte correspond à la durée de la phase 2 (P2). 176

5.5 Valeur absolue des taux de rafraîchissement normalisés $|\chi^n_{DN}|$ des cinq types de LCZ étudiés pour six couples de sessions diurne et nocturne. . . 178

5.6 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction du SVF. 182

5.7 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction du rapport d'aspect. 183

5.8 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la hauteur moyenne des bâtiments. 183

5.9 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la rugosité. 184
5.10 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la fraction de surface bâtie. 184
5.11 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la fraction de surface imperméable. 185
5.12 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la fraction de surface perméable. 185
5.13 Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la position relative des LCZ. 186
5.14 Intervalles de valeurs de SVF associés aux groupes Midrise, Lowrise et Plants. Les valeurs moyennes de χ^n_{DN} pour chaque groupe sont indiquées entre parenthèses. 186
5.15 Taux de rafraîchissement normalisés mesurés en fonction des taux de rafraîchissement normalisés calculés. 187

A.1 Type de LCZ 1 Compact highrise. 218
A.2 Type de LCZ 2 Compact midrise. 219
A.3 Type de LCZ 3 Compact lowrise. 220
A.4 Type de LCZ 4 Open highrise. 221
A.5 Type de LCZ 5 Compact midrise. 222
A.6 Type de LCZ 6 Compact lowrise. 223
A.7 Type de LCZ 7 Lightweight lowrise. 224
A.8 Type de LCZ 8 Large lowrise. 225
A.9 Type de LCZ 9 Sparsely built. 226
A.10 Type de LCZ 10 Heavy industrial. 227
A.11 Type de LCZ A Dense trees. 228
A.12 Type de LCZ B Scattered trees. 229
A.13 Type de LCZ C Bush, scrub. 230
A.14 Type de LCZ D Low plants. 231
A.15 Type de LCZ E Bare rock or paved. 232
A.16 Type de LCZ F Bare soil or sand. 233
A.17 Type de LCZ G Water. 234

B.1 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 13 mars 2012 en période diurne à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon. 235
B.2 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 20 mars 2012 en période diurne à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon. 236
B.3 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 28 mars 2012 en période diurne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon. 236
B.4 Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 28 mars 2012 en période nocturne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt. ϕ correspond à la moyenne de l'échantillon, et ω à son écart type. 237

Liste des tableaux

1.1 Classification de la rugosité effective du terrain, adapté de [Davenport *et al.*, 2000]. 18
1.2 Valeurs d'effusivité thermique pour différents matériaux urbains et ruraux calculées à partir des données issues de [Gartland, 2008]. 20
1.3 Valeurs d'albédo et d'émissivité pour différents matériaux urbains et naturels (adapté de [Oke, 1987]). 21
1.4 Caractéristiques de modélisation d'une sélection de modèles utilisant l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de [Grimmond *et al.*, 2009]) 28
1.5 Grandeurs mesurées et indicateurs utilisés pour la construction de modèles n'utilisant pas l'équation énergétique urbaine 32
1.6 Récentes campagnes de mesure fixes en climatologie urbaine. 38
1.7 Ensemble de métadonnées recommandées pour un site de mesure [Oke, 2004], [Oke, 2006]. 39
1.8 Sélection d'études impliquant la mesure mobile en climatologie urbaine. 40
1.9 Indicateurs urbains présents dans la typologie LCZ, groupés par domaine d'intervention. 50

2.1 Types de LCZ utilisés dans l'agglomération de Nancy. La correspondance en Français est issue des travaux de l'IAU-IDF [Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France, 2014]. 66
2.2 Noms, codes, types et superficies des treize LCZ sélectionnées dans le cadre de l'étude. 67

2.3 Valeurs des indicateurs urbains pour les LCZ sélectionnées. SVF : Facteur de vue du ciel, AR : Rapport d'aspect, H : Hauteur moyenne des bâtiments, R : Classe de rugosité selon Davenport [Davenport *et al.*, 2000], Bati : Fraction de surface bâtie, Imper : Fraction de surface imperméable, Per : Fraction de surface perméable. 70
2.4 Rapport entre les superficies des zones sources des sites de contrôle et les superficies des LCZ. 88

3.1 Caractéristiques techniques de la sonde PT100 utilisée. 97
3.2 Organisation du protocole expérimental. 100
3.3 Influence de l'application d'une vitesse seuil V_s de 15 km.h^{-1} sur l'amplitude de température d'air mesurée et sur le nombre de points de mesure écartés du jeu de données. 110
3.4 Moyennes et écarts types de l'amplitude de température d'air en périodes diurne et nocturne. 115
3.5 Récapitulatif du nombre de singularités thermiques observées dans chacune des LCZ. 123
3.6 Écarts moyens nocturnes enregistrés entre différentes LCZ [Stewart, 2011]. 128

4.1 Moyennes des différences de température d'air entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$. En bas à gauche, les différences de température en période diurne entre la LCZ en colonne moins la LCZ en ligne. En haut à droite, les différences de température en période nocturne entre la LCZ en ligne moins la LCZ en colonne. L'écart type est précisé entre parenthèses. 138
4.2 Moyennes des différences de température d'air entre type de LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$. En bas à gauche, les différences de température en période diurne entre le type de LCZ en colonne moins le type de LCZ en ligne. En haut à droite, les différences de température en période nocturne entre le type de LCZ en ligne moins le type de LCZ en colonne. L'écart type est précisé entre parenthèses. 139
4.3 Indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine pour les groupes Midrise, Lowrise et Plants. 140

4.4 Différences de température d'air en période nocturne entre types de LCZ (Annexe A) pour plusieurs villes : Vancouver (moyenne sur 6 nuits), Uppsala (moyenne sur 17 nuits), Glasgow (1 nuit), Berlin (moyenne sur 293 nuits), Nancy (moyenne sur 10 ou 17 nuits selon les LCZ). 142
4.5 Fraction de surface bâtie et hauteur moyenne des bâtiments pour les types de LCZ concernés par les comparaisons de $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$. 143
4.6 Moyenne des différences de température d'air en période nocturne entre types de LCZ. Comparaison entre les ordres de grandeur de Stewart [Stewart, 2011] avec les valeurs mesurées à Nancy. 144
4.7 Distance par rapport à la LCZ CEN et écart moyen de température par rapport à CEN en périodes diurne et nocturne de 12 LCZ étudiées. La distance par rapport à CEN est calculée entre le centre de la LCZ CEN et le centre de chaque LCZ. Au sein de chaque type, les LCZ sont organisées de la plus proche de CEN à la moins proche. 151

5.1 Taux de rafraîchissement calculés à Göteborg et Nancy. Les données pour Göteborg correspondent aux mois d'août et septembre 1999, et les données pour Nancy correspondent aux 21 août 2013. Pour les deux villes, les valeurs sont calculées entre 1 h avant le coucher du soleil et 2 h après le coucher du soleil pour la phase 1, et entre 3 h après le coucher du soleil et 10 h après le coucher du soleil pour la phase 2. 175
5.2 Caractéristiques des régressions linéaires correspondant à la première étape, tous types de LCZ confondus. SVF : Facteur de Vue du Ciel, AR : Rapport d'aspect, H : Hauteur moyenne des bâtiments, R : Classe de rugosité, Bati : Fraction de surface bâtie, Imper : Fraction de surface imperméable, Per : Fraction de surface perméable, Pos : Position relative des LCZ dans l'agglomération. 180
5.3 Caractéristiques des régressions linéaires correspondant à la seconde étape, tous types de LCZ confondus. 181
5.4 Variation de la valeur des indicateurs urbains aboutissant à une augmentation du taux de rafraîchissement normalisé de 0,01 h^{-1}. 187
5.5 Comparaison du AIC et du RMSE pour les régressions obtenues à partir de huit autres échantillons aléatoires. 188

5.6 Caractéristiques des régressions linéaires correspondant à la première étape. Les types de LCZ sont considérés individuellement. 189

C.1 Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période diurne entre le 17 juillet 2012 et le 10 septembre 2012. 239
C.2 Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période nocturne entre le 18 juillet 2012 et le 7 septembre 2012. 240
C.3 Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période diurne entre le 1er juillet 2013 et le 24 septembre 2013. 240
C.4 Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période nocturne entre le 2 juillet 2013 et le 25 septembre 2013. 241

Nomenclature

Acronymes

BD TOPO	Base de données produite par l'IGN
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
MNE	Modèle Numérique d'Élévation
QGIS	Quantum GIS, logiciel de Système d'Information Géographique
SEB	Surface Energy Balance, bilan énergétique d'une surface urbaine

Symboles grecs

α	Albédo de la surface terrestre	[-]
α'	Seuil de signification	[-]
β_i	Coefficients de la régression	[-]
χ	Taux de rafraîchissement	[°C.h^{-1}]
χ_{DN}^{n}	Taux de rafraîchissement normalisé	[h^{-1}]
$\chi_{1\mathrm{h}}$	Taux de rafraîchissement horaire	[°C.h^{-1}]
χ_{DN}	Taux de rafraîchissement entre les périodes diurne et nocturne	[°C.h^{-1}]
ΔQ_A	Flux relatif à l'advection horizontale	[W.m^{-2}]
ΔQ_S	Flux stocké par la surface	[W.m^{-2}]
λ	Conductivité thermique	[W.m^{-1}.K^{-1}]
μ	Effusivité thermique	[J.m^{-2}.s$^{-0.5}$.K^{-1}]
ω	Écart type de l'échantillon	[-]
ϕ	Moyenne de l'échantillon	[-]

ρ	Densité de l'air	[kg.m^{-3}]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m^{-2}.K^{-4}]
θt	Intervalle de temps	[h]
θT_{air}	Écart de température	[°C]
ε_{atm}	Émissivité moyenne de l'atmosphère	[-]
ε_{surf}	Émissivité moyenne de la surface terrestre	[-]
φ_{built}	Fraction de surface bâtie	[m^2.m^{-2}]
$\varphi_{greenery}$	Fraction de surface végétalisée	[m^2.m^{-2}]
φ_{water}	Fraction de surface d'eau libre	[m^2.m^{-2}]
ξ	Composante résiduelle	[-]

Indices

$_{SCn}$	Site de contrôle n	[-]

Symboles romains

$\Delta\overline{T_{air,DN,max}}$	Écart maximal entre la moyenne spatiale de température d'air en période diurne et la moyenne spatiale de température d'air en période nocturne pour une LCZ donnée	[°C]
$\Delta\overline{T_{air,DN}}$	Écart entre la moyenne spatiale de température d'air en période diurne et la moyenne spatiale de température d'air en période nocturne pour une LCZ donnée	[°C]
$\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$	Différence entre la moyenne spatiale de température d'air d'une LCZ X et la moyenne spatiale de température d'air d'une LCZ Y	[°C]
$\delta T_{air,p,m}$	Écart à la moyenne spatiale de température d'air au point m pour la section de route p	[°C]
$\Delta T_{air,p}$	Écart de température d'air entre les 7 points consécutifs les plus chauds et les 7 points consécutifs les plus froids	[°C]
$\Delta T_{urb-rur}$	Écart entre une température urbain et une température rurale	[°C]
$\overline{\delta T_{air,m}}$	Écart moyen à la moyenne spatiale de température d'air au point m	[°C]

$\overline{T_{air,D}}$	Moyenne spatiale de température d'air pour une LCZ donnée en période diurne	[°C]
$\overline{T_{air,N}}$	Moyenne spatiale de température d'air pour une LCZ donnée en période nocturne	[°C]
$\overline{T_{air,p}}$	Moyenne spatiale de température d'air sur la section de route p	[°C]
$\overline{u}$	Vitesse de vent régional non urbain à 10 mètres	[m.s^{-1}]
AR	Rapport d'aspect	[m.m^{-1}]
B_0	Fraction de surface bâtie pour une maille	[m^2.m^{-2}]
C	Constante	[-]
C_p	Capacité thermique massique de l'air	[J.kg^{-1}.K^{-1}]
C_v	Capacité thermique volumique	[J.m^{-3}.K^{-1}]
D	Distance entre la maille urbaine étudiée et la maille rurale la plus proche	[m]
E	Flux d'évapotranspiration	[kg.s^{-1}]
H	Hauteur moyenne des bâtiments	[m]
h	Hauteur d'un bâtiment	[m]
IND	Indicateur urbain	[-]
k	Constante de von Karman	[-]
$K\downarrow$	Flux radiatif descendant à courte longueur d'onde	[W.m^{-2}]
$K\uparrow$	Flux radiatif ascendant à courte longueur d'onde	[W.m^{-2}]
$L\downarrow$	Flux radiatif descendant à grande longueur d'onde	[W.m^{-2}]
$L\uparrow$	Flux radiatif ascendant à grande longueur d'onde	[W.m^{-2}]
L_v	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	[J.kg^{-1}]
m	Point de mesure	[-]
N_{Bat}	Nombre de bâtiments dans la LCZ	[-]
N_{LCZ}	Nombre de trajets effectués pour une LCZ donnée	[-]

N_p	Nombre de points de mesure enregistrés sur une section de route p	[-]
N_{SCn}	Nombre de points de mesure enregistrés à l'intérieur d'un site de contrôle donné SCn	[-]
p	Section de route	[-]
Pop	Population d'une agglomération	[-]
Q^*	Flux radiatif net	[W.m^{-2}]
Q_E	Flux de chaleur latente	[W.m^{-2}]
Q_F	Flux de chaleur anthropique	[W.m^{-2}]
Q_H	Flux de chaleur sensible	[W.m^{-2}]
s	Surface au sol d'un bâtiment	[m^2]
S_a	Aire de la zone de calcul	[m^2]
S_{bati}	Somme de toutes les zones occupées par des bâtiments dans la zone de calcul	[m^2]
$S_{vertical}$	Somme de toutes les surfaces verticales de la zone de calcul	[m^2]
SVF	Facteur de vue du ciel	[-]
$T_{air,SCn}$	Température d'air du site de contrôle SCn	[K]
$T_{air,correction}$	Température d'air après correction temporelle	[°C]
$T_{air,debut}$	Température d'air au début de la session	[°C]
$T_{air,fin}$	Température d'air à la fin de la session	[°C]
$T_{air,mesure}$	Température d'air au moment de la mesure	[°C]
$T_{air,p,m}$	Température d'air mesurée au point m de la section de route p	[°C]
T_{air}	Température d'air	[K]
T_{atm}	Température moyenne de l'atmosphère	[K]
T_{center}	Température d'air au centre de l'agglomération	[°C]
t_{debut}	Horaire du début de la session de mesure	[s]
t_{fin}	Horaire de la fin de la session de mesure	[s]

$T_{maille\ (R)}$	Température de la maille rurale de référence	[°C]
T_{maille}	Température d'une maille urbaine	[°C]
t_{mesure}	Horaire de la mesure	[s]
T_{rural}	Température d'air rurale	[°C]
T_{surf}	Température moyenne de la surface terrestre	[K]
T_{urban}	Température d'air urbaine	[°C]
$u(z)$	Profil de vent en fonction de l'altitude	[m.s^{-1}]
u^*	Vitesse de frottement	[m.s^{-1}]
UHI	Amplitude de l'îlot de chaleur urbain	[°C]
UHI_{max}	Amplitude maximale de l'îlot de chaleur urbain	[°C]
V_s	Vitesse seuil du véhicule	[m.s^{-1}]
W	Largeur moyenne des rues	[m]
w	Largeur d'une rue	[m]
x_i	Variables indépendantes	[-]
y_i	Variable dépendante	[-]
z	Altitude	[m]
z_0	Longueur de rugosité	[m]
z_d	Hauteur de déplacement	[m]

Introduction générale

La population urbaine mondiale n'a eu de cesse de croître depuis le début de l'ère industrielle. Aujourd'hui, plus de la moitié de l'humanité vit dans les grands centres urbains, et les métropoles sont en constante expansion. En parallèle de cette évolution démographique, les agglomérations européennes viendront à connaître, comme l'ensemble du continent, d'importantes modifications climatiques. Selon les prévisions rapportées par Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), les villes européennes risquent de subir des vagues de chaleur plus intenses et plus fréquentes au cours du vingt-et-unième siècle. Ainsi, les villes ont pour nécessité de s'adapter rapidement à cette évolution climatique et de prendre en compte dès aujourd'hui les futures variations du climat dans le processus de planification urbaine.

La vulnérabilité des villes aux vagues de chaleur est accentuée par la présence d'un îlot de chaleur urbain (ICU). Ce terme fait référence à l'anomalie positive de température d'air existant entre le centre d'une agglomération et les zones non urbanisées alentours. Ce phénomène climatique entraîne de nombreuses conséquences sur l'environnement urbain. En effet, la hausse des températures moyennes journalières affecte le confort thermique ainsi que la consommation énergétique estivale des bâtiments. Par ailleurs, le phénomène d'ICU influe sur la santé publique, particulièrement en période caniculaire. Dans ces conditions, les impacts sanitaires des pics de températures sont multiples, touchant principalement les populations à risques telles que les jeunes enfants et les personnes âgées. Ces vagues de chaleur peuvent également entraîner une augmentation du taux de mortalité comme ce fut le cas lors de l'été 2003.

Dans ce contexte d'adaptation, les aménageurs seront dans l'obligation de prendre en compte le phénomène d'îlot de chaleur urbain lors des opérations d'urbanisme.

Ils peuvent pour cela appuyer leur démarche sur les connaissances issues de la recherche et présentées sous forme de recommandations ou de guides pratiques, qui visent à intégrer la problématique du climat urbain lors de l'élaboration de projets. Cependant, bien que ces règles soient utiles en tant qu'aide à la décision, il ne s'agit que d'informations qualitatives.

À l'étape de conception, les aménageurs peuvent également faire appel aux modèles numériques dédiés au climat urbain. Ces derniers ont pour avantages d'offrir la possibilité de tester différents scénarii d'aménagement, et d'avoir accès à une information quantitative concernant certaines variables climatiques. Une grande majorité des modèles présentés nécessitent néanmoins une excellente connaissance du milieu urbain étudié. Leur utilisation requiert également certaines connaissances en météorologie et en climatologie pour une bonne expertise sur les données de sortie, ce qui tend à limiter leur usage aux seuls climatologues et spécialistes du climat urbain. De plus, une partie des modèles existants ont été développés à des fins de recherche scientifique. De par leur construction, ils sont difficilement préhensibles pour des utilisateurs inexpérimentés.

Les aménageurs expriment un besoin d'information concernant le climat urbain. Ils souhaitent aller plus loin que les recommandations qualitatives, et pouvoir évaluer quantitativement l'impact climatique de différentes propositions d'aménagement. Cependant, une grande majorité des outils numériques existants ne sont pas adaptés à leurs pratiques. Afin d'intégrer une dimension climatique aux opérations d'aménagement urbain, les aménageurs souhaitent avoir accès à une information multi-échelle, concernant l'agglomération entière, mais aussi les rues et les quartiers. Cette information doit être mobilisable, et de nature à aider à la conception du projet urbain.

Le zonage climatique d'une agglomération peut être un moyen d'action adapté à cette problématique. Celui-ci permet notamment de structurer l'étude du climat urbain en produisant des cartographies renseignant les spécificités climatiques des quartiers. Cependant, cette approche nécessite d'être complétée par une information à plus petite échelle afin de correspondre aux attentes des aménageurs vis-à-vis de l'élaboration des projets urbains. Les méthodes de mesures embarquées offrent la possibilité d'apporter cette donnée complémentaire via l'observation de variables climatiques à très haute résolution spatiale.

L'objectif de cette thèse est de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain en développant une approche faisant appel à un zonage climatique. Ce découpage du territoire en zones climatiques sert de support à la réalisation de mesures mobiles qui visent à étudier les caractéristiques thermiques du climat urbain à différentes échelles horizontales. L'analyse conjointe du zonage climatique et des relevés expérimentaux permet d'aboutir à une évaluation circonstanciée de la distribution spatiale de la température d'air. Le but de cette thèse est également de proposer une démarche méthodologique pouvant servir de base à la construction d'un outil de diagnostic du climat urbain à destination des aménageurs, fournissant des estimateurs quantitatifs susceptibles d'être utilisés en phase opérationnelle.

Le premier chapitre visera à introduire plusieurs aspects du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Les différentes approches de modélisation numérique seront examinées, de même que les méthodes d'observation couramment utilisées en milieu urbain. Ce chapitre détaillera le concept de zonage climatique et ses méthodes les plus récentes, et se conclura par la description de l'approche méthodologique élaborée dans le cadre de cette thèse. Le second chapitre présentera l'utilisation d'un zonage climatique pour l'agglomération de Nancy. Le troisième chapitre s'intéressera au comportement de ces zones climatiques. Il s'agira d'analyser le comportement thermique de ces zones, et notamment leur homogénéité spatiale du point de vue de la température d'air. Le quatrième chapitre examinera dans quelle mesure l'association de mesures mobiles et d'un zonage climatique offre la possibilité de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain à Nancy. Il insistera sur le fait que la comparaison des températures d'air entre zones climatiques permet un diagnostic opérationnel du climat urbain. Le cinquième chapitre consistera à étudier le lien entre le comportement thermique et les caractéristiques urbaines des zones climatiques. Il introduira notamment un indicateur climatique adapté à l'évaluation des scénarii d'aménagement urbain, en particulier la comparaison entre les différentes typologies de quartier.

Les résultats présentés dans les chapitres deux et trois ont fait l'objet d'une publication dans une revue internationale ([Leconte et al.*, 2015]).*

1

Phénomènes et méthodes d'investigation en climatologie urbaine

1.1 Introduction

Le présent chapitre vise établir un état de l'art des travaux portant sur le climat urbain. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est tout d'abord présenté. Ses principaux facteurs de contrôle, ses causes et son processus de formation sont ensuite précisés. Par la suite, les modèles développés pour la simulation du climat urbain sont examinés selon leur domaine d'application. Différentes méthodes d'observation de l'îlot de chaleur urbain sont ensuite introduites. Les classifications climatiques sont également traitées, en détaillant la classification Local Climate Zone. Enfin, les objectifs, hypothèses et méthodologie de la thèse sont détaillés pour introduire les étapes de travail proposés dans les chapitres suivants.

1.2 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

1.2.1 Propriétés de la couche limite atmosphérique

Du fait que les basses couches de l'atmosphère sont en permanence en interaction avec la surface terrestre, les caractéristiques physiques et morphologiques de cette dernière ont une influence sur le climat observé. Dans un environnement donné, les

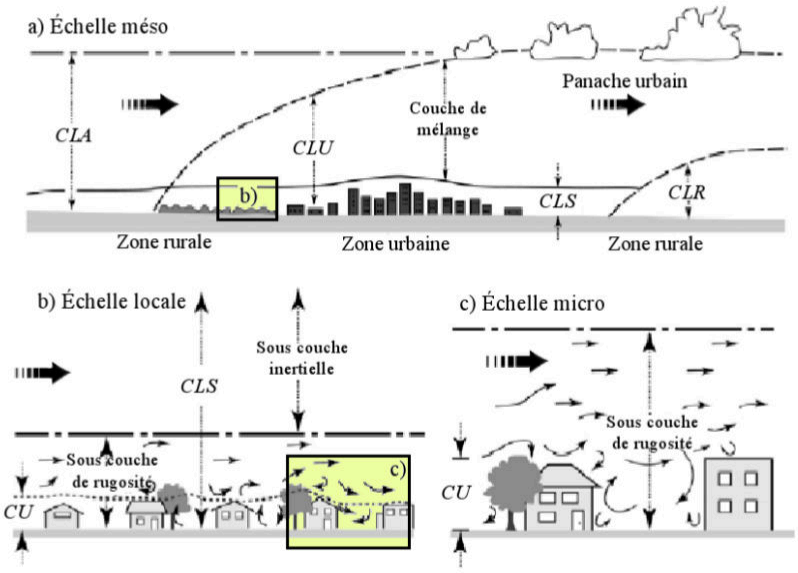


Figure 1.1 : *Imbrication des échelles spatiales de la climatologie urbaine ([Bouyer, 2009], adapté de [Oke, 2004]).*

propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques de celui-ci régissent la façon dont l'énergie reçue est répartie [Oke, 1987]. Cette répartition particulière de l'énergie influe notamment sur la température d'air, l'humidité absolue ou encore le profil de vent observé. Des environnements aux propriétés physiques et morphologiques distinctes répartiront donc l'énergie reçue de façon différente, et par conséquent modifieront les variables climatiques citées précédemment de façon dissemblable. À petite échelle, ces disparités énergétiques peuvent être à l'origine du développement d'un climat différent du climat général environnant [Erell *et al.*, 2011], ce qui correspond à la définition d'un microclimat. Cette définition du microclimat permet d'attester de l'existence d'un microclimat urbain. En effet, l'environnement urbain, qui modifie fortement le paysage et l'occupation des sols, impacte significativement le climat dans et à la périphérie des villes.

À l'échelle de la journée, la surface terrestre influe sur la partie inférieure de la troposphère appelée couche limite atmosphérique (CLA) (figure 1.1). La structure de cette couche connaît des variations journalières, son épaisseur variant de quelques centaines de mètres en période nocturne à quelques kilomètres en période diurne [Dupont, 2001].

La climatologie urbaine s'intéresse essentiellement à la partie inférieure de la CLA, à savoir la couche limite de surface (CLS) (figure 1.1), qui ne représente approximativement que 10% de la hauteur totale de la CLA [Robitu, 2005]. La CLS se structure selon trois sous-couches différentes :

- En partie haute de la CLS se trouve la sous-couche inertielle (ou sous-couche d'équilibre). Au sein de cette sous-couche, les échanges énergétiques verticaux entre la surface terrestre et les couches supérieures de l'atmosphère sont spatialement homogènes. De plus, les caractéristiques de cette couche ne sont pas affectées par des éléments de rugosité particuliers mais plutôt par la nature de la zone sous-jacente dans son ensemble, du fait notamment du brassage turbulent de l'air [Erell *et al.*, 2011].
- La sous-couche de rugosité, d'une épaisseur de 1,5 à 4 fois les éléments de rugosité, se situe entre la sous couche inertielle et la partie supérieure des éléments de rugosité [Robitu, 2005]. Les effets de sillage provoqués par la présence des éléments de rugosité entraînent une turbulence importante au sein de cette couche.
- Enfin, la couche limite de canopée urbaine correspond à l'air présent entre les éléments de rugosité. Cette couche est particulièrement hétérogène et turbulente, notamment du fait que les caractéristiques physiques du milieu sont elles-mêmes spatialement très variées.

Deux couches supplémentaires sont utilisées spécifiquement en climatologie urbaine [Oke, 1976]. D'une part la couche limite urbaine (CLU), qui est définie comme étant la partie de la couche limite atmosphérique dont les caractéristiques sont modifiées par la présence d'activités humaines. D'autre part la couche limite de canopée urbaine (CLCU) (appelée également canopée urbaine (CU) (figure 1.1)), qui correspond à l'air présent entre les éléments de rugosité urbains, à savoir principalement les bâtiments et la végétation haute.

L'étude du climat urbain se structure via l'utilisation d'échelles spatiales horizontales (figure 1.1). Trois échelles spatiales sont généralement utilisées [Oke, 2004] [Oke, 2006] :

- La mésoéchelle, ou échelle mésoclimatique s'applique à des phénomènes climatiques de taille caractéristique comprise entre 10^4 et 2.10^5 mètres. De fait, cette échelle englobe fréquemment la totalité de l'agglomération et sa périphérie.

– L'échelle locale fait référence à des phénomènes allant de 10^2 à 5.10^4 mètres. Dans ce cas, les formes urbaines considérées sont les quartiers, les parcs ou encore les friches industrielles.
– Enfin, la microéchelle, ou échelle microclimatique, concerne les phénomènes climatiques dont la dimension spatiale de référence est comprise entre 10^{-2} et 10^3 mètres. Les éléments du milieu urbain correspondant à cette échelle sont le bâtiment, la rue ou le jardin.

Par ailleurs, l'état de stabilité de la CLA apporte une information quant à son comportement thermique [Bagga, 2012] :

– L'état instable se manifeste en période diurne, pendant des journées fortement ensoleillées avec un vent faible. La température de l'air proche de la surface terrestre est plus élevée que celle de l'air à plus haute altitude. Cette configuration favorise le brassage turbulent de l'air et les mouvements verticaux de masse d'air.
– L'état neutre correspond à l'absence de gradient vertical significatif de température d'air dans la CLA. Cette configuration est rencontrée en présence de vent fort ou de nébulosité très élevée. Dans ce cas, la turbulence constatée est d'origine dynamique et non thermique.
– À l'inverse de l'état instable, l'état stable correspond à une inversion du gradient de température. La température d'air proche de la surface terrestre est plus froide que celle de l'air susjacent. Cette configuration est rencontrée en période nocturne, par vent faible. La CLA est stratifiée thermiquement, la turbulence ainsi que les mouvements verticaux de masse d'air sont réduits.

1.2.2 Définition

L'existence d'un climat urbain est à l'origine d'un phénomène climatique particulier connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (figure 1.2). La définition la plus communément admise de l'ICU est la différence de température d'air entre une zone urbaine et sa campagne environnante [Oke, 1987] [Gartland, 2008] [Erell *et al.*, 2011]. Ce phénomène climatique a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, dont les plus anciens datent de la première moitié du XIXeme siècle (voir la revue chronologique proposée par Stewart [Stewart, 2011]).

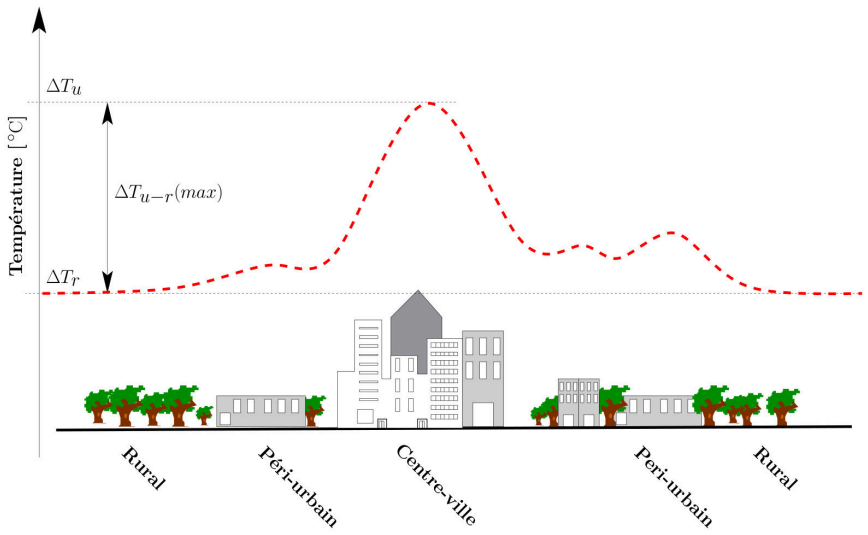


Figure 1.2 : *Profil horizontal d'un îlot de chaleur urbain [Claverie* et al., *2011].*

Au delà de cette définition générique, il est possible de définir différents types d'îlots de chaleur urbains, qui possèdent chacun leur échelle spatiale et temporelle, leur mécanisme physique et leur méthode de mesure [Oke, 1976] [Stewart, 2011] :

- L'ICU souterrain est le type d'ICU le moins étudié dans la littérature. Il s'illustre par le fait que les zones urbaines tendent à faire augmenter la température du sol par conduction. Ainsi les températures du sous-sol urbain sont plus élevées que celles du sous-sol des zones non urbanisées proches.
- L'ICU de surface concerne la différence de températures de surface entre les villes et les zones rurales périphériques. La formation de ce type d'ICU dépend fortement des différences entre matériaux urbains et ruraux. En effet, les surfaces sèches, imperméables et à forte inertie thermique – caractéristiques des zones urbaines – ont tendance à être plus chaudes que les surfaces humides, perméables, à faible inertie thermique – caractéristiques des zones rurales.
- Enfin, l'ICU atmosphérique concerne la température d'air. Il est possible de distinguer au sein de celui-ci l'ICU de couche limite urbaine et l'ICU de couche limite de canopée urbaine. Le premier fait référence à la masse d'air chaud généralement présente au dessus des zones urbaines. Dans le cas d'un vent régional faible, l'ICU de couche limite urbaine prend la forme d'un dôme d'air chaud situé au dessus de l'agglomération. En cas de vent régional plus important, cet ICU correspond au panache urbain qui s'étend à partir de la zone urbanisée

vers les zones avoisinantes. Le second type d'ICU atmosphérique, l'ICU de couche limite de canopée urbaine, correspond aux différences de température d'air observables au sein de la couche limite de canopée urbaine. Son amplitude s'exprime comme une différence de température d'air (figure 1.3).

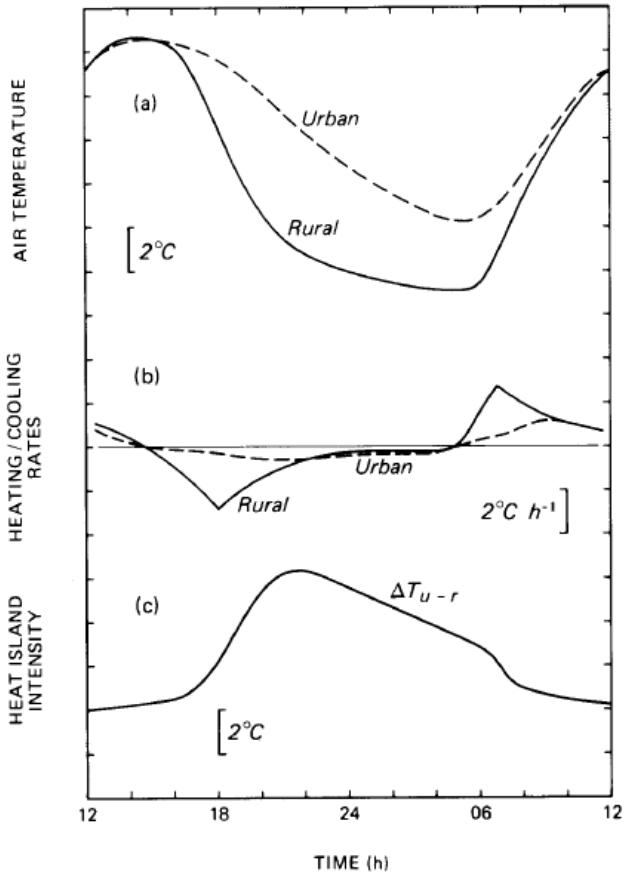


Figure 1.3 : *Cycle journalier de l'îlot de chaleur urbain [Oke, 1987]. (a) Température d'air en zone urbaine et en zone rurale. (b) Taux de rafraîchissement en zone urbaine et en zone rurale. (c) Différence de température d'air entre une zone urbaine et une zone rurale, correspondant à l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain.*

L'ensemble de ces différents types d'ICU interagissent entre eux via des phénomènes d'échanges de chaleur et de masse.

Par convention, l'ICU de couche limite de canopée urbaine sera nommé indifféremment "ICU" ou "îlot de chaleur urbain" dans la suite de ce document.

1.2.3 Facteurs de contrôle

Différents paramètres, appelés facteurs de contrôle, influent sur l'amplitude de l'ICU. Le facteur de contrôle le plus étudié correspond aux conditions météorologiques

à l'échelle mésoclimatique [Stewart, 2011]. Celles-ci font référence aux vitesse et direction du vent, au nombre et aux types de nuages ainsi qu'aux précipitations. Plusieurs études ont démontré l'influence remarquable de ces conditions météorologiques sur l'amplitude de l'ICU [Arnfield, 2003]. L'amplitude de l'ICU est importante dans le cas d'un vent faible associé à une nébulosité faible [Stewart, 2000]. À l'inverse, l'augmentation de la vitesse du vent ou de la nébulosité aura tendance à faire diminuer cette amplitude.

Le climat général (au sens de la classification climatique de Köppen-Geiger [Peel *et al.*, 2007]) dans lequel se situe l'agglomération étudiée est lui aussi un facteur de contrôle. L'amplitude de l'ICU observée dans des villes côtières ou situées en climat humide aura tendance à être plus faible que dans des villes subissant un climat désertique ou continental sec [Stewart, 2011].

Enfin, les propriétés thermiques, hydriques et radiatives des sites ruraux sont également un facteur de contrôle de l'ICU [Stewart, 2011]. En effet, l'environnement rural représente "l'arrière plan climatique" à partir duquel l'amplitude de l'ICU est habituellement calculée. Une variation de la température d'air au site rural affecte donc l'amplitude de l'ICU. Une telle variation peut être provoquée par une fluctuation de l'effusivité thermique du sol rural, elle même très influencée par la teneur en humidité du sol.

1.2.4 Bilan énergétique d'une surface urbaine

L'existence d'un climat urbain découle de la façon dont l'environnement urbain répartit l'énergie disponible. Afin d'étudier cette répartition, une approche conceptuelle communément utilisée consiste à établir un bilan d'énergie (figure 1.4). Il s'agit d'établir l'équation énergétique d'une surface urbaine pour un élément tridimensionnel de l'environnement urbain. Ce schéma de répartition des flux en milieu urbain se base sur le fait que l'énergie reçue par l'élément urbain est égale à la somme de l'énergie réémise par cet élément d'une part, et de l'énergie stockée à l'intérieur de cet élément d'autre part. L'équation, exprimée en densité de flux W.m^{-2}, est la suivante [Oke, 1987] (voir [Pigeon, 2007] pour une mise en équation détaillée) :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \tag{1.1}$$

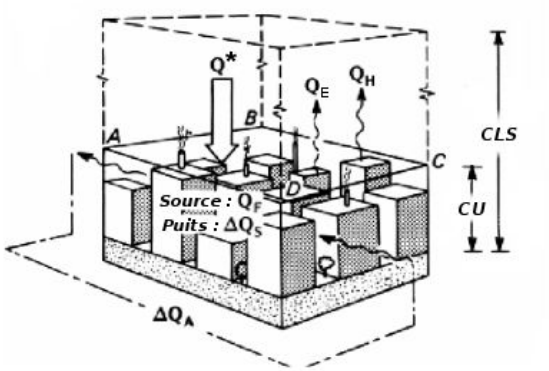


Figure 1.4 : *Représentation des termes présents dans l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de [Oke, 1987]).*

Avec Q^* le flux radiatif net, Q_F le flux de chaleur anthropique, Q_H le flux de chaleur sensible, Q_E le flux de chaleur latente, ΔQ_S terme de stockage d'énergie dans les matériaux urbains, ΔQ_A terme prenant en compte l'advection horizontale :

- Le flux radiatif net échangé Q^* correspond à la somme algébrique de l'ensemble des flux radiatifs existant entre la surface terrestre et l'atmosphère. Ce terme fait référence à l'apport principal d'énergie de la surface terrestre en période diurne. Cette équation différencie les flux à courtes longueurs d'ondes (CLO) d'une part, correspondant au rayonnement solaire (0,15 µm - 3,0 µm), et les flux à grandes longueurs d'ondes (GLO) d'autre part, correspondant au rayonnement infrarouge (3,0 µm - 100 µm) [Oke, 1987].

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \tag{1.2}$$

  Avec $K\downarrow$ le flux radiatif descendant à courte longueur d'onde, $K\uparrow$ le flux radiatif ascendant à courte longueur d'onde, $L\downarrow$ le flux radiatif descendant à grande longueur d'onde, $L\uparrow$ le flux radiatif ascendant à grande longueur d'onde.
- Le flux radiatif descendant CLO $K\downarrow$ correspond au rayonnement solaire incident. Ce terme intègre le rayonnement solaire direct et diffus.
- Le flux radiatif ascendant CLO $K\uparrow$ correspond au rayonnement CLO réfléchi par la surface terrestre. Il peut s'exprimer de la façon suivante :

$$K\uparrow = K\downarrow (1-\alpha) \tag{1.3}$$

  Avec α représentant l'albédo de la surface terrestre.

- Le flux radiatif descendant $L\downarrow$ correspond au rayonnement émis par les particules en suspension dans l'atmosphère (comme par exemple des gouttelettes d'eau, des poussières). L'énergie émise est fonction de la température d'air et peut être calculée via la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L\downarrow = \varepsilon_{atm}\sigma T_{atm}^4 \tag{1.4}$$

  Avec ε l'émissivité moyenne de l'atmosphère, σ la constante de Stefan-Boltzmann, T_{atm} la température moyenne de l'atmosphère.
- Le flux radiatif ascendant $L\uparrow$ correspond principalement au rayonnement émis par la surface terrestre en direction de l'atmosphère. Son expression est également régie par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$L\uparrow = \varepsilon_{surf}\sigma T_{surf}^4 + (1-\varepsilon_{atm})L\downarrow \tag{1.5}$$

  Le second terme de la partie droite de l'équation ci-dessus correspond au flux radiatif descendant GLO réfléchi.
- Le flux de chaleur sensible Q_H correspond au transport de chaleur qui s'établit entre la surface terrestre et l'atmosphère. Ce transport s'effectue du fait du brassage turbulent de l'air au sein de la couche limite de surface. Il peut s'exprimer de la façon suivante ([Erell *et al.*, 2011]) :

$$Q_H = \rho C_p k u^* T_{air} \tag{1.6}$$

  Avec ρ la densité de l'air, C_p la capacité calorifique de l'air, k la constante de von Karman, u^* la vitesse de frottement, et T_{air} la température de l'air.
- De la même manière, le flux de chaleur latente Q_E correspond au transport de vapeur d'eau qui s'effectue entre la surface terrestre et l'atmosphère. Il peut s'exprimer de la façon suivante ([Erell *et al.*, 2011]) :

$$Q_E = L_v E \tag{1.7}$$

  Avec L_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau et E le taux d'évapotranspiration. L'évapotranspiration correspond à la quantité de vapeur d'eau évaporée

au niveau des surfaces imperméables, ou dégagé par les sols naturels, les sols perméables et la végétation.

- Le terme ΔQ_S représente le stockage d'énergie dans les matériaux urbains.
- Le flux de chaleur anthropique Q_F désigne la chaleur produite par les activités humaines (transport, chauffage/climatisation, activités industrielles).
- ΔQ_A correspond à la prise en compte de l'advection horizontale. En effet, des masses d'air circulent à travers les parois verticales de l'élément tridimensionnel urbain. Le terme ΔQ_A correspond au flux énergétique relatif à ce phénomène.

Il est nécessaire de préciser les frontières de cet élément tridimensionnel urbain qui sert de support à l'équation (1.1). Cette équation est établie à l'échelle locale ou mésoclimatique, les dimensions de l'élément tridimensionnel sont donc du même ordre de grandeur [Erell *et al.*, 2011]. À ces échelles, les spécificités de la zone subjacente observables à l'échelle microclimatique ne sont pas détaillées, ce sont les caractéristiques moyennes de la zone étudiée qui sont prises en compte.

La limite basse de l'élément tridimensionnel est difficile à déterminer avec précision. En effet, l'épaisseur du sous-sol urbain qui interagit avec l'air dans la canopée urbaine varie de quelques centimètres à plusieurs mètres en fonction des matériaux présents et de l'échelle de temps considérée. La limite haute se situe idéalement dans la sous-couche d'équilibre, c'est à dire dans la zone où les flux turbulents sont spatialement homogènes et représentatifs de la zone subjacente.

1.2.5 Causes de l'îlot de chaleur urbain

Augmentation du flux radiatif net

La ville est constituée de bâtiments et d'éléments végétaux de plusieurs mètres de hauteur, de fait sa morphologie est qualifiée de tridimensionnelle. Afin de décrire simplement cette morphologie, le concept de canyon urbain – ou rue canyon – a été introduit [Oke, 1987]. Ce concept théorique correspond à une rue de longueur infinie bordée de part et d'autre par une rangée de bâtiments. Par extension, ce terme désigne également le volume d'air compris entre le sol et la partie supérieure des bâtiments et de la végétation. Dans un contexte de modélisation numérique, certains travaux de recherche utilisent une représentation de la ville correspondant à une répétition de canyons urbains [Masson, 2000].

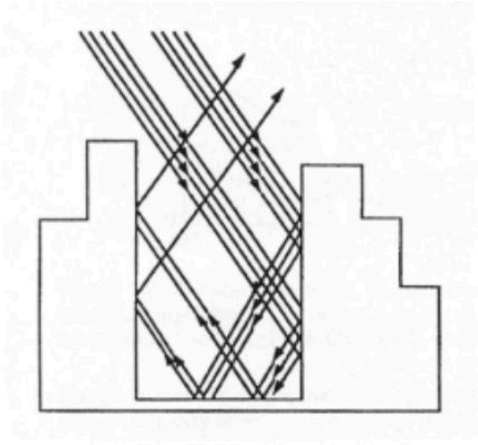


Figure 1.5 : *Illustration du phénomène de piégeage radiatif dans le cas d'une rue canyon ([Ringenbach, 2004], adapté de [Estournel, 1982]).*

Cette morphologie tridimensionnelle est en partie responsable de l'augmentation du flux radiatif net (Q^*). Les flux radiatifs descendants CLO et GLO sont progressivement absorbés du fait des multi-réflexions s'effectuant entre les différentes parois verticales et horizontales du canyon urbain (figure 1.5). Ce phénomène porte le nom de piégeage radiatif ([Bouyer, 2009]). D'un point de vue thermique, la morphologie tridimensionnelle de la ville offre une plus grande surface d'échange et d'absorption qu'une surface plane. Par ailleurs, excepté les toits des bâtiments, la proportion de ciel visible par les parois verticales et horizontales du canyon urbain est réduite, ce qui diminue les flux radiatifs ascendants GLO. En outre, la présence d'arbres peut entraîner des effets de masque solaire à l'échelle de la rue et influer sur le bilan radiatif des surfaces urbaines alentours.

Afin d'étudier le lien entre morphologie urbaine et température d'air, deux indicateurs sont utilisés [Erell *et al.*, 2011].

– Le premier indicateur est le rapport d'aspect (Aspect Ratio (AR) en anglais). Il donne une information morphologique concernant la section du canyon urbain. Dans le cas d'un canyon parfait, il se définit de la façon suivante :

$$AR = \frac{h}{w} \tag{1.8}$$

Avec h la hauteur des bâtiments de part et d'autre de la rue, et w la largueur de la rue. Dans le cas d'une rue où la hauteur des bâtiments et la largueur de la rue

varient, des valeurs moyennes de h et w sont calculées. À plus grande échelle, le calcul du rapport d'aspect peut être exprimé par la relation [Masson, 2000] :

$$AR = 0,5\frac{S_{vertical}}{S_a - S_{bati}} \tag{1.9}$$

Avec $S_{vertical}$ la somme de toutes les surfaces verticales de la zone de calcul, S_a l'aire de la zone de calcul et S_{bati} la somme de toutes les zones occupées par des bâtiments dans la zone de calcul.

– Le second indicateur est le facteur de vue du ciel (Sky View Factor (SVF) en anglais). Il représente la proportion de ciel visible en un point particulier du canyon urbain. Dans le cas d'un canyon parfait, le SVF calculé au centre de la rue se définit de la façon suivante (cf [Erell *et al.*, 2011]) :

$$SVF = \cos\beta \tag{1.10}$$

Avec

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{h}{0,5w}\right) \tag{1.11}$$

Un autre phénomène influant le flux radiatif net est la pollution atmosphérique présente au niveau de la Couche Limite Urbaine. Celle-ci a deux conséquences principales ([Gartland, 2008]). D'une part, elle a tendance à réduire le flux radiatif descendant CLO, car une partie du rayonnement solaire est stoppée par cette pollution atmosphérique. D'autre part, cette pollution atmosphérique capte une partie du flux radiatif ascendant GLO, en partie réémise vers la surface terrestre, augmentant le flux radiatif descendant GLO.

Diminution de la convection

À proximité de la surface terrestre, le vent adopte un profil vertical logarithmique. À l'échelle mésoclimatique, le vent régional est modifié en présence d'une zone urbaine. Les bâtiments et autres éléments de rugosité urbains s'opposent à l'écoulement de l'air, modifiant le profil vertical de vent (figure 1.6). La vitesse du vent en milieu urbain est plus faible par rapport aux zones dites dégagées (plaines, plans d'eau), de l'ordre de

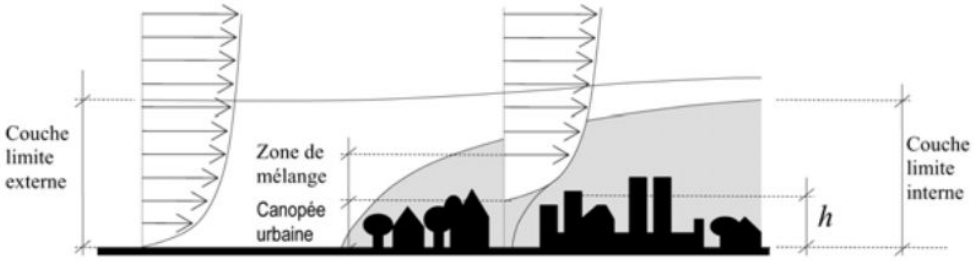


Figure 1.6 : *Représentation de profils de vent verticaux en zone urbaine et en zone dégagée [Plate et Kiefer, 2001].*

50% à 60% [Gartland, 2008] [Bouyer, 2009]. Le profil de vent en fonction de l'altitude, noté $u(z)$, peut s'exprimer de la façon suivante [Oke, 1987] :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \tag{1.12}$$

Avec u^* la vitesse de frottement, k la constante de von Karman, z l'altitude à laquelle le calcul est effectué, z_d la hauteur de déplacement (zero plane displacement en anglais) et z_0 la longueur de rugosité (roughness length en anglais). La longueur de rugosité z_0 exprime l'effet de la rugosité de la surface terrestre sur le profil de vent. Il existe plusieurs méthodes de calcul de z_0. De façon empirique, elle peut se définir en fonction de la hauteur des bâtiments [Grimmond et Oke, 1999] [Oke, 2004] :

$$z_0 = 0,7H \tag{1.13}$$

En présence d'une forte densité d'éléments de rugosité de grande hauteur (comme en milieu urbain), il est nécessaire de modifier le niveau de référence du profil de vent logarithmique d'une certaine valeur. Cette dernière correspond à la hauteur de déplacement z_d. De même, il existe plusieurs méthodes de calcul de z_d. De façon empirique, elle peut se définir comme [Grimmond et Oke, 1999] :

$$z_d = 0,1H \tag{1.14}$$

Une correspondance a été établie entre les valeurs de z_0, le type d'écoulement d'air et les caractéristiques de l'environnement d'étude à l'échelle mésoclimatique. Cette étude a abouti à une classification de la rugosité effective du terrain (effective terrain

Classe de rugosité	Longueur de rugosité	Description
1	0.0002	Mer ou lac dégagé (indépendamment de la taille des vagues), estran, plaine couverte de neige, désert sans relief, goudron et béton.
2	0.005	Surface terrestre sans relief, sans obstacles notables et pratiquement sans végétation, par exemple une plage ou un marais.
3	0.03	Paysage présentant une végétation basse (par exemple de l'herbe) et des obstacles isolés, séparés entre eux d'environ 50 fois la hauteur des obstacles (par exemple des pâturages sans brise-vent, un paysage de landes ou de tundra).
4	0.10	Zone naturelle ou cultivée comprenant des plantes ou des cultures de faible hauteur. Zone relativement dégagée présentant des obstacles occasionnels (par exemple des haies de faible hauteur, des bâtiments bas ou des arbres) séparés d'environ 20 fois la hauteur des obstacles.
5	0.25	Zone naturelle ou cultivée comprenant des cultures hautes ou de hauteurs variées, et des obstacles épars, séparés de 12 à 15 fois la hauteur des obstacles pour les objets poreux (par exemple des brise-vent végétaux) ou de 8 à 12 fois la hauteur des obstacles pour les objets solides (par exemple des bâtiments de faible hauteur).
6	0.5	Paysage cultivé de façon intensive présentant de nombreux groupes d'obstacles de taille importante (par exemple de grandes fermes, ou des bosquets) séparés par des espaces dégagés d'environ 8 fois la hauteur des obstacles. Grands végétaux présentant une faible densité spatiale (par exemple un verger ou une jeune forêt). Zone partiellement couverte par des bâtiments bas espacés d'environ 3 à 7 fois la hauteur des bâtiments, et sans grands arbres.
7	1.0	Paysage couvert de façon régulière par de grands obstacles de taille similaire, avec des espaces dégagés du même ordre de grandeur que la hauteur des obstacles (par exemple une forêt régulière à maturité). Zone densément bâtie sans variation importante du point de vue de la hauteur de bâtiments.
8	> 2	Centre ville alternant bâtiments hauts et bâtiments bas. Grandes forêts comprenant des arbres de tailles variées et des clairières.

Table 1.1 : *Classification de la rugosité effective du terrain, adapté de [Davenport* et al.*, 2000].*

roughness class en anglais) (table 1.1) [Davenport *et al.*, 2000]. Celle-ci souligne que les faibles valeurs de z_0 correspondent à des morphologies rurales dégagées tandis que les fortes valeurs de z_0 correspondent à des morphologies urbaines denses.

L'effet global de cette modification de l'écoulement de l'air est la limitation les échanges thermiques par convection entre l'air et les surfaces urbaines ([Oke, 1987]). Ainsi, ce phénomène favorise le stockage thermique dans les matériaux urbains.

À l'échelle mésoclimatique, un phénomène de brise urbaine d'origine thermique peut se développer dans des conditions météorologiques de vent faible et de faible nébulosité [Erell *et al.*, 2011]. Au niveau de la zone chaude de l'agglomération, les masses d'air chaud s'élèvent, entraînant un phénomène de converge de l'air alentour. Ainsi, cette brise est dirigée de la périphérie vers le centre dans la couche limite de canopée urbaine, et du centre vers la périphérie dans la partie haute de la couche limite urbaine.

La morphologie tridimensionnelle urbaine entraîne également un régime d'écoulement de l'air particulier aux échelles locales et microclimatiques ([Oke, 1987]). À l'échelle d'un bâtiment, l'écoulement du vent crée différentes zones de surpression, de dépression, de décollement et de recirculation. La configuration des rues peut également canaliser l'écoulement d'air, l'accélérer ou le ralentir. Par ailleurs, la présence d'arbres peut faire office de brise vent. La grande taille, la grande densité et la disposition aléatoire des éléments de rugosité modifient les vitesse et direction du vent à l'échelle de quelques mètres. Ainsi l'écoulement dans la canopée urbaine peut être qualifié de fortement perturbé.

Augmentation du stockage thermique dans les matériaux urbains

La surface terrestre stocke puis restitue l'énergie reçue via des échanges radiatifs et convectifs. Les espaces urbains et ruraux présentent des matériaux de natures dissemblables, or il s'avère que les propriétés thermiques et radiatives des matériaux urbains sont très différentes de celles des matériaux naturels présents dans les zones non urbanisées.

La conductivité thermique notée λ et la capacité thermique volumique notée C_v sont deux propriétés thermiques importantes pour comprendre l'augmentation du stockage thermique en milieu urbain. Prenant en compte ces deux grandeurs physiques,

Matériau	Effusivité thermique ($J.m^{-2}.s^{-0.5}.K^{-1}$)
Tourbière sèche	186
Sol argileux sec	596
Sol sableux sec	620
Tourbière humide	1418
Eau	1543
Sol argileux humide	2213
Sol sableux humide	2552
Brique	1066
Verre	1108
Asphalte	1206
Tuile d'argile	1219
Béton dense	1785
Pierre	2220
Acier	14473

Table 1.2 : *Valeurs d'effusivité thermique pour différents matériaux urbains et ruraux calculées à partir des données issues de [Gartland, 2008].*

l'effusivité thermique μ décrit la capacité d'un matériau à absorber et restituer une puissance thermique. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$\mu = \sqrt{\lambda C_v} \tag{1.15}$$

Les matériaux urbains ont une effusivité thermique supérieure aux matériaux naturels sec (table 1.2). En l'absence de précipitation, ils sont donc plus en mesure de stocker l'énergie reçue que les matériaux naturels. Cependant, l'effusivité des matériaux naturels augmente significativement lorsque le taux d'humidité augmente. En période humide, les effusivités des matériaux des zones urbaines et rurales sont du même ordre de grandeur (table 1.2). Ces variations d'effusivité en zone rurale mettent en évidence le fait que les propriétés physiques des matériaux naturels constituent un facteur de contrôle de l'amplitude de l'ICU ([Stewart, 2011]).

De la même manière, l'albédo et l'émissivité sont des paramètres radiatifs importants dans l'étude de l'influence des matériaux urbains sur le climat urbain. À l'échelle locale et mésoclimatique, l'albédo effectif correspond à la réflectivité solaire d'une surface terrestre hétérogène ou non plane [Bouyer, 2009]. Il évolue en fonction des saisons, et a tendance à diminuer en période humide. À cette échelle, les matériaux urbains et ruraux présentent des valeurs d'émissivité relativement proches (table 1.3)

Matériau	Albédo (-)	Emissivité (-)
Sols	0.05 - 0.40	0.90 - 0.98
Herbe	0.16 - 0.26	0.90 - 0.95
Champs agricoles	0.18 - 0.25	0.90 - 0.99
Forêts	0.15 - 0.20	0.97 - 0.98
Eau	0.03 - 0.10	0.92 - 0.97
Neige	0.30 - 0.45	0.92 - 0.97
Zone urbaine	0.10 - 0.27	0.85 - 0.96
Moyenne zone urbaine	0.15	0.95

Table 1.3 : *Valeurs d'albédo et d'émissivité pour différents matériaux urbains et naturels (adapté de [Oke, 1987]).*

tandis que l'albédo effectif d'une zone urbaine est en moyenne légèrement plus faible que l'albédo effectif d'une zone rurale. Les propriétés optiques des matériaux, comme la rugosité et la couleur, influent sur la capacité de stockage des matériaux urbains, de même que la disposition spatiale des matériaux urbains et l'orientation des rues.

Du fait de leurs propriétés thermiques, optiques et radiatives, les matériaux urbains stockent plus aisément la chaleur que les matériaux ruraux en période sèche. De fait le terme ΔQ_S est plus élevé en milieu urbain. Ce stockage thermique contribue à augmenter la température de surface de la ville, et conséquemment la température d'air.

Réduction de l'évapotranspiration

Les matériaux urbains sont en grande majorité imperméables, et par conséquent, l'environnement urbain l'est également. En cas de précipitations, l'eau est rapidement évacuée, et les matériaux urbains ne stockent l'eau qu'en surface. Celle-ci s'évapore rapidement entraînant un bref rafraîchissement de l'air. En milieu rural, la plupart des matériaux sont perméables. L'eau s'infiltre et est stockée dans les matériaux, pour être ensuite lentement relarguée par évaporation en l'espace de quelques jours ([Erell *et al.*, 2011]). De fait, le flux de chaleur latente (Q_E) est fréquemment plus important en zone rurale qu'en zone urbaine.

L'évaporation en milieu urbain est généralement faible comparativement au milieu rural. Cependant certains dispositifs comme les bassins, fontaines et jets d'eau possèdent un pouvoir rafraîchissant de l'air environnant, car la chaleur latente de vaporisation de l'eau est élevée. Par ailleurs, l'environnement urbain est très peu

végétalisé en comparaison du milieu rural, or la végétation possède également un potentiel rafraîchissant. En effet, un végétal émet simultanément de la vapeur d'eau via évaporation et transpiration, phénomène qui porte le nom d'évapotranspiration. Si un arbre est bien irrigué, il peut dégager jusqu'à 0.378 m^3 d'eau par jour, soit un potentiel de refroidissement de 26,7 kWh par jour [Bouyer, 2009].

Conséquemment, la température d'air dans les parcs urbains est plus basse que dans les zones urbanisées environnantes, au point que certains auteurs utilisent le terme d'îlots de fraîcheur ([Erell *et al.*, 2011]). De l'intérieur du parc vers l'intérieur des zones urbanisées, la température évolue à raison de quelques dixièmes de degrés par hectomètre [Bouyer, 2009]. Le potentiel rafraîchissant des parcs urbains a fait l'objet de plusieurs publications [Spronken-Smith *et al.*, 2000] [Yu et Hien, 2006] [Robitu *et al.*, 2006] [Oliveira *et al.*, 2011]. Elles révèlent notamment que le comportement climatique d'un parc varie selon la nature de celui-ci. Un parc irrigué et densément planté présentera un îlot de fraîcheur diurne - grâce à l'évapotranspiration et aux ombres portées, tandis qu'un parc sec et faiblement planté présentera un îlot de fraîcheur nocturne - du fait d'un SVF élevé favorisant le flux radiatif GLO ascendant [Erell *et al.*, 2011].

Augmentation du flux de chaleur anthropique

Le flux de chaleur anthropique désigne une production de chaleur induite par les activités humaines. Les bâtiments, les processus industriels, les moyens de transports motorisés ainsi que les humains eux mêmes sont considérés comme des sources de chaleur anthropique. Du fait de la concentration de population et d'activités, le flux de chaleur anthropique (Q_F) est plus important en zone urbaine qu'en zone rurale. Il est particulièrement significatif dans les zones industrielles. Le flux de chaleur anthropique connaît des cycles journaliers, hebdomadaires et saisonniers. Il est plus important en période diurne (resp. durant les jours ouvrés) qu'en période nocturne (resp. que durant les jours non ouvrés). Il est plus élevé en période hivernale qu'en période estivale, du fait des dissipations thermiques dues au chauffage des bâtiments ([Erell *et al.*, 2011]). Cependant, le flux de chaleur anthropique tend à augmenter en période estivale du fait de la généralisation de la climatisation.

La quantification du flux de chaleur anthropique est complexe, du fait de l'impossibilité de mesurer de façon directe la totalité de ce flux. Un travail de recherche

important a récemment été réalisé sur la méthodologie et les modèles de calcul de ce flux anthropique [Offerle *et al.*, 2005] [Pigeon *et al.*, 2007] [Sailor, 2011].

1.2.6 Processus dynamique de formation de l'îlot de chaleur urbain

Le cycle journalier du phénomène d'îlot de chaleur urbain peut se présenter en deux temps, à savoir la période diurne puis la période nocturne [Pigeon, 2007]. En période diurne, la ville capte fortement le flux radiatif descendant CLO du fait de sa morphologie. De plus, le flux radiatif descendant GLO est légèrement renforcé par la pollution atmosphérique. La morphologie urbaine limite l'écoulement d'air et donc les échanges convectifs. Du fait du fort taux d'imperméabilité de l'environnement urbain et de la présence limitée de la végétation, le flux de chaleur latente est très réduit comparativement au milieu non urbanisé. Les caractéristiques des matériaux urbains utilisés favorisent un fort stockage thermique. L'énergie reçue via les flux radiatifs descendants est ainsi stockée dans les matériaux et dissipée via le flux de chaleur sensible. De plus, la production de chaleur anthropique, plus importante en milieu urbain qu'en milieu rural, tend à faire augmenter la température d'air.

En période nocturne, le flux radiatif ascendant GLO est limité en milieu urbain, de par la morphologie tridimensionnelle de la ville. De même, l'écoulement d'air étant ralenti, le refroidissement de l'environnement urbain par convection est limité. La chaleur accumulée dans les matériaux urbains durant la journée est progressivement restituée dans l'air par convection au cours de la nuit. À l'inverse, le milieu rural se refroidit de façon beaucoup plus rapide. Le flux radiatif ascendant GLO est très développé, notamment grâce à des valeurs de SVF élevée. La morphologie de cet environnement est propice à des vitesses de vent plus élevées au contact de la surface terrestre, et donc à des échanges convectifs plus importants. Le refroidissement des matériaux ruraux est d'autant plus favorisé que de par leurs caractéristiques physiques, ils déstockent plus aisément leur charge thermique que les matériaux urbains.

Les milieux urbains et ruraux présentent des dynamiques de refroidissement qui diffèrent en période nocturne. Ainsi, l'amplitude de l'ICU est plus grande en période nocturne qu'en période diurne [Arnfield, 2003]. Cette différence dynamique est à l'origine de l'écart de température observé entre ces deux environnements, et donc à l'origine du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

1.3 Modèles de simulation du climat urbain

Les modèles numériques ont pour objectif d'améliorer la compréhension du climat urbain, et pour ce faire tentent de reproduire tout ou partie du fonctionnement de celui-ci. Ils visent également à évaluer les bénéfices – en matière de climat et de confort thermique – que pourraient apporter différents scénarii architecturaux et urbanistiques.

Il est possible de classer les modèles existants en deux groupes selon leur nature. D'une part les modèles physiques, qui visent à résoudre un système d'équation. Ce dernier représente l'équilibre énergétique résultant des transferts de chaleur existant en milieu urbain [Gartland, 2008]. D'autre part les modèles empiriques, qui établissent des lois de comportement du climat urbain sur la base d'observations et de mesures. Les modèles empiriques englobent les algorithmes statistiques, les paramétrisations, les formules d'ingénierie et les conceptualisations qualitatives [Svensson *et al.*, 2002]. Certains modèles étudient spécifiquement une variable climatique en particulier (par exemple le vent ou la température d'air), d'autres se focalisent sur certains flux de l'équation énergétique urbaine. Les échelles d'étude des modèles existants varient de l'échelle microclimatique à l'échelle mésoclimatique, soit de l'échelle du bâtiment à l'échelle de la région.

Les modèles numériques ne peuvent prendre en compte toute la complexité de l'environnement urbain. En effet, la morphologie urbaine est complexe et les matériaux utilisés sont très divers. En outre, le traitement de la végétation est également un sujet complexe. Ainsi, les modèles numériques de climat urbain sont une représentation simplifiée du milieu urbain réel [Erell *et al.*, 2011]. Par ailleurs, les nombreux paramètres d'entrée des modèles sont parfois eux mêmes l'expression d'une simplification du cas réel. En règle générale, les entrées des modèles sont de trois types, à savoir les paramètres pour décrire le site étudié – concernant aussi bien le bâti que la végétation urbaine, les variables nécessaires pour alimenter le modèle (variables de forçage) et les conditions initiales pour débuter le calcul [Baklanov *et al.*, 2009].

Une sélection de modèles est présentée dans les paragraphes suivants (voir [Piringer *et al.*, 2002], [Arnfield, 2003], [Masson, 2006], [Hidalgo *et al.*, 2008], [Grimmond *et al.*, 2010b] pour des revues bibliographiques traitant de la modélisation du climat urbain aux échelles mésoclimatiques et inférieures).

1.3.1 Échelles microclimatique et locale

Cette échelle permet une étude détaillée du climat à l'échelle d'une rue ou d'un quartier. Ces modèles investiguent la relation entre un fragment bâti et son microclimat en reproduisant les interactions entre les surface bâties, la végétation et l'atmosphère. Une grande partie des modèles concernant cette échelle sont des modèles physiques.

L'une des approches utilisées à cette échelle est l'utilisation de modèles de CFD (Computational Fluid Dynamic). Cette approche est utilisée pour étudier les mouvements d'air autour des bâtiments, le confort piéton vis-à-vis du vent, la dispersion de la pollution de l'air ainsi que les effets de la végétation sur le climat urbain [Erell *et al.*, 2011]. Les modèles numériques utilisant l'approche CFD exigent un haut degré de précision pour ce qui est des données d'entrée. Du fait de leur coût important en termes de temps de calcul, ils fournissent des résultats sur une durée allant d'un à plusieurs jours au maximum.

L'un d'entre eux est le modèle tridimensionnel ENVI-met [Bruse et Fleer, 1998] [Bruse, 2004]. Ses calculs se basent sur les lois fondamentales de la mécanique des fluides et de la thermodynamique. Il se compose d'un modèle qui résout les équations d'écoulement de l'air (modèle aéraulique) ainsi que d'un modèle de sol, d'un modèle de surface et d'un modèle de végétation. ENVI-met prend en charge l'écoulement du vent autour et entre les bâtiments, les échanges thermo-hydriques à la surface des éléments de rugosité, la turbulence, les échanges avec la végétation, le confort thermique et la dispersion de polluants. Sa résolution spatiale varie entre 0,5 mètres et 10 mètres et sa résolution temporelle est de 10 secondes. Du fait de cette très haute résolution spatiale, ce modèle est capable de prendre en compte les détails de la morphologie urbaine (balcons, terrasses). Cependant, la taille maximale de la zone d'étude est de 1 kilomètre carré, et il est donc impossible d'envisager modéliser une ville entière.

Le modèle Solene-microclimat concerne également les échelles microclimatique et locale. Il s'agit d'un modèle tridimensionnel qui traite également des problématiques de confort thermique extérieur, d'ensoleillement et d'éclairage naturel. Il se compose de différents modèles [Vinet, 2000] [Robitu, 2005] [Bouyer, 2009] [Malys, 2012]. Le modèle radiatif prend en compte le flux radiatif descendant CLO et calcule les inter-réflexions CLO entre les éléments de rugosité ainsi que les échanges GLO entre les éléments de la scène urbaine. Le modèle thermique de bâtiment prend en compte les transferts

thermiques entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments. Il permet ainsi d'estimer la consommation énergétique de ces derniers. Le modèle Solene-microclimat est couplé avec le modèle thermo-aéraulique Code Saturne basé sur un code de calcul numérique de mécanique des fluides. Comme pour ENVI-met, Code Saturne résout les équations d'écoulement de l'air, notamment afin d'évaluer le transport et la diffusion des chaleurs sensible et latente.

1.3.2 Échelles locale et mésoclimatique

Modèles de bilan énergétique d'une surface urbaine

Aux échelles locale et mésoclimatique, de nombreux modèles utilisent le bilan énergétique d'une surface urbaine. Ils ont la particularité de pouvoir être couplés avec des modèles atmosphériques globaux.

Il existe dans ce cas une grande variété d'approches de modélisation (table 1.4). D'abord, les modèles diffèrent dans la façon dont ils prennent en compte l'environnement bâti. Les modèles de type dalle (slab en anglais) considèrent l'environnement urbain comme une dalle urbaine à laquelle ils attribuent des propriétés physiques spécifiques. D'autres modèles, dits de canopée urbaine [Masson, 2006], modélisent les bâtiments en 3 dimensions, possèdent des équations séparées pour les toits, les murs et les routes, et traitent explicitement les interactions radiatives entre les routes et les murs. Il existe deux types de modèles de canopée urbaine, à savoir les modèles simple couche et les modèles multi-couches. Les modèles simple couche utilisent une température d'air et une humidité uniformes à l'intérieur de la rue canyon, tandis que les modèles multi-couches modélisent plusieurs couches d'air à l'intérieur du canyon urbain afin de traiter les équations énergétiques à différentes hauteurs.

Par ailleurs, le traitement de la végétation urbaine varie fortement entre les modèles. Une partie de ceux-ci ne prennent pas en compte la végétation. Dans la réalisation des calculs, certaines modélisations considèrent la végétation urbaine comme étant une surface séparée du reste de l'environnement urbain. Dans ce cas, la modélisation se déroule indépendamment dans chacune des tuiles urbaines, la réunion de ces tuiles représentant l'ensemble de l'environnement urbain. Plusieurs autres approches incluent la végétation dans la description de l'environnement urbain afin de prendre en compte les interactions existant entre la végétation et le bâti.

Nom	Publications	Type de modèle	Végétation	Flux de stockage	Orientation des rues	Ombres portées	Flux anthropique	Inter-réflexions
Building Effect Parameterization	[Martilli *et al.*, 2002]	Multi-couches	Séparée	Diffusion	Oui	Façades et rues	Partiellement modélisé	Multiple
Community Land Model	[Oleson *et al.*, 2008b] [Oleson *et al.*, 2008a]	Simple couche	Séparée ou intégrée	Diffusion	Non	Façades	Donnée d'entrée	Multiple
Green Cluster Thermal Time Constant Model	[Shashua-Bar et Hoffman, 2002] [Shashua-Bar et Hoffman, 2004]	Simple couche	Intégrée	Flux radiatif	Oui	Façades	Donnée d'entrée	Multiple
Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme	[Grimmond *et al.*, 1991] [Grimmond et Oke, 2002] [Offerle *et al.*, 2003]	Simple couche	Intégrée	Modèle empirique	Non	Aucune		Simple
Met-Office Reading Urban Surface Exchange Scheme	[Harman *et al.*, 2004b] [Harman *et al.*, 2004a] [Porson *et al.*, 2010b] [Porson *et al.*, 2010a]	Simple couche	Séparée	Diffusion	Non	Aucune	Inclus dans Q_H	Multiple
Multi-layer Urban Canopy Model	[Kondo *et al.*, 2005]	Multi-couches	Intégrée	Conduction	Non	Partielles	Modélisé	Double
Noah land surface model/Single-layer Urban Canopy Model	[Kusaka *et al.*, 2001] [Chen *et al.*, 2004]	Simple couche	Séparée	Diffusion	Oui		Modélisé	Simple
Soil Model for Submesoscales Urbanized	[Dupont *et al.*, 2004] [Dupont et Mestayer, 2006] [Dupont *et al.*, 2006]	Dalle	Séparée ou intégrée	Flux radiatif et Conduction	Oui	Partielles	Donnée d'entrée	Infinie

Slab Urban Energy Balance Model	[Fortuniak, 2003]	Dalle	Non traitée	Diffusion	Non	Aucune	Inclus dans Q_H	Simple
Simple Urban Energy Balance Model for Meso-Scale Simulation	[Kanda *et al.*, 2005b] [Kanda *et al.*, 2005a]	Multi-couches	Séparée	Diffusion	Oui			Multiple
Town Energy Balance	[Masson, 2000] [Masson *et al.*, 2002] [Lemonsu *et al.*, 2004]	Simple couche	Séparée	Diffusion	Non	Aucune	Partiellement modélisé	Infinie
Temperature for Urban Facets 3D	[Krayenhoff et Voogt, 2007]	Multi-couches	Non traitée	Diffusion	Oui	Façades et rues	Partiellement modélisé	Multiple
Vegetated Urban Canopy Model	[Lee et Park, 2008]	Simple couche	Intégrée	Diffusion	Non		Donnée d'entrée	Triple

Table 1.4 : *Caractéristiques de modélisation d'une sélection de modèles utilisant l'équation énergétique d'une surface urbaine (adapté de [Grimmond* et al.*, 2009])*

La méthode de prise en compte du flux de chaleur stocké dans les matériaux urbains change également d'un modèle à l'autre. Selon les modèles, ce flux est calculé en prenant en compte la conduction thermique à travers les matériaux urbains, estimé à partir du flux radiatif net ou plus simplement considéré comme appartenant au résidu de l'équation énergétique d'une surface urbaine.

Enfin, les modèles se différencient à travers une multitude de choix de modélisation, comme par exemple la prise en compte de l'orientation des rues et des ombres portées, le calcul du flux de chaleur anthropique, ou encore le nombre d'inter-réflexions à considérer pour la représentation du phénomène de piégeage radiatif.

Une large étude comparative a été réalisée pour une trentaine de modèles afin de comparer les résultats issus des modélisations à l'échelle locale avec des relevés expérimentaux [Grimmond *et al.*, 2010a] [Grimmond *et al.*, 2011]. Les données d'observations utilisées – le flux radiatif net, le flux de chaleur sensible et flux de chaleur latente – ont été recueillies pendant deux campagnes de mesure à l'aide de capteurs situés au dessus de la sous couche de rugosité. L'étude s'est déroulée en quatre phases. Au fur et à mesure des phases, les équipes de modélisateurs ont eu accès à des informations de plus en plus précises et détaillées concernant la zone à modéliser, le but étant notamment d'estimer l'impact de la précision des données d'entrée sur les performances des modèles. À chaque phase, les différentes équipes participant à ce benchmark ont fourni le flux radiatif net, le flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latente et le flux net de stockage de chaleur.

Les résultats de cette étude indiquent qu'en règle générale, les modèles atteignent leurs meilleures performances pour le calcul du flux radiatif net, tandis que le flux de chaleur latente est moins bien représenté. Aucun des modèles participant au comparatif ne se place en tête des performances pour les quatre flux étudiés, cependant certains types de modèle sont plus performants sur un flux en particulier. En outre, les modèles performants en période diurne ont tendance à être moins précis en période nocturne.

Les plus grands écarts apparaissent pour des modèles qui traitent différemment la végétation et les inter-réflexions. L'absence de prise en compte de la végétation mène à des performances médiocres pour tous les flux en période diurne, et pour le flux de chaleur latente en période nocturne. Par ailleurs, les modèles prenant en compte l'orientation de la morphologie urbaine sont un peu plus performants que les autres modèles. De même, la prise en compte de l'albédo et de l'émissivité

des matériaux urbains permet d'obtenir de bons résultats pour tous les flux en période diurne. Globalement, il s'avère que les modèles simples (nombre limité de variables d'entrée, représentation simplifiée des phénomènes physiques) et les modèles complexes (nombre important de variables d'entrée, représentation détaillée des phénomènes physiques) présentent des performances comparables.

Modèles n'utilisant pas de bilan énergétique

Les modèles n'établissant pas un bilan énergétique sont en majorité des modèles empiriques basés sur des approches statistiques. Parmi ces dernières, la régression linéaire multiple est souvent utilisée. La table 1.5 présente quelques-unes des nombreuses études utilisant une régression linéaire multiple dans le but d'étudier les corrélations entre une grandeur relative à la température d'air et différents paramètres.

Il s'avère que les grandeurs modélisées ainsi que les indicateurs utilisés diffèrent d'un modèle à l'autre. La différence de température entre un site urbain et un site rural ainsi que la température d'air elle-même sont deux grandeurs communément retenues pour les régressions. Par ailleurs, chaque étude sélectionne entre un et une dizaine d'indicateurs urbains afin de réaliser les régressions. Certains de ces indicateurs – par exemple l'occupation du sol – sont calculés relativement à une surface. Celle-ci peut correspondre au territoire inclus dans un rayon donné autour du point de mesure, ou encore à l'une des cellules issue d'un maillage du territoire. Deux catégories d'indicateurs sont souvent présentes dans les régressions, à savoir les indicateurs relatifs à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol. Au sein de ces catégories, le SVF et les fractions de surface bâtie et végétalisée semble être particulièrement utilisés.

En outre, les formulations de ces modèles sont diverses. Certains modèles présentent des formulations simples, comme celles proposées par Oke qui introduit des expressions empiriques simplifiées de l'ICU établies à partir de relevés expérimentaux [Oke, 1987]. La première d'entre elles relie l'amplitude de l'ICU $\Delta T_{urb-rur}$ à la population de la ville concernée :

$$\Delta T_{urb-rur} = \frac{Pop^{0,27}}{4\overline{u}^{0,56}} \tag{1.16}$$

Avec $\overline{u}$ la vitesse de vent régional non urbain à 10 mètres et Pop la population de la ville.

Publications	Grandeurs modélisées	Indicateurs morphologiques	Indicateurs d'occupation du sol	Autres indicateurs
[Oke, 1987]	Différence de température Urbain - Rural			- Population - Vitesse du vent
[Oke, 1987]	Différence de température Urbain Rural	- Rapport d'aspect		
[Bottyán et Unger, 2003]	Amplitude maximale de l'ICU	- FVC - Hauteur moyenne des bâtiments	- Fraction de surface bâtie - Fraction de surface d'eau libre	
[Eliasson et Svensson, 2003]	Température d'air journalière Température d'air mensuelle Température d'air saisonnière	- FVC	- Fraction de surface végétalisée - Fraction de surface imperméable - Fraction de surface bâtie - Fraction de surface d'eau libre	- Distance au centre ville - Altitude - Distance à la mer
[Szymanowski et Netzel, 2004]	Température d'air	- Classe de rugosité moyenne	- Moyenne du NDVI	- Moyenne des émissions de chaleur artificielles
[Alcoforado et Andrade, 2006]	Différence de température Urbain - Aéroport		- Fraction de surface végétalisée - Fraction de surface bâtie - Fraction de surface d'eau libre	- Altitude - Altitude relative - Rapport d'aspect × Fraction de surface bâtie - Longitude - Orientation des rues - Distance à la rue principale
[Giridharan *et al.*, 2007]	Différence de température Urbain - Rural	- FVC	- Végétation inférieure à 1 m - Végétation supérieure à 1 m	- Vitesse du vent - Albédo de surface - Altitude - Distance à la mer - Ratio Fraction de surface bâtie non résidentielle sur Fraction de surface bâtie totale - Ratio Hauteur des bâtiments sur Fraction de surface bâtie - Localisation - Chaleur d'origine anthropique

[Montavez *et al.*, 2008]	Différence de température Urbain - Rural	- FVC		- Augmentation du flux radiatif GLO - Effusivité thermique
[Balázs *et al.*, 2009], [Unger *et al.*, 2011]	Différence de température Maille urbaine - Maille rurale		- Fraction de surface bâtie	- Distance à la frontière de l'agglomération
[Buttstädt *et al.*, 2010]	Différence de température Urbain - Rural	- Hauteur des bâtiments	- Fraction de surface bâtie - Nombre de bâtiments	
[Steeneveld *et al.*, 2011]	Différence de température Urbain Rural		- Fraction de surface végétalisée	
[Brandsma et Wolters, 2012]	Écart à la température moyenne	- FVC	- Fraction de surface bâtie - Fraction de surface d'eau libre	
[Heusinkveld *et al.*, 2014]	Température d'air		- Fraction de surface végétalisée - Fraction de surface bâtie - Fraction de surface d'eau libre	

Table 1.5 : *Grandeurs mesurées et indicateurs utilisés pour la construction de modèles n'utilisant pas l'équation énergétique urbaine*

Une seconde expression formule cette même amplitude en fonction du rapport d'aspect caractéristique de l'agglomération :

$$\Delta T_{u-r} = 7,54 + 3,97 \ \ln\left(\frac{H}{W}\right) \tag{1.17}$$

Dans le même esprit, Heusinkveld réalise une régression linéaire multiple à partir de mesures fixes et mobiles à Rotterdam [Heusinkveld *et al.*, 2014]. Cette régression lui permet de construire une carte de température nocturne estivale normalisée, sur la base de l'équation :

$$\frac{UHI}{UHI_{max}} = \frac{T_{urban} - T_{rural}}{T_{center} - T_{rural}} \tag{1.18}$$

Avec

$$T_{urban} = \beta_1 \varphi_{greenery} + \beta_2 \varphi_{built} + \beta_3 \varphi_{water} + C + \xi \tag{1.19}$$

Avec $\varphi_{greenery}$ la fraction de surface végétalisée, φ_{built} la fraction de surface bâtie et φ_{water} fraction de surface d'eau libre.

D'autres modèles ont des formulations plus complexe, par exemple en associant plusieurs indicateurs pour aboutir à un indicateur composé. Le modèle développé par Balazs [Balázs *et al.*, 2009] et Unger [Unger *et al.*, 2011] traite de ces différences de température d'air intra-urbaine et calcule la répartition moyenne annuelle de l'ICU sur la base de campagnes de mesures mobiles effectuées en parcourant un maillage carré de 500 mètres de côté. Le modèle empirique associe l'amplitude de l'ICU au pourcentage de surface bâtie des mailles urbaines et à la distance des mailles urbaines par rapport à la "frontière" de la ville. L'amplitude de l'ICU est définie comme étant la différence de température entre une maille urbaine et la maille rurale de référence :

$$\Delta T = T_{maille} - T_{maille\ (R)} \tag{1.20}$$

Pour chaque maille, trois coefficients relatifs à la fraction de surface bâtie sont calculés :

- B_0 = fraction de surface bâtie pour la maille concernée
- B_1 = fraction de surface bâtie moyenne pour les mailles adjacentes à la maille concernée (9 mailles)
- B_2 = fraction de surface bâtie moyenne pour une partie des mailles adjacentes aux 9 mailles précédentes (36 mailles)

Ces mailles sont ensuite classées selon leur fraction de surface bâtie. Dans le cas où $B_0 > 5\%$, la maille est considérée comme urbaine, dans le cas contraire est classée comme rurale. La distance à la frontière de l'agglomération, notée D, correspond à la distance entre la maille urbaine étudiée et la maille rurale la plus proche. Trois autres coefficients sont construits en combinant fraction de surface bâtie et distance à la frontière de l'agglomération :

- $B'_0 = B_0 ln(D)$
- $B'_1 = B_1 ln(D)$
- $B'_2 = B_2 ln(D)$

À l'issue de ce processus, l'équation du modèle est la suivante :

$$\Delta T = 0,001032B'_0 + 0,002455B'_1 + 0,002629B'_2 \tag{1.21}$$

En règle générale, l'ensemble de ces modèles présentent des résultats satisfaisants. Les corrélations entre grandeurs mesurées et indicateurs sont significatives, ce qui implique notamment que les indicateurs choisis sont pertinents dans le contexte d'une régression linéaire.

1.3.3 Synthèse

Les nombreux modèles utilisés pour simuler le climat urbain diffèrent de par leur approche, leur formulation et leur échelle d'application. Il s'avère que certains de ces modèles ne sont pas en adéquation avec les problématiques de l'aménagement urbain. Une partie de ces modèles numériques complexes nécessitent d'acquérir des compétences importantes en climatologie urbaine afin d'être utilisés à bon escient. Par ailleurs, les modèles simples – comme les modèles empiriques – ne sont parfois pas transposables d'une ville à l'autre. Cependant, le travail concernant la modélisation de l'îlot de chaleur urbain à destination des acteurs de la ville doit d'être poursuivi afin de proposer une information plus facilement utilisable et interprétable par les aménageurs.

1.4 Méthodes d'observation

À chaque type d'ICU correspond une méthode d'observation particulière [Gartland, 2008]. Cette partie introduit différentes méthodes d'observation utilisées en climatologie urbaine, en se focalisant sur celles relatives à la couche limite de canopée urbaine.

1.4.1 Mesures de l'îlot de chaleur urbain de surface

La mesure de la température de surface en milieu urbain s'effectue majoritairement via l'approche appelée de façon générique télédétection [Weng, 2009]. Ce terme recouvre les informations recueillies sous forme d'images par les satellites et les avions [Voogt et Oke, 2003]. Ceux-ci sont équipés de capteurs qui leur permet de capter l'énergie radiative ascendante CLO et GLO en provenance de la surface terrestre. La bande spectrale étudiée par les capteurs est comprise entre 0,1 μm et 100 μm. La première partie de cet intervalle, comprise entre 0,1 μm et 3 μm, correspond au rayonnement solaire CLO réfléchi par la surface terrestre. La seconde partie, comprise entre 3 μm et 100 μm, correspond à l'énergie émise par la surface terrestre sous forme de flux radiatif GLO. En réalisant une estimation de l'émissivité des matériaux urbains, la loi de Stefan-Boltzmann permet d'obtenir une information concernant la température de surface des matériaux urbains, à savoir les sols perméables et imperméables, les toits ou encore la végétation [Weng, 2009].

La télédétection permet d'aboutir à une information concernant l'ICU de surface couvrant une grande zone urbaine à un instant donné [Lagouarde *et al.*, 2010]. Plusieurs échelles horizontales sont disponibles en fonction de la résolution d'image souhaitée. Cependant, les parties couvertes, comme par exemple les surfaces situées sous la canopée végétale, ne sont pas traitées. Par ailleurs, les méthodes de télédétection sont onéreuses à mettre en place. En effet, les coûts des campagnes aéroportées et de mise à disposition des satellites sont élevés. Ces coûts augmentent lorsque les mesures doivent être répétées plusieurs fois dans le cadre d'un suivi temporel de la zone d'étude.

1.4.2 Mesures de l'îlot de chaleur urbain atmosphérique

La mesure de température d'air en milieu urbain s'effectue généralement en plaçant des capteurs au sein de la couche limite atmosphérique étudiée, à savoir soit la couche limite de canopée urbaine, soit la couche limite urbaine. Elle enregistre

les effets cumulés de trois composantes différentes [Lowry, 1977]. La première composante correspond au climat général dans lequel la ville est située. La seconde composante est la composante dite géographique, qui correspond aux effets des éléments géographiques significatifs situés à proximité de la ville (comme par exemple une chaîne de montagne ou un littoral) et de la topographie. Enfin, la troisième composante est la composante dite urbaine, qui fait référence aux modifications climatiques induites par la présence de bâti.

Cette approche in situ présente de nombreux avantages. Elle permet une mesure directe, précise et instantanée des grandeurs physiques. Classiquement, les grandeurs physiques étudiées sont la température d'air, l'hygrométrie, les vitesse et direction du vent ainsi que plusieurs des flux présents dans l'équation énergétique d'une surface urbaine [Grimmond *et al.*, 2010b]. L'approche in situ est utilisée pour répondre à plusieurs types de problématiques, comme caractérisation de l'ICU ou la validation d'un modèle climatique urbain. Selon la méthode employée, elle peut fournir une information détaillée dans le temps et l'espace.

Au sein de cette approche in situ, il est possible de distinguer les campagnes dites "fixes" – consistant à positionner des stations météorologiques dans l'agglomération étudiée puis à enregistrer les variables climatiques - des campagnes dites "mobiles" – à savoir le parcours d'un trajet urbain à pied ou en utilisant un moyen de transport [Arnfield, 2003].

Estimation de la zone d'influence des capteurs

La zone d'influence des capteurs, autrement appelée zone source ou footprint, se définit comme l'échantillon spatial que "voit" le capteur. En d'autres termes, c'est la zone dont les propriétés thermiques sont apportées au capteur via transport turbulent [Stewart, 2011]. Elle varie au court du temps, et dépend – entre autres – de la hauteur de mesure, de la rugosité de surface, de la stabilité atmosphérique, du flux ou de la variable climatique mesurée (figure 1.7). Du fait de la grande complexité et hétérogénéité de l'environnement urbain, les footprints sont particulièrement difficiles à déterminer au sein de la couche limite de canopée urbaine (cf. [Vesala *et al.*, 2008] pour une revue bibliographique sur cette problématique).

Il est néanmoins possible d'estimer la surface de ces zones sources via différents types de modèles (appelés footprint models, cf. [Kljun *et al.*, 2002] [Kljun *et al.*, 2004]

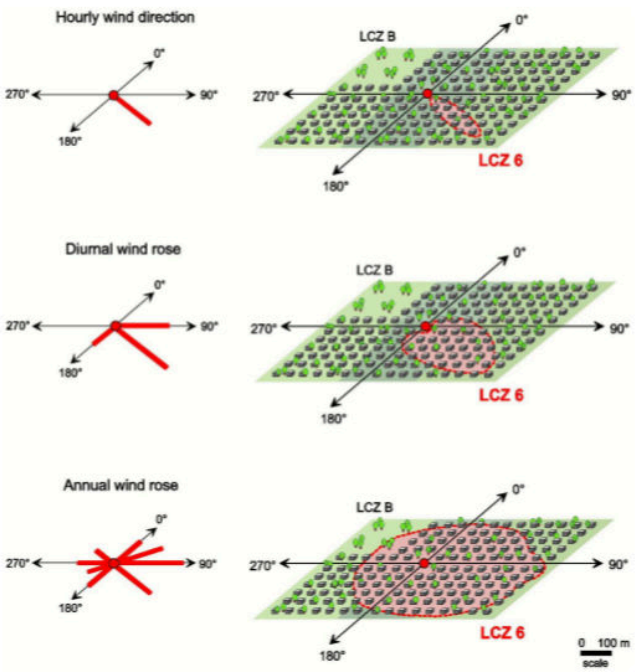


Figure 1.7 : *Illustration du concept de zone source en milieu urbain [Stewart, 2011].*

[Schmid, 2002]) ou via l'utilisation de lois empiriques. Cette dernière approche suggère que la taille d'une zone source n'excède généralement pas quelques centaines de mètres de rayon pour des mesures de température d'air à 2 mètres de hauteur [Stewart et Oke, 2012]. Elle peut présenter un rayon de 100 mètres en zone densément bâtie et un rayon de 200 mètres en zone ouverte [Stewart *et al.*, 2013].

Mesures fixes dans la couche limite de canopée urbaine

L'exploitation des données provenant de stations fixes est une méthode largement utilisée dans le domaine de l'étude de l'ICU [Gartland, 2008]. De nombreuses campagnes de mesures fixes ont été mises en œuvre (table 1.6), étudiant les phénomènes physiques de l'échelle microclimatique à l'échelle mésoclimatique. Il s'avère que la plupart de ces campagnes ne se focalisent pas uniquement sur la température d'air dans la canopée urbaine. Elles intègrent d'autres problématiques, comme l'étude de la dispersion des polluants atmosphériques ou l'analyse du profil vertical de température d'air au sein de la couche limite urbaine [Mestayer *et al.*, 2005] [Masson *et al.*, 2008] [Salamanca *et al.*, 2011].

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

Table 1.6 : *Récentes campagnes de mesure fixes en climatologie urbaine.*

Cette approche fixe utilise deux ou plusieurs stations positionnées dans l'agglomération étudiée, dont au moins une en milieu urbain et une en milieu rural. Installées de façon permanente, les stations météorologiques fournissent une information sur le cycle journalier de l'ICU, mais également sur les évolutions hebdomadaires, saisonnières et pluriannuelles.

Il existe principalement trois approches différentes pour l'utilisation de données issues de stations météorologiques fixes [Gartland, 2008] :

- La première vise à comparer uniquement deux stations, l'une en milieu urbain, l'autre en milieu rural. Dans ce cas, la station urbaine doit être placée de façon à être représentative de l'environnement urbain en matière de morphologie des bâtiments, occupation du sol, matériaux urbains présents et chaleur anthropique émise. La station rurale doit être représentative de l'ensemble de la périphérie de la ville.
- Une seconde approche consiste à étudier un réseau de plusieurs stations réparties dans l'agglomération afin d'obtenir une information spatiale concernant la température d'air. Par extrapolation spatiale entre les différentes stations,

Échelles locale et microclimatique	- Vue aérienne à l'échelle 1 :5000 - Représentation de la ligne d'horizon - Photos prises dans les directions des points cardinaux
Échelle mésoclimatique	- Vue aérienne à l'échelle 1 :50000 - Position relative du site de mesure par rapport à la zone urbaine (centre ville ou périphérie) - Orographie de la ville en générale et du site de mesure en particulier
Échelle macroclimatique	- Coordonnées de l'agglomération (latitude et longitude) - Position relative de l'agglomération par rapport aux éléments géographiques majeurs (littoral, chaîne de montagne, plateau) - Type de climat de l'agglomération

Table 1.7 : *Ensemble de métadonnées recommandées pour un site de mesure [Oke, 2004], [Oke, 2006].*

il est possible de placer des isothermes et d'obtenir une carte thermique de l'agglomération.

– La troisième approche examine l'historique des données climatiques sur une ou plusieurs stations afin d'analyser l'évolution temporelle de la température d'air sur plusieurs mois ou plusieurs années. Cette démarche permet notamment d'interroger la relation entre l'évolution de l'amplitude de l'ICU et le développement de l'urbanisation.

Le nombre de stations disponibles étant fini, l'approche par mesures fixes fournit une information en quelques points précis de la ville. Ainsi, cette approche n'offre pas d'information détaillée concernant la distribution spatiale de la température d'air dans l'agglomération. Par ailleurs, le réseau de stations étant établi a priori, il est nécessaire de placer les stations de façon pertinente selon les objectifs de la campagne d'étude. D'un point de vue pratique, il est souvent complexe d'implanter des stations météorologiques en milieu urbain. Ainsi, Oke propose certaines recommandations afin d'adapter les méthodes de mesures météorologiques classiques au contexte particulier de la mesure dans l'environnement urbain [Oke, 2004] [Oke, 2006]. L'idée est d'effectuer les mesures dans un site homogène du point de vue climatique et représentatif du climat local.

Villes concernées	Publications	Méthode d'acquisition
Tokyo	[Saitoh *et al.*, 1996]	3 voitures
Göteborg	[Eliasson, 1996] [Svensson, 2004]	1 voiture
Singapour	[Goh et Chang, 1999]	1 voiture
Lodz	[Klysik et Fortuniak, 1999]	5 voitures
Tel Aviv	[Saaroni *et al.*, 2000]	4 voitures
Szeged et Debrecen, Hongrie	[Unger *et al.*, 2001] [Unger *et al.*, 2010]	1 voiture
Aix-la-Chapelle	[Buttstädt *et al.*, 2010]	Réseau de bus
Leipzig	[Schwarz *et al.*, 2012]	1 piéton
Utrecht	[Brandsma et Wolters, 2012]	1 vélo
Rotterdam	[Heusinkveld *et al.*, 2014]	2 vélos

Table 1.8 : *Sélection d'études impliquant la mesure mobile en climatologie urbaine.*

La zone source des sites de mesure se doit d'être homogène et représentative de l'échelle locale – en matière de hauteur moyenne des bâtiments, densité bâtie, occupation des sols, matériaux. Il s'agit également de réaliser la mesure à une hauteur et dans une configuration adéquates en s'isolant les phénomènes physiques ponctuels (par exemple courant d'air ou ombre portée). En émettant l'hypothèse que le brassage d'air vertical du aux turbulences autour des obstacles urbains est suffisant pour obtenir une valeur moyenne pour la température d'air, celle-ci peut être mesurée entre 1,25 et 2 mètres de hauteur [Oke, 2004]. Il est essentiel d'éviter de placer les stations hors de la couche limite de canopée urbaine (par exemple sur les toits), et d'effectuer les mesures sur un site possédant un Rapport d'aspect représentatif de l'environnement urbain à l'échelle locale. Il est également recommandé de créer un historique du site de mesure ou du parcours, afin de pouvoir identifier les changements que celui-ci pourrait connaître durant la période de mesure, ainsi que de recueillir les métadonnées indiquées dans la table 1.7.

Mesures mobiles dans la couche limite de canopée urbaine

La mesure mobile de variables climatiques s'est développée en parallèle des approches de mesures fixes [Gartland, 2008]. Le principe est d'établir puis d'effectuer un itinéraire à l'intérieur et aux abords d'une agglomération. Ces mesures mobiles sont réalisées à pied ou en utilisant un moyen de transport individuel (comme par exemple

un vélo ou une voiture) ou collectif (comme par exemple un bus ou un tramway) (table 1.8).

La mesure mobile peut être pratiquée à tout moment, et peut atteindre une haute densité spatiale en termes de points de mesure. Elle permet ainsi d'étudier la variation de température d'air dans la couche limite de canopée urbaine à l'échelle de quelques dizaines de mètres. La quasi totalité des rues de l'agglomération peuvent théoriquement être parcourues, il est donc possible d'avoir accès à une très grande partie de la zone urbanisée. De plus, cette approche présente un coût plus modeste que l'approche par mesures fixes.

En utilisant un seul véhicule ou capteur, la mesure mobile ne permet pas de mesurer les variables climatiques de façon synchrone à différents points de l'agglomération. Ainsi, la température d'air régionale peut varier de quelques degrés entre le début et la fin du trajet. Afin de pallier ce problème, les données provenant de mesures mobiles sont ajustées temporellement sur la base d'une température de référence relevée au moment du début et de la fin du trajet. Il est également possible d'utiliser plusieurs véhicules ou capteurs, cependant cela augmente le coût de la campagne de mesure et demande de mobiliser une plus grande équipe d'opérateurs. Dans le cas de l'utilisation d'un véhicule motorisé, les capteurs de température sont placés loin des sources de chaleur de celui-ci.

La mesure mobile s'effectue dans une rue, de fait les zones non accessibles par le moyen de transport choisi ne sont automatiquement pas étudiées (par exemple les cœurs d'îlot). De plus, celle-ci se pratique systématiquement au dessus d'une surface imperméable, ce qui dans certains cas n'est pas représentatif du milieu à l'échelle locale (par exemple les zones non urbanisées).

1.4.3 Mesures du bilan énergétique urbaine

La mesure des flux énergétiques impliqués dans l'équation énergétique urbaine nécessite de placer les capteurs au niveau de la sous-couche d'inertie, c'est-à-dire dans la couche où les flux turbulents sont spatialement homogènes et représentatifs de la zone subjacente. L'ensemble des instruments de mesure utilisés doivent donc être placés plusieurs mètres au dessus des bâtiments. Cette approche nécessite donc la mise en place de mâts de mesure, afin de placer les capteurs en haut de ces mâts.

Le flux radiatif net peut être déduit à l'aide de l'équation 1.2 et d'un ensemble de quatre capteurs à savoir deux pyranomètres (l'un orienté vers le ciel mesurant le flux radiatif CLO descendant $K \downarrow$, l'autre orienté vers la surface terrestre mesurant le flux radiatif CLO ascendant $K \uparrow$) et deux pyrgéomètres (l'un orienté vers le ciel mesurant le flux radiatif GLO descendant $L \downarrow$, l'autre orienté vers la surface terrestre mesurant le flux radiatif GLO ascendant $L \uparrow$). Les flux de chaleur sensible et latent sont mesurés via un dispositif expérimental utilisant la covariance d'eddy [Gartland, 2008]. Dans le cas du flux de chaleur sensible, un anémomètre ultrasonique couplé à un thermocouple enregistre les fluctuations de vent et de température d'air. Ces fluctuations permettent dans un second temps de calculer le flux de chaleur sensible. Dans le cas du flux de chaleur latent, un anémomètre ultrasonique couplé à un hygromètre enregistre les fluctuations de vent et d'humidité. Ces fluctuations permettent dans un second temps de calculer le flux de chaleur latent. Dans certains cas, le flux de stockage dans les matériaux urbains est mesuré à l'aide de fluxmètres thermiques.

Le flux de chaleur anthropique n'est pas systématiquement mesuré. En règle générale, il est significativement plus faible que les quatre autres flux présentés précédemment, c'est pourquoi certaines équipes de recherche choisissent parfois de le regrouper avec le flux de stockage dans les matériaux [Gartland, 2008]. Par ailleurs, le terme relatif à l'advection horizontale n'est pas mesuré, d'une part du fait de la difficulté technique que cette mesure représente, d'autre part parce que ce flux est significativement plus faible que les autres flux.

1.4.4 Synthèse

Afin d'étudier les différents aspects du phénomène d'îlot de chaleur urbain, plusieurs méthodes de mesures sont disponibles. Dans le cas de la mesure de température d'air dans la canopée urbaine, les méthodes de mesures in situ fixes et mobiles sont traditionnellement employées. Les mesures fixes sont plus adaptées à l'étude de la distribution temporelle de température d'air, tandis que les mesures mobiles sont plus appropriées pour l'analyse de la distribution spatiale de température d'air. L'utilisation de mesures mobiles s'avère particulièrement pertinente dans le cadre d'une étude approfondie des variabilités thermiques spatiales pouvant être observées au sein d'un quartier, ou plus généralement d'une zone urbaine.

1.5 Méthodes de zonage climatique urbain

1.5.1 Approches conceptuelles

L'amplitude de l'ICU est usuellement définie comme étant la différence entre la température d'air sur un site urbain et la température d'air sur un site rural géographiquement proche. Or, il s'avère que cette définition est remise en cause par certains chercheurs.

Parmi eux, Stewart propose une analyse critique de la définition classique de l'îlot de chaleur urbain [Stewart, 2011]. Il avance dans un premier temps une série d'arguments scientifiques. Les définitions des termes "urbain" et "rural" sont équivoques et ambiguës. Ils sont donc interprétés individuellement par chacune des équipes de recherche réalisant des mesures d'ICU. De ce fait, les sites urbains et ruraux sélectionnés pour les études de l'ICU sont extrêmement divers. En fonction des études, le site urbain choisi peut être un parking, un cimetière, une rue canyon ou un parc, tandis que le site rural choisi peut être un champ, un verger ou une forêt. Plus préoccupant, des sites comme les aéroports, les cours d'école et les campus universitaires sont considérés alternativement comme sites urbains dans certaines études et comme sites ruraux dans d'autres études. Par ailleurs, les sites choisis sont parfois définis comme étant urbains ou ruraux sans plus de justifications, en faisant l'hypothèse – erronée – que ces termes sont compris de façons identiques par les autres membres de la communauté scientifique.

Stewart avance également une série d'arguments d'ordre urbanistique. Selon lui, la dichotomie "urbain-rural" est trop simpliste pour construire une définition de l'ICU. Elle ne prend pas en compte le cas des zones péri-urbaines. En termes d'urbanisme, les concepts "urbain" et "rural" varient d'un pays à l'autre en fonction des usages et des juridictions en vigueur. En outre, cette approche bipolaire s'avère être peu pertinente dans le cas de villes ne connaissant pas un développement par cercles concentriques. La distinction "urbain-rural" prend difficilement sens pour les agglomérations multipolaires et décentralisées, comme il en existe dans certains pays asiatiques.

Au regard des résultats de l'étude bibliographique de Stewart, la classification "urbain-rural" des sites expérimentaux doit être remise en cause. La redéfinition de l'amplitude de l'ICU d'une part, et des critères de classement des sites expérimentaux

d'autre part, sont nécessaires afin d'améliorer la qualité des études réalisées et de faciliter leur interprétation par d'autres chercheurs.

Les classifications climatiques urbaines visent pour la plupart à améliorer la compréhension globale du climat urbain, à étudier les relations existantes entre l'environnement urbain et le climat urbain et pour certaines d'entre elles à fournir des recommandations en matière d'urbanisme durable. Différents types de classifications urbaines ont été proposés afin de répondre à ces problématiques.

Une première approche consiste à utiliser une typologie générale d'occupation du sol existante. À titre d'exemple, Merbitz [Merbitz *et al.*, 2012] fait appel à la classification CORINE Land Cover. CORINE est un inventaire de l'occupation du sol appliqué dans 38 états européens et comprenant 44 types d'utilisation du territoire. Dans le cadre de ses recherches portant notamment sur la température d'air en milieu urbain, Merbitz utilise des données urbaines haute résolution à Aix-la-Chapelle (Allemagne) afin d'appliquer la typologie CORINE Land Cover.

Une autre démarche repose sur l'agrégation de plusieurs indicateurs de natures différentes sur une même carte afin d'aboutir à une carte climatique urbaine (UCM, Urban Climatic Maps). Ces cartes sont construites à partir de données climatiques d'une part, et d'informations relatives à l'occupation du sol et à la topographie d'autre part (voir [Ren *et al.*, 2011] pour une revue bibliographique). Elles sont constituées de zones, appelées climatopes, qui présentent un microclimat particulier à une échelle comprise entre une dizaine et une centaine de mètres. La construction de ces climatopes se base principalement sur l'expertise scientifique des climatologues ainsi que sur l'évaluation qualitative des phénomènes physiques. Les méthodes de production d'UCM varient selon les pays, et chaque UCM possède sa propre typologie climatique. Ces UCM ont la particularité d'être destinées quasi exclusivement aux aménageurs et aux décideurs, et de traiter simultanément plusieurs aspects relatifs au confort urbain (température d'air, écoulement de l'air, pollution atmosphérique).

D'autres classifications climatiques s'appuient sur l'évaluation quantitative de flux énergétiques ou de variables climatiques. C'est le cas de la classification UZE (Urban Zones that characterize Energy partitioning) [Loridan et Grimmond, 2012], qui fait appel à l'équation énergétique d'une surface urbaine. Cette approche distingue les zones urbanisées entre elles à la façon dont celles-ci répartissent l'énergie incidente provenant principalement des flux radiatifs descendants.

Cette démarche quantitative est également adoptée par plusieurs classifications qui choisissent de construire des zones possédant à la fois un microclimat spécifique et des caractéristiques urbaines particulières. D'après Stewart [Stewart, 2011], la première classification de ce type est l'oeuvre de Chandler [Chandler, 1965]. Ce dernier a proposé une classification climatique de l'agglomération de Londres (Grande Bretagne) selon 4 zones, chacune d'entre elles étant plus chaudes que les zones non urbanisées environnantes.

Dans le même esprit, Auer [Auer, 1978] a par la suite soumis une classification climatique pour la ville de Saint Louis (États Unis). Douze zones "significatives d'un point de vue météorologique" ont été produites, chaque zone étant associée à une occupation du sol spécifique. Chacune de ces zones est définie relativement au climat général observé dans les zones rurales alentours.

À la différence des UCM, les plus récentes de ces classifications ont pour but de développer une typologie climatique pouvant être appliquée telle quelle dans une majorité d'agglomérations. En adoptant une démarche utilisant les caractéristiques de plusieurs agglomérations aux États-Unis, Ellefsen [Ellefsen, 1991] a proposé une classification basée sur la morphologie urbaine, la configuration des rues et les matériaux de construction. Cette classification UTZ (Urban Terrain Zone) est pensée pour l'échelle du quartier, et fait la différence entre formes urbaines mitoyennes et détachées.

Afin de construire une classification climatique visant à améliorer les procédures d'installation d'équipements de mesures météorologiques en milieu urbain, Oke s'est appuyé sur les travaux de Auer et Ellefsen pour construire la classification Urban Climate Zone (UCZ, zone climatique urbaine) [Oke, 2004]. L'approche UCZ différencie les zones urbaines par rapport à la façon dont elles modifient l'écoulement du vent ainsi que les variables thermiques et hydriques. Les UCZ se définissent notamment à partir de plusieurs indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol.

La classification LCZ s'inscrit à la suite des travaux de Oke et poursuit cette démarche qui vise à construire une typologie climatique urbaine à l'échelle du quartier. Elle se fixe notamment les objectifs suivants [Stewart, 2011] :

- Prendre en compte un nombre significatif de paramètres urbains
- Considérer de façon équilibrée les zones urbaines et les zones rurales

- Adopter une nomenclature claire et non équivoque
- Pouvoir être utilisée dans la grande majorité des agglomérations de par le monde.

1.5.2 Local Climate Zone

Articulé en deux temps, le travail de Stewart a consisté à construire le concept de Local Climate Zone puis à établir une typologie de Local Climate Zone. Il s'est d'abord appuyé sur une approche dite de division logique du territoire appliquée à l'échelle locale. Cette approche consiste à classer les territoires en différentes sous-classes en utilisant plusieurs paramètres. Quatre paramètres influençant le comportement thermique dans la couche limite de canopée urbaine ont été choisis afin de générer des sous-classes. Ces paramètres concernent la morphologie urbaine et l'occupation du sol :

- Le type d'objet présent dans la zone (bâtiments ou plantes)
- La hauteur de ces objets
- La densité spatiale de ces objets dans la zone
- Le caractère perméable ou imperméable des surfaces situées entre les objets de la zone

L'utilisation de cette méthode a abouti à la création de 26 sous-classes hypothétiques (figure 1.8), chaque sous-classe représentant une configuration de paramètres unique. Une partie de ces sous-classes créées artificiellement ont été écartées, car elles étaient improbables ou aberrantes, et parallèlement d'autres sous-classes ont été ajoutées.

Ces sous-classes ont ensuite été enrichies à l'aide de données descriptives issues de campagnes de mesure in situ. Cette étape a permis d'ajouter des informations qualitatives pour chaque sous-classe et d'établir une définition de chaque sous-classe sous forme de texte. Des données quantitatives concernant les propriétés relatives à la morphologie urbaine, à l'occupation du sol, aux matériaux urbains utilisés et au métabolisme urbain ont également été introduites. Cette démarche d'ajout d'informations qualitatives et quantitatives a été complétée par une série de visites de terrain effectuées dans différentes villes.

Une fois ces sous-classes constituées, Stewart a étudié dans quelle mesure il était possible de différencier thermiquement chacune des sous-classes. Cette analyse s'est basée sur l'exploitation de mesures expérimentales in situ dans trois villes (Nagano, Vancouver, Uppsala) d'une part, et sur des résultats de simulations numériques d'autre

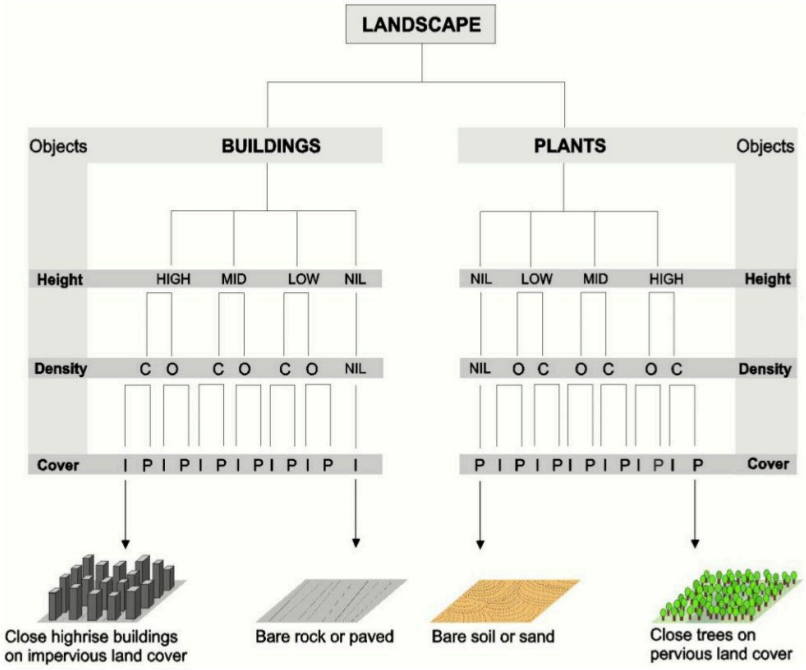


Figure 1.8 : *Application de l'approche dite de "Division logique du territoire" pour la création de sous-classes hypothétiques. Les territoires sont classés selon quatre paramètres utilisés successivement, à savoir le type d'objet présent dans la zone, la hauteur de ces objets, la densité spatiale de ces objets dans la zone et le caractère perméable ou imperméable des surfaces situées dans la zone [Stewart, 2011].*

part. Les résultats ont indiqué que 17 sous-classes démontraient un comportement thermique unique. Par ailleurs, les différences de morphologie urbaine et d'occupation du sol entre sous-classes ont été identifiées comme étant les causes majeures des différences de température d'air observées entre ces sous-classes.

À l'issue de ce processus, 17 types de LCZ ont été identifiés (figure 1.9 et Annexe A). Une Local Climate Zone se définit comme une zone présentant des traits spécifiques du point de vue de la morphologie urbaine, de l'occupation du sol, des matériaux urbains et du métabolisme urbain, et dont le diamètre est supérieur ou égal à 400 mètres. Les caractéristiques de cette zone modifient le microclimat de celle-ci et favorisent l'émergence d'un régime particulier de température d'air au sein de la couche limite de canopée urbaine, particulièrement dans des conditions météorologiques de vent faible et de nébulosité faible. Chaque type de LCZ se définit par :

- Un nom et un code
- Une définition sous forme de texte
- Une fonction

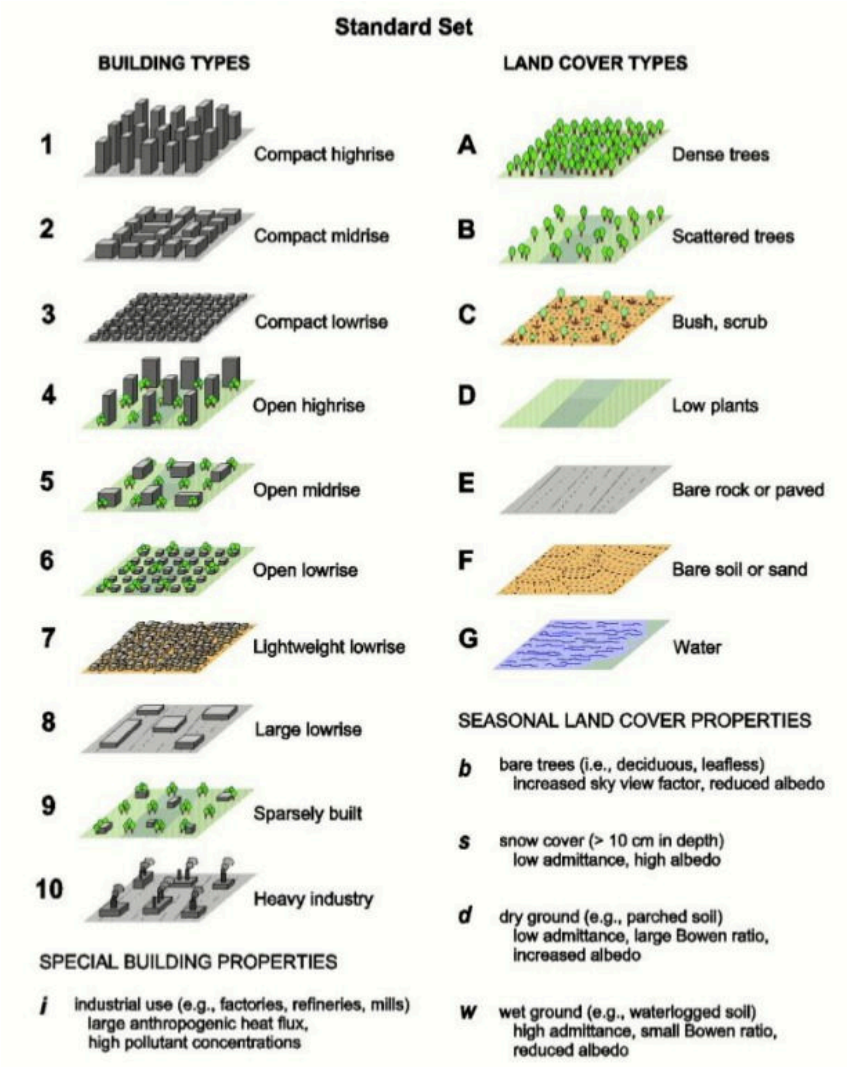
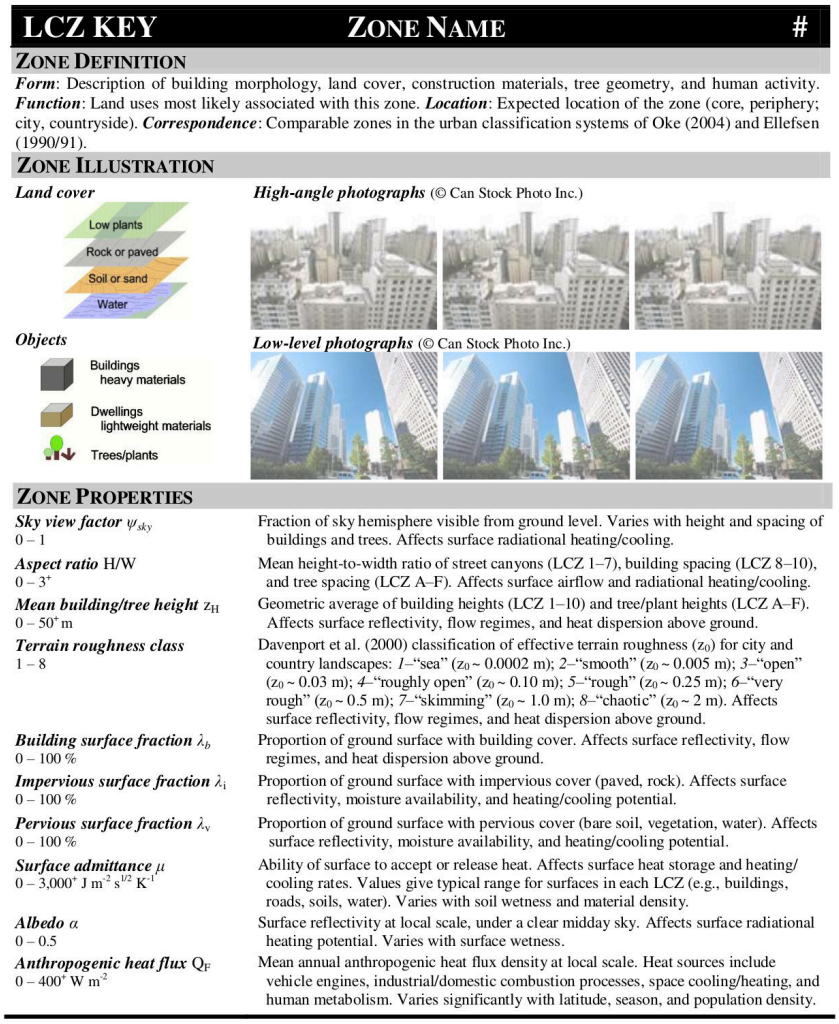


Figure 1.9 : *Présentation des 17 types de LCZ existants. Il existe 10 types de LCZ urbanisés et 7 types de LCZ non urbanisés. Lors de l'identification, il est possible d'ajouter un indice pour préciser une propriété concernant les bâtiments ou l'occupation du sol [Stewart, 2011].*

- Une localisation
- Des illustrations sous forme de photographies prises au niveau de la rue et en partie supérieure de la canopée urbaine
- Une sélection de dix indicateurs urbains

Chaque type de LCZ est présenté sous forme d'infographie synthétisant ses caractéristiques (figure 1.10). Les dix indicateurs urbains choisis par Stewart permettent de caractériser une zone de manière quantitative. Chacun d'entre eux apporte une information concernant les spécificités de la zone. Ils sont relatifs à la morphologie de la zone, à son occupation du sol, aux matériaux présents dans la zone ainsi qu'à



LCZ KEY	ZONE NAME	#

ZONE DEFINITION

Form: Description of building morphology, land cover, construction materials, tree geometry, and human activity. ***Function***: Land uses most likely associated with this zone. ***Location***: Expected location of the zone (core, periphery; city, countryside). ***Correspondence***: Comparable zones in the urban classification systems of Oke (2004) and Ellefsen (1990/91).

ZONE ILLUSTRATION

Land cover

High-angle photographs (© Can Stock Photo Inc.)

Objects

Low-level photographs (© Can Stock Photo Inc.)

ZONE PROPERTIES

Sky view factor ψ_{sky} 0 – 1	Fraction of sky hemisphere visible from ground level. Varies with height and spacing of buildings and trees. Affects surface radiational heating/cooling.
Aspect ratio H/W 0 – 3^+	Mean height-to-width ratio of street canyons (LCZ 1–7), building spacing (LCZ 8–10), and tree spacing (LCZ A–F). Affects surface airflow and radiational heating/cooling.
Mean building/tree height z_H 0 – 50^+ m	Geometric average of building heights (LCZ 1–10) and tree/plant heights (LCZ A–F). Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.
Terrain roughness class 1 – 8	Davenport et al. (2000) classification of effective terrain roughness (z_0) for city and country landscapes: *1*–"sea" (z_0 ~ 0.0002 m); *2*–"smooth" (z_0 ~ 0.005 m); *3*–"open" (z_0 ~ 0.03 m); *4*–"roughly open" (z_0 ~ 0.10 m); *5*–"rough" (z_0 ~ 0.25 m); *6*–"very rough" (z_0 ~ 0.5 m); *7*–"skimming" (z_0 ~ 1.0 m); *8*–"chaotic" (z_0 ~ 2 m). Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.
Building surface fraction λ_b 0 – 100 %	Proportion of ground surface with building cover. Affects surface reflectivity, flow regimes, and heat dispersion above ground.
Impervious surface fraction λ_i 0 – 100 %	Proportion of ground surface with impervious cover (paved, rock). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.
Pervious surface fraction λ_v 0 – 100 %	Proportion of ground surface with pervious cover (bare soil, vegetation, water). Affects surface reflectivity, moisture availability, and heating/cooling potential.
Surface admittance μ 0 – $3{,}000^+$ J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}	Ability of surface to accept or release heat. Affects surface heat storage and heating/cooling rates. Values give typical range for surfaces in each LCZ (e.g., buildings, roads, soils, water). Varies with soil wetness and material density.
Albedo α 0 – 0.5	Surface reflectivity at local scale, under a clear midday sky. Affects surface radiational heating potential. Varies with surface wetness.
Anthropogenic heat flux Q_F 0 – 400^+ W m^{-2}	Mean annual anthropogenic heat flux density at local scale. Heat sources include vehicle engines, industrial/domestic combustion processes, space cooling/heating, and human metabolism. Varies significantly with latitude, season, and population density.

Figure 1.10 : *Structure d'un type de LCZ [Stewart, 2011].*

son métabolisme (table 1.9). Afin de pouvoir aisément identifier les limites physiques entre LCZ à partir de la carte d'une ville ou d'une photographie aérienne, les types de LCZ construits possèdent une combinaison unique d'indicateurs urbains en matière de morphologie urbaine et d'occupation du sol.

Chaque type de LCZ possède un comportement climatique unique. Ainsi, le concept de LCZ met en évidence la relation de causalité existant entre caractéristiques urbaines d'une part, et comportement thermique d'autre part. Les types de LCZ sont définis de façon standardisée, quantitative et non équivoque, afin de limiter les biais d'interprétation. La classification LCZ offre la possibilité d'exprimer les écarts de température en termes de différences entre LCZ, et de ne plus faire référence aux termes "urbain" et "rural". Elle propose une expression claire de l'amplitude de l'îlot

Domaine d'intervention des indicateurs urbains	Indicateurs urbains
Morphologie urbaine	- Facteur de Vue du Ciel - Rapport d'Aspect - Hauteur moyenne des bâtiments - Longueur de rugosité effective
Occupation des sols	- Pourcentage de surface bâtie - Pourcentage de surface imperméable - Pourcentage de surface perméable
Matériaux urbains	- Effusivité thermique - Albédo
Métabolisme urbain	- Flux de chaleur anthropique

Table 1.9 : *Indicateurs urbains présents dans la typologie LCZ, groupés par domaine d'intervention.*

de chaleur urbain via la comparaison de zones définies d'un point de vue climatique. Il s'agit de confronter les comportements thermiques de différentes LCZ situées au sein d'une même agglomération, qu'elles soient ou non de même type. Réalisée à l'échelle mésoclimatique, cette évaluation est qualifiée ici de comparaison "inter-LCZ". De façon complémentaire, l'analyse réalisée à l'échelle microclimatique concerne l'étude des distributions de température d'air observées au sein de chacune des LCZ identifiées (appelée étude "intra-LCZ").

La classification LCZ a pour objectif de pouvoir s'appliquer à la plupart des environnements urbains et ruraux, et de permettre la représentation des différents comportements climatiques observables dans une agglomération. Construite dans le but de standardiser l'étude du climat urbain, elle vise à faciliter les comparaisons d'amplitude d'ICU entre agglomérations (figure 1.11).

Méthodologie associée

L'utilisation de la classification LCZ s'accompagne d'une méthodologie s'organisant en trois temps [Stewart et Oke, 2012]. La première étape consiste à réunir les informations nécessaires à la bonne description de la zone étudiée, notamment celles précisées dans la table 1.7. La collecte de ces métadonnées vise également à être en mesure de déterminer les dix indicateurs urbains inclus dans la classification LCZ. Ces indicateurs urbains peuvent être estimés à partir de visites de terrain, d'images satellites ou aéroportées [Bechtel et Daneke, 2012] [Gamba *et al.*, 2012], ou calculés à

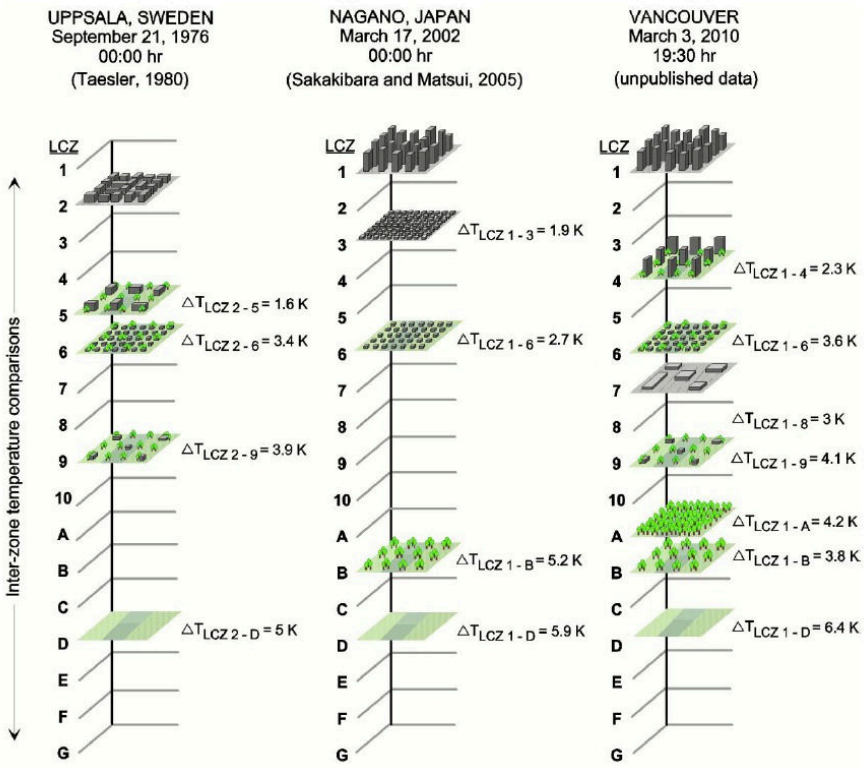


Figure 1.11 : *Expression de l'amplitude de l'ICU comme l'écart de température entre deux LCZ. Trois sessions de mesure sont représentées dans trois agglomérations différentes. Les écarts prennent pour référence la LCZ dont le numéro est le plus faible (Compact highrise, Compact midrise ou Compact lowrise) [Stewart, 2011].*

partir de bases de données urbaines ou en utilisant des algorithmes intégrés à des logiciels SIG [Houet et Pigeon, 2011]. À ce stade, il est essentiel de caractériser la zone étudiée à l'échelle locale, et de ne pas se focaliser sur les anomalies de morphologie et d'occupation du sol à l'échelle microclimatique.

La seconde étape correspond à la définition de la zone source au niveau du site de mesure. Pour l'étude d'une LCZ donnée, il s'agit de vérifier que la zone source du capteur de température d'air utilisé se situe à l'intérieur de cette LCZ. En effet, dans le cas où la zone source du capteur s'étend sur deux LCZ ou plus, la mesure de température enregistrera l'influence des LCZ contiguës à la LCZ étudiée. La détermination de la zone source en milieu urbain est particulièrement complexe. Idéalement, la zone source doit être calculée à l'aide d'un modèle de footprints. Il est néanmoins possible d'évaluer le diamètre de cette zone source sur la base des estimations réalisées dans de précédentes études.

La troisième étape est celle de la sélection du type de LCZ adéquat pour le fragment urbain étudié, et ce parmi les 17 types proposés. Pour une zone donnée, il s'agit de comparer les métadonnées collectées lors de la première étape avec les descriptifs de chaque type de LCZ. Les valeurs des dix indicateurs urbains sont notamment comparées aux intervalles de valeurs suggérées pour les différents types de LCZ. Ces suggestions d'intervalles doivent être considérés comme les limites approximatives au sein desquelles les valeurs des indicateurs urbains sont inclues. Ainsi, il ne s'agit pas de trouver une correspondance parfaite entre les indicateurs urbains calculés pour une zone et les intervalles d'un type de LCZ donné, mais plutôt de trouver la meilleure concordance possible entre un fragment urbain et un type de LCZ. Par ailleurs, Stewart suggère que les indicateurs urbains liés à l'occupation du sol sont à privilégier par rapport aux autres indicateurs urbains lors du choix de type de LCZ, car ceux-ci influencent fortement le microclimat à l'échelle locale [Stewart, 2011].

1.6 Objectifs, hypothèses et méthodologie

Ce travail de thèse propose de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur à partir de mesures mobiles à haute résolution spatiale dans la canopée urbaine. Il vise également à introduire un cadre théorique pour le développement d'un modèle de diagnostic à partir d'indicateurs urbains et climatiques, avec la perspective de construction d'un outil de prise en compte de l'îlot de chaleur dans le processus de planification urbaine.

Ce travail de recherche s'organise autour de plusieurs hypothèses. La première d'entre elles concerne le choix de la variable climatique étudiée. Cette étude porte exclusivement sur la température d'air enregistrée à 2 mètres de hauteur, celle-ci étant la variable climatique appropriée pour l'étude de l'ICU dans la couche limite de canopée urbaine. De plus, elle est connue bien au delà de la communauté scientifique, de ce fait elle est intelligible pour les décideurs.

La seconde hypothèse est relative à la méthode de mesure utilisée. La température d'air est mesurée via une sonde embarquée à bord d'un véhicule instrumenté. Cette approche permet la prise en compte des évolutions spatiales et temporelles de la distribution de température d'air. Grâce à la méthodologie développée, elle permet également de prendre en compte les différentes échelles d'étude. La présente étude

postule que l'utilisation de mesures mobiles offre des perspectives très favorables au développement d'outils climatiques pertinents pour les aménageurs.

Une troisième hypothèse consiste à adopter la classification climatique LCZ afin de structurer l'étude de l'ICU. En effet, la température d'air urbaine peut connaître une forte variabilité spatiale d'un quartier à un autre. L'idée est d'utiliser une classification climatique dans le but de segmenter spatialement l'étude climatique. Au lieu d'envisager l'agglomération dans son ensemble – ce qui constitue un problème complexe, il s'agit de l'étudier parties après parties afin d'en simplifier son étude. Ce choix se justifie par la volonté d'étudier le phénomène d'ICU selon différentes échelles horizontales. Ainsi, il est possible de dissocier l'étude à l'échelle mésoclimatique (comparaison des températures d'air entre zones climatiques) de l'étude à l'échelle locale et microclimatique (analyse des distributions spatiale et temporelle de la température d'air à l'échelle de la zone climatique et aux échelles inférieures). Le choix de la classification climatique s'est portée sur la typologie des Local Climate Zones [Stewart et Oke, 2012]. L'approche méthodologique des LCZ offre entre autres avantages la possibilité de redéfinir l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain. En s'affranchissant des termes "urbain" et "rural", l'approche LCZ utilise des descriptions standardisées des environnements présents dans l'agglomération, et définie l'amplitude de l'ICU comme étant la différence de température maximale constatée entre deux LCZ appartenant à une même agglomération.

L'agglomération de Nancy présente une forte variabilité saisonnière, et la bibliographie indique qu'il en est probablement de même pour l'amplitude de l'ICU. La présente étude se concentre sur la période estivale, car c'est durant cette période que le phénomène d'îlot de chaleur urbain influe le plus sur la problématique de la santé publique et génère le plus d'inconfort thermique.

Par ailleurs, le véhicule de mesure ne peut être utilisé en cas de précipitations du fait du positionnement des sondes de températures et d'hygrométrie. Du fait de ses caractéristiques climatiques, la période estivale est plus propice à la réalisation de mesures embarquées avec le véhicule instrumenté.

La méthodologie du présent travail de recherche vise à répondre à l'objectif de caractérisation de l'îlot de chaleur urbain en combinant l'utilisation de mesures embarquées d'une part, et d'une classification climatique d'autre part.

La première phase de ce travail (chapitre 2) consistera à utiliser la classification climatique LCZ pour l'agglomération choisie dans le cadre de cette recherche, à savoir l'agglomération de Nancy. Il s'agit de s'interroger sur la mise en pratique de la méthodologie proposée par Stewart compte tenu du contexte de l'étude. Durant cette phase, l'approche méthodologique de Stewart guidera la construction d'un ensemble de Local Climate Zone à Nancy.

La seconde phase (chapitre 3) visera à analyser dans quelle mesure un fragment urbain aboutit sur un comportement climatique particulier. Une analyse approfondie de la distribution spatiale de température d'air à l'intérieur des LCZ sera réalisée. Elle aboutira sur l'étude des variabilités thermiques spatiale et temporelle aux échelles locale et microclimatique, et du caractère homogène ou hétérogène des LCZ construites à Nancy.

La troisième phase (chapitre 4) étudiera l'apport de l'utilisation combinée de la classification LCZ et des mesures mobiles dans le contexte de la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain d'une ville telle que Nancy. Le phénomène d'ICU sera renseigné de façon précise grâce notamment à la comparaison des températures d'air entre les différentes LCZ identifiées. Cette partie analysera dans quelle mesure l'association de la classification LCZ et des mesures mobiles permet d'effectuer un diagnostic rigoureux du climat urbain.

La quatrième phase (chapitre 5) concernera les relations entre caractéristiques urbaines et climat urbain. La dynamique de rafraîchissement des LCZ construites sera analysée, notamment à l'aide d'un indicateur climatique adapté. Une étude préliminaire à la création d'un outil de diagnostic du climat urbain à destination des aménageurs sera également présentée.

En conclusion, les enseignements de ce travail de recherche ainsi que ses perspectives seront synthétisés.

2

Application de la classification climatique Local Climate Zone à l'agglomération de Nancy

2.1 Introduction

Ce chapitre expose la mise en pratique de la classification LCZ sur le territoire de l'agglomération de Nancy. Dans un premier temps, la méthode de construction des LCZ choisie pour cette étude est développée. Celle-ci s'inspire de la méthodologie proposée initialement par Stewart. Le concept de site de contrôle, qui est utilisé dans le cadre des mesures mobiles, est également présenté.

Dans un second temps, les résultats obtenus à l'issue du processus de construction des LCZ à Nancy sont commentés. Ces résultats concernent :

- L'établissement d'une carte des LCZ dans l'agglomération de Nancy
- L'étude complète d'une sélection de 13 LCZ comprenant le calcul de différents indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol
- La construction de différents sites de contrôles à l'intérieur de cette sélection de LCZ.

Les choix méthodologiques effectués lors de ce processus de construction ainsi que les limites de ces derniers sont discutés en fin de chapitre.

2.2 Méthodologie de construction de Local Climate Zone

2.2.1 Contexte géographique

L'agglomération de Nancy est située en région Lorraine, dans le quart nord-est de la France (Lat/Long : 48°41′ N 6°11′ E) (figure 2.1). Elle est positionnée sur le plateau lorrain, à environ 400 km au sud-est du littoral de la mer du Nord et à 250 km au nord du massif alpin. Sa situation géographique correspond à une demi-cuvette, le centre de l'agglomération se trouve en contrebas de deux plateaux à l'ouest et au nord. Au sein de l'agglomération, l'altitude varie entre 190 mètres et 420 mètres. Elle est traversée par deux cours d'eau, la rivière Meurthe et le canal de la Marne au Rhin, selon un axe nord – sud-est.

L'agglomération nancéienne s'étend sur environ 270 km^2. En 2009, elle comptait près de 260 000 habitants répartis dans 20 communes. Les zones urbanisées de l'agglomération sont localisées dans la cuvette et sur les coteaux, et se prolongent au nord et au sud-est le long des cours d'eau.

Selon la classification climatique de Köppen-Geiger [Peel *et al.*, 2007], Nancy connaît un climat océanique tempéré de type Cfb, avec des été chauds mais sans saison sèche. Juillet est le mois le plus chaud de l'année, avec une moyenne des maxima de température d'air de 25,1°C et une moyenne des minima de température d'air de 13.7°C.

2.2.2 Détermination des Local Climate Zone

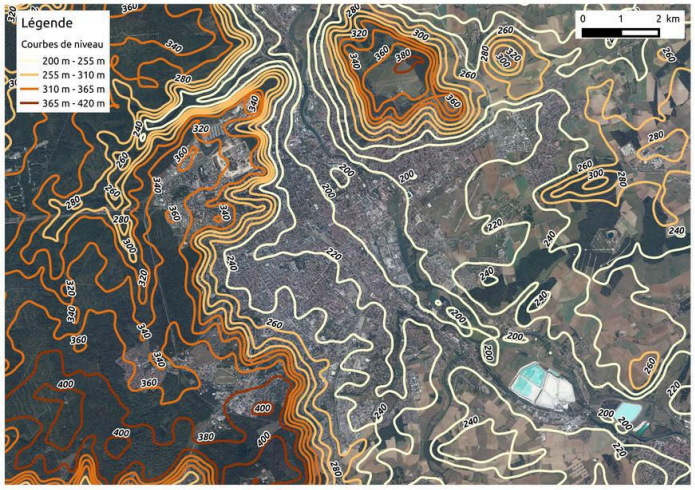
Cartographie préliminaire des LCZ

Dans le cadre de ce travail de recherche, le processus de construction des LCZ mis en œuvre dans l'agglomération de Nancy s'est déroulé en deux temps. Tout d'abord, la distribution générale des LCZ a été estimée sur l'ensemble du territoire étudié. Il s'agissait de dessiner les contours approximatifs des LCZ pouvant être construites dans l'agglomération.

Cette cartographie préliminaire des LCZ a été construite en utilisant une image aérienne de l'agglomération de Nancy dans le domaine visible (figure 2.1). En effet, il est en principe possible de construire des LCZ à partir de ce type de donnée. La photographie aérienne permet d'estimer visuellement l'occupation du sol à l'échelle de

(a)

(b)



(c)

Figure 2.1 : *(a) Localisation de l'agglomération de Nancy. (b) Agglomération de Nancy (échelle 1 :75000). (c) Courbes de niveau au pas de 1 mètre pour l'agglomération de Nancy (échelle 1 :75000).*

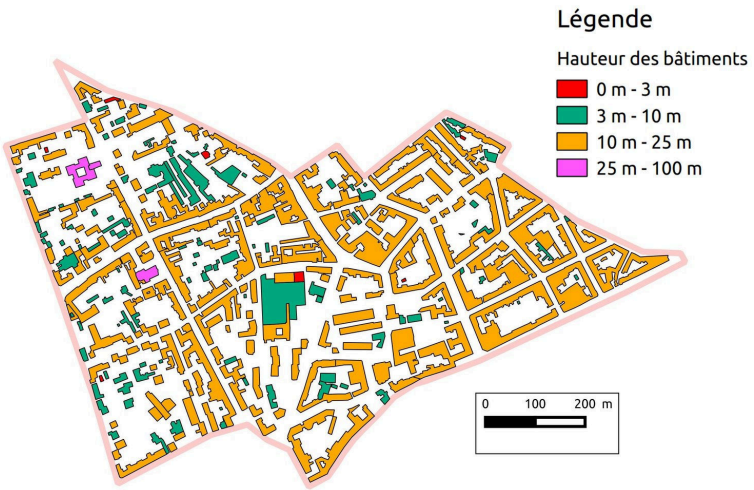


Figure 2.2 : *Exemple de visualisation des contours et de la hauteur des bâtiments (source : IGN).*

l'agglomération mais également à l'intérieur d'une LCZ. Dans ce dernier cas, il s'agit d'évaluer approximativement l'équilibre entre fraction de surfaces bâties, fraction de surfaces perméables et fraction de surfaces imperméables dans le but de trouver le type de LCZ correspondant. Il a été également choisi de prendre en compte la hauteur des bâtiments, afin d'ajouter une donnée relative à la morphologie urbaine dans le cadre de la construction de cette cartographie préliminaire. Les bâtiments ont été représentés sur la carte, et ont été colorisés selon leur hauteur (figure 2.2). Ceux-ci ont été regroupés selon quatre intervalles, à savoir 0-3 mètres, 3-10 mètres, 10-25 mètres, et supérieur à 25 mètres. Ces intervalles de hauteur correspondent aux intervalles suggérés par la typologie LCZ. En complément de l'analyse effectuée à partir de la photographie aérienne, des visites de terrain ont été réalisées.

Ajustement de la géométrie et des types de LCZ

La seconde étape vise à ajuster la géométrie des LCZ et à modifier leurs types si nécessaire, grâce au calcul de sept indicateurs urbains inclus dans la classification LCZ. En effet, un fragment urbain peut être identifié à un type de LCZ donné en première approche, puis réorienté vers un autre type de LCZ après calcul des sept indicateurs urbains. Ces sept indicateurs urbains, calculés pour les LCZ construites à l'étape précédente, correspondent à ceux relatifs à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol (table 1.9).

(a) (b)

Figure 2.3 : *(a) Valeurs de facteur de vue du ciel (SAGA GIS / QGIS). (b) Surface urbaine prise en compte dans le calcul du facteur de vue du ciel à l'échelle de la LCZ (colorisée en violet) (SAGA GIS / QGIS).*

Le calcul de SVF en milieu urbain peut s'effectuer selon deux approches différentes. La première consiste à faire appel à des Systèmes d'Information Géographique (SIG) [Unger, 2009] [Chen et Ng, 2009]. Ces derniers sont en mesure de calculer les valeurs de SVF sur une large zone, en utilisant les données issues d'un modèle numérique d'élévation (MNE). Une seconde approche fait appel aux objectifs photographiques dits Fish-Eye [Grimmond *et al.*, 2001]. Il s'agit de prendre un cliché de la zone d'étude avec ce type d'objectif, puis de traiter les prises de vues a posteriori pour obtenir une valeur de SVF [Holmer *et al.*, 2001].

Dans le cas présent, le facteur de vue du ciel a été calculé de façon automatique sur l'ensemble de l'agglomération en utilisant un algorithme implémenté dans le logiciel SIG SAGA [Böhner *et al.*, 2006]. Cet algorithme utilise comme donnée d'entrée un modèle numérique d'élévation et calcule une valeur de facteur de vue du ciel pour chaque pixel du MNE. Ainsi, la valeur de SVF pour un territoire correspond à la moyenne arithmétique des valeurs de SVF pour tous les pixels compris à l'intérieur de celui-ci (figure 2.3(a)). Cependant, cette méthode de calcul tend à faire augmenter artificiellement la valeur du SVF dans la zone. En effet, cette approche prend en compte les pixels qui correspondent aux toits des bâtiments dans les zones urbaines. Les toits des bâtiments étant situés à la limite supérieur de la canopée urbaine, leur SVF calculé par SAGA est très proche de 1, à savoir aucun obstacle entre les toits et la voûte céleste. La prise en compte des SVF au niveau des toits fait donc augmenter la valeur du SVF moyen dans une LCZ donnée. Or la classification LCZ précise que le SVF moyen doit

être déterminé au niveau du sol. De ce fait, les valeurs de SVF correspondant aux toits ont été écartées pour le calcul du SVF moyen de la LCZ (figure 2.3(b)).

Les données IGN disponibles ont permis de calculer aisément plusieurs indicateurs urbains. Le rapport d'aspect a été calculé en utilisant l'équation (1.9) présentée au chapitre précédent. Cette équation permet de calculer un rapport d'aspect équivalent sur l'ensemble d'une LCZ. La somme de toutes les surfaces verticales de la zone de calcul et la somme de toutes les surfaces bâties dans la zone de calcul ont pu être calculées à partir des données disponibles provenant de l'IGN à l'aide du logiciel SIG QGIS.

De même, l'information de hauteur des bâtiments est présente dans les bases de données IGN. Pour le calcul de la hauteur moyenne des bâtiments, les hauteurs des bâtiments ont été pondérées par leur surface selon l'équation suivante :

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_{Bat}} h_i s_i}{\sum_{i=1}^{i=N_{Bat}} s_i} \tag{2.1}$$

Avec N_{Bat} le nombre de bâtiments dans la LCZ.

La classe de rugosité du terrain a été déterminée en accord avec la classification de Davenport présentée au chapitre précédent [Davenport *et al.*, 2000]. Afin d'identifier la classe d'une zone donnée, la longueur de déplacement et la longueur de rugosité ont été déterminées l'aide des équations (1.14) et (1.15) présentées au chapitre précédent.

La fraction de surface bâtie a pu être déterminée automatiquement grâce à la base de donnée IGN. À l'inverse, les surfaces perméables et imperméables ne sont pas présentes par défaut dans les données IGN. Par ailleurs, aucune base de donnée ne fournit ces deux informations telles quelles. Ainsi, ces deux types de surfaces ont dû être estimés manuellement à partir d'une photographie aérienne récente. La méthode utilisée fait l'hypothèse que la surface totale de la LCZ correspond à la somme des surfaces bâties, imperméables et perméables de la LCZ :

$$Surface\ totale\ de\ la\ LCZ = Surface\ batie + Surface\ impermeable + Surface\ permeable \tag{2.2}$$

Dans le cas d'une zone présentant d'importantes surfaces imperméables, comme par exemple le centre de l'agglomération, les surfaces perméables ont été estimées via le logiciel SIG QGIS. Les surfaces considérées comme perméables sont les surfaces

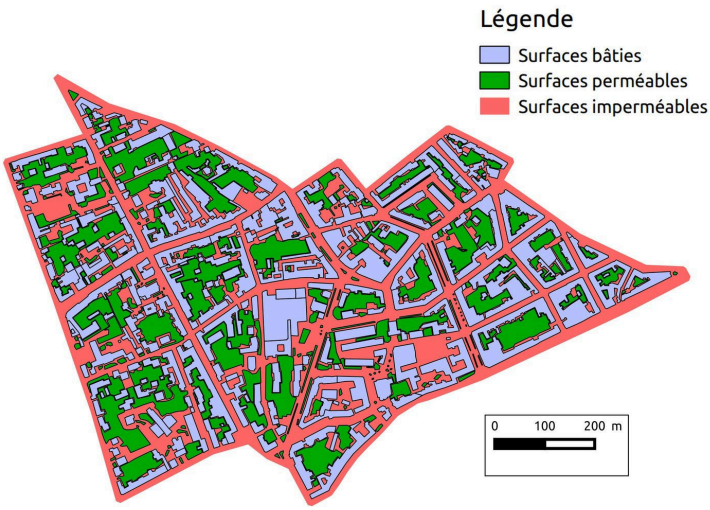


Figure 2.4 : *Exemple de détermination des fractions de surface perméable et imperméable. Les surfaces bâties sont colorisées en bleu, les surfaces perméables en vert et les surfaces imperméables en rouge.*

végétalisées et autres surfaces telles que le sable. La base des arbres urbains a également été prise en compte, et non le houppier en totalité (figure 2.4). Ensuite, la fraction de surface imperméable a été déterminée comme étant la surface de la LCZ non bâtie et non perméable :

$$Surface\ impermeable = Surface\ totale\ de\ la\ LCZ - Surface\ batie - Surface\ permeable \tag{2.3}$$

Dans le cas de zones présentant de grandes zones perméables, ce sont les surfaces imperméables qui ont été dessinées et les surfaces perméables qui ont été déduites par la suite.

2.2.3 Sites de contrôle

L'utilisation de sites de contrôle à l'intérieur d'une LCZ a été initialement proposée par Stewart. À l'origine, le but de ces sites de contrôle est d'étudier l'influence de la topographie sur les mesures de température d'air à l'intérieur d'une LCZ donnée. Stewart propose de sélectionner deux sites de contrôle dans chaque LCZ étudiée. Ces deux sites sont semblables du point de vue de la morphologie urbaine, mais diffèrent

en termes d'élévation. Dans le cas où la différence de température d'air entre les deux sites de contrôle est inférieure à 0.5°C, Stewart émet l'hypothèse que les effets topographiques ne perturbent pas la mesure de température d'air et que les écarts de température enregistrés par ailleurs sont bien dus à l'urbanisation.

Dans le cadre de cette thèse, l'idée de la comparaison entre deux sites de contrôle a été reprise. Cependant, le but n'est pas d'étudier l'influence de la topographie. Il s'agit ici d'analyser si un site urbain choisi comme étant représentatif de la LCZ en matière d'indicateurs urbains est également représentatif du comportement thermique général de la LCZ.

Dans ce contexte, la définition d'un site de contrôle a été adaptée afin de correspondre à l'objectif énoncé ci-dessus. Cette définition prend aussi en compte le fait que ces sites de contrôle vont être parcourus par un véhicule instrumenté en mouvement dans la circulation automobile.

Un site de contrôle est défini dans la suite de ce travail comme étant une portion de rue ou de route, d'une longueur comprise entre 50 et 100 mètres, dont l'environnement proche est représentatif de l'environnement général de la LCZ. La longueur de la portion de route a été choisie par rapport aux possibilités de mesures offertes par le véhicule instrumenté. Le véhicule instrumenté réalise des mesures tous les 3 mètres, ainsi dans un site de contrôle d'une longueur de 50 mètres, environ 16 relevés sont effectués.

Chaque site de contrôle est déterminé selon un cahier des charges précis :

- Dans un rayon de 100 mètres autour du site de contrôle, les valeurs des indicateurs de la typologie LCZ doivent être proches des valeurs globales à l'échelle de la LCZ entière. Ce critère permet de vérifier si l'environnement proche du site de contrôle est représentatif du reste de la LCZ.
- La distance entre le site de contrôle et les frontières de la LCZ doit être de 100 mètres au minimum. Il s'agit de faire en sorte que le site de contrôle n'enregistre pas l'influence thermique d'une LCZ contiguë. La valeur de 100 mètres correspond à la valeur relevée par Stewart concernant la dimension d'une zone source en milieu urbain dense (cf. chapitre précédent).
- Le site de contrôle est placé à l'écart des anomalies pour ce qui est de la morphologie urbaine et de l'occupation du sol. Ainsi, la proximité de bâtiments atypiques, fontaines, places, cours d'eau, a été évitée.

- Le site de contrôle se situe également dans des rues calmes ou des axes de circulation secondaires. L'idée est d'éviter les voies de circulation très fréquentées par les automobilistes. En effet, la circulation automobile dense génère un flux anthropique important sur ces axes de circulation, or cette chaleur anthropique concerne uniquement l'environnement proche de l'axe routier et non la LCZ dans son ensemble.
- Le site de contrôle est placé à l'écart des carrefours et des intersections. En effet, en milieu urbain dense, le brassage d'air est plus important au croisement de plusieurs voies de communications.
- Enfin, il s'agit de maximiser la distance entre deux points de contrôle d'une même LCZ, afin d'échantillonner la LCZ de la façon la plus vaste possible.

Dans la mesure du possible, les sites de contrôle respectent le cahier des charges ci-dessus. Néanmoins, l'implantation des sites de contrôle a dû s'adapter à la réalité du terrain d'étude. Ce cahier des charges correspond plutôt à une série de préconisations qu'il s'agit de respecter du mieux possible.

Par ailleurs, six des sept indicateurs urbains présentés précédemment ont été calculés dans un rayon de 100 mètres autour de chaque site de contrôle. La méthodologie de calcul pour ces indicateurs urbains est la même que celle utilisée à l'échelle de la LCZ.

2.3 Résultats sur le terrain d'étude

2.3.1 Cartographie préliminaire sur l'agglomération

La première étape de la méthodologie a permis d'établir une cartographie préliminaire de la distribution générale des LCZ de l'agglomération de Nancy (figure 2.5). Celle-ci a fait appel à une photographie aérienne datant de 2012, ainsi qu'à des données IGN de contours et hauteurs de bâtiment datant de 2009. Au total, l'estimation des LCZ a été effectuée sur un territoire de 265,9 km^2.

Dans un premier temps, il est possible de constater qu'il existe un nombre important de LCZ dans l'agglomération de Nancy. L'estimation réalisée permet de dénombrer 82 LCZ urbanisées. Par ailleurs, ces nombreuses LCZ ont un diamètre à peine supérieur à 400 mètres. Les LCZ dont le diamètre est supérieur à 1000 mètres sont clairement minoritaires. La forme urbaine de l'agglomération de Nancy a donc abouti sur la

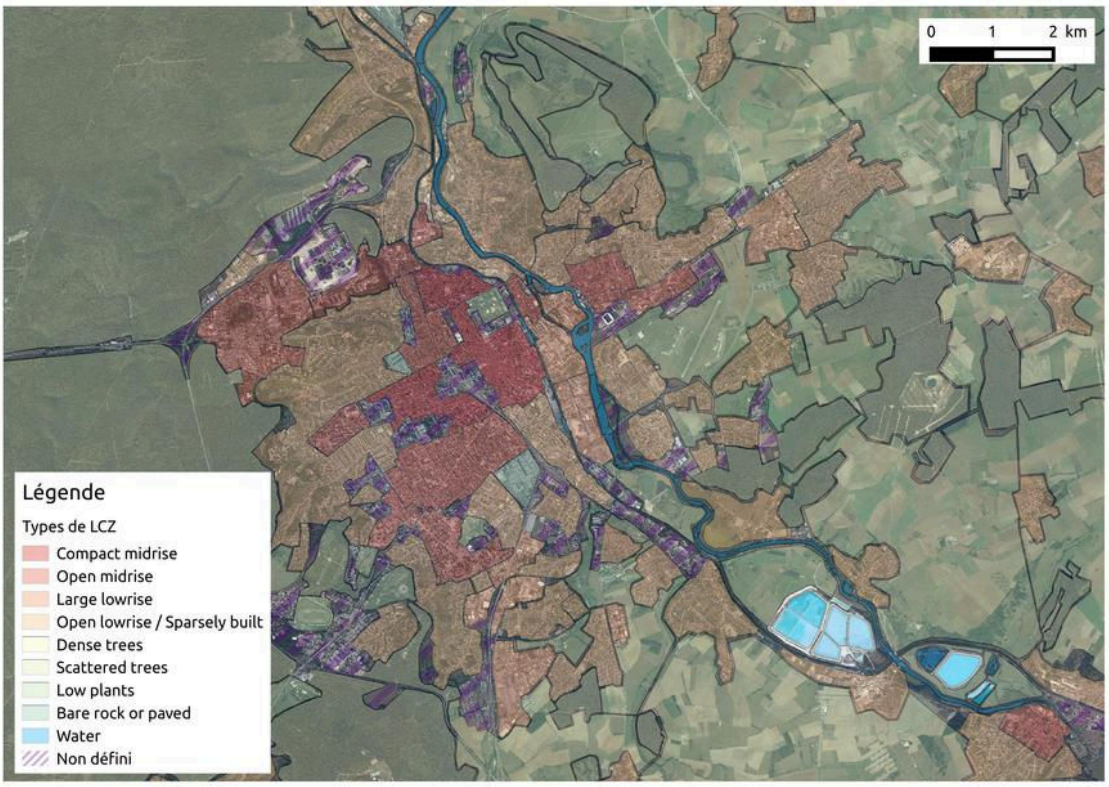


Figure 2.5 : *Cartographie préliminaire des LCZ pour l'agglomération de Nancy.*

construction de nombreuses LCZ de petite taille, et peu de LCZ de grande taille. La taille de l'agglomération peut expliquer ce phénomène. En effet, Nancy est une agglomération de taille moyenne. Les opérations d'urbanisme réalisées lors de son développement urbain ont probablement concerné des surfaces dont le diamètre était inférieur à 500 mètres. L'histoire du développement urbain de Nancy pourrait expliquer le faible nombre de grandes surfaces – supérieures à 2 km^2 – morphologiquement homogènes, et donc le faible nombre de LCZ de grande taille.

Dans un second temps, bien que la typologie LCZ soit construite afin de pouvoir déterminer des LCZ à partir d'une photographie aérienne, il s'avère que la détermination des contours des LCZ n'est pas évidente dans certains cas. En effet, l'agglomération nancéienne se présente en grande partie comme un continuum urbanisé. Dans certains cas, les frontières de certaines LCZ sont évidentes. C'est le cas notamment de la situation triviale d'une LCZ urbanisée entourée par des LCZ non urbanisées. Les frontières des LCZ sont également faciles à déterminer dans le cas de zones pavillonnaires. En effet, dans ce cas la quasi-totalité des bâtiments sont semblables, ont été construits quasi-simultanément et sont agencés selon un motif

répétitif. Les frontières des zones commerciales sont également assez évidentes en règle générale. Cependant, les limites des LCZ peuvent parfois paraître très floues. C'est le cas à Nancy entre la partie centrale et les quartiers situés plus à l'ouest. Le centre de Nancy est un centre historique ancien très densément construit. Puis, en direction de l'ouest, la hauteur des bâtiments diminue graduellement, de même que la densité des bâtiments, tandis que la présence de végétation se renforce. Il n'existe pas de rupture franche en matière de morphologie urbaine et d'occupation du sol. Dès lors, la détermination des frontières des LCZ peut devenir équivoque.

Par ailleurs, l'ensemble des LCZ estimées ne couvre pas la totalité de l'agglomération. En effet, plusieurs zones ne satisfont pas aux critères de construction d'une LCZ. Une première série de zones concerne les zones, urbanisées ou non, possédant un diamètre inférieur à 400 mètres. Il s'agit par exemple d'un parc urbain, d'une gare SNCF, ou d'un petit groupe de bâtiments très élevés entourés de bâtiments de moyenne hauteur. Dans ce cas, il est difficile de rattacher ces zones à l'une des LCZ contiguës, car leurs caractéristiques diffèrent fortement de ces dernières. Elles sont donc définies comme des LCZ non identifiées et sont représentées en hachuré (figure 2.5). D'autres zones sont trop hétérogènes en termes de morphologie urbaine et d'occupation du sol pour être identifiées à un type particulier de LCZ. Il s'agit de zones mixtes, présentant une densité bâtie modérée voire faible, situées en grande périphérie de l'agglomération, par exemple les entrées de ville. Plusieurs types de bâtiments se côtoient, à savoir des bâtiments industriels, des bâtiments commerciaux, des logements anciens ou récents. À l'intérieur de ces zones, la densité bâtie ainsi que la répartition spatiale des surfaces perméables et imperméables varient brusquement en l'espace de quelques dizaines de mètres. Elles sont également présentés en hachuré sur la figure 2.5. Au total, ces zones dont le type n'a pas été identifié représentent un territoire d'une superficie de 11,4 km^2, soit 4,3% de la superficie totale de l'ensemble du territoire étudié.

Une fois les contours des LCZ dessinés, il est possible de constater que du point de vue des indicateurs urbains, certaines LCZ sont plus homogènes que d'autres. Les zones pavillonnaires ont dans l'ensemble tendance – pour les raisons évoquées plus haut – à être très homogènes sur toute leur surface pour ce qui est de la morphologie urbaine et de l'occupation du sol. À l'inverse, il existe des zones plus hétérogènes, plutôt situées en périphérie de l'agglomération. Par exemple, des zones de grands ensembles présentent

	Code du type de LCZ	Nom du type de LCZ	Correspondance en Français
Types de LCZ urbanisés	Type 2	Compact Midrise	Ensemble d'immeubles compact
	Type 3	Compact Lowrise	Ensemble de maisons compact
	Type 5	Open Midrise	Ensemble d'immeubles espacés
	Type 6	Open Lowrise	Ensemble de maisons espacées
	Type 8	Large Lowrise	Grandes emprises tertiaire bâti bas
	Type 9	Sparsely Built	Maisons éparses, constructions isolées
Types de LCZ non urbanisés	Type A	Dense Trees	Arbres denses
	Type B	Scattered Trees	Arbres éparses
	Type D	Low Plants	Pelouses, prairies, cultures
	Type E	Bare Rock or Paved	Roche nue, pavés, macadam
	Type G	Water	Eau

Table 2.1 : *Types de LCZ utilisés dans l'agglomération de Nancy. La correspondance en Français est issue des travaux de l'IAU-IDF [Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France, 2014].*

d'importantes variations d'indicateurs urbains à l'échelle de quelques dizaines de mètres, bien que ces zones soient homogènes si elles sont considérées à l'échelle locale.

Un type de LCZ provisoire est attribué à chaque LCZ dessinée. Le calcul des indicateurs urbains lors de la phase suivante permettra de confirmer ce choix de type de LCZ, ou de le modifier si nécessaire. Sur les dix-sept types de LCZ existants dans la classification, seuls onze types de LCZ ont été identifiés dans l'agglomération (table 2.1). En effet, du fait des spécificités de l'agglomération de Nancy en termes d'urbanisme, tous les types de LCZ ne sont pas présents. À titre d'exemple, la totalité des types de LCZ urbanisés utilisés présente une hauteur moyenne des bâtiments inférieure à 25 mètres. Quelques hauts bâtiments sont présents, cependant ils sont peu nombreux et dispersés. De ce fait, aucun type de LCZ présentant une hauteur moyenne des bâtiments supérieure à 25 mètres n'a été identifié.

Les LCZ les plus denses (Compact midrise et Compact lowrise) sont peu nombreuses à Nancy, et toutes regroupées au centre de l'agglomération. Du point de

Nom	Code	Type	Superficie (ha)	Superficie (%)
Nancy Ouest	OUE	Compact Midrise	100,6	0,4%
Nancy Centre	CEN	Compact Midrise	141,8	0,5%
Nancy Trois Maisons	TRM	Compact Midrise	59,6	0,2%
Vandoeuvre Nations	NAT	Open Midrise	94,6	0,4%
Nancy Thermal	THL	Open Midrise	205,6	0,8%
Saint Max	SMA	Open Midrise	70,0	0,3%
Nancy Porte Verte	PVE	Large Lowrise	83,2	0,3%
Nancy Marcel Brot	MBR	Large Lowrise	72,0	0,3%
Jarville	JAR	Open Lowrise / Sparsely Built	27,2	0,1%
Seichamps	SEI	Open Lowrise / Sparsely Built	176,6	0,7%
Pulnoy	PUL	Open Lowrise / Sparsely Built	71,8	0,3%
Cerville 1	CE1	Low Plants	754,5	2,8%
Cerville 3	CE3	Low Plants	657,6	2,5%

Table 2.2 : *Noms, codes, types et superficies des treize LCZ sélectionnées dans le cadre de l'étude.*

vue de la superficie, ces deux types de LCZ représentent un peu plus de 3 km^2. Les LCZ moins densément bâties, correspondant à une fraction de surface bâtie plus modeste (Open midrise, Open lowrise, Large Lowrise et Sparsely built), concerne le reste de Nancy ainsi que les communes limitrophes. Par ailleurs, les LCZ dont la hauteur moyenne des bâtiments est inférieure à 10 mètres sont majoritaires en superficie. Les LCZ dont la hauteur moyenne des bâtiments est comprise entre 10 mètres et 25 mètres se placent au centre de l'agglomération, mais aussi ponctuellement en périphérie, dans le cas par exemple d'un quartier de grands ensembles.

Pour ce qui est des LCZ non urbanisées, les LCZ Dense trees et Low plants sont extrêmement prépondérantes par rapport aux autres types. Seules quelques LCZ Scattered trees sont dénombrées, et le type de LCZ Bare rock or paved est utilisé ponctuellement pour classer un cimetière.

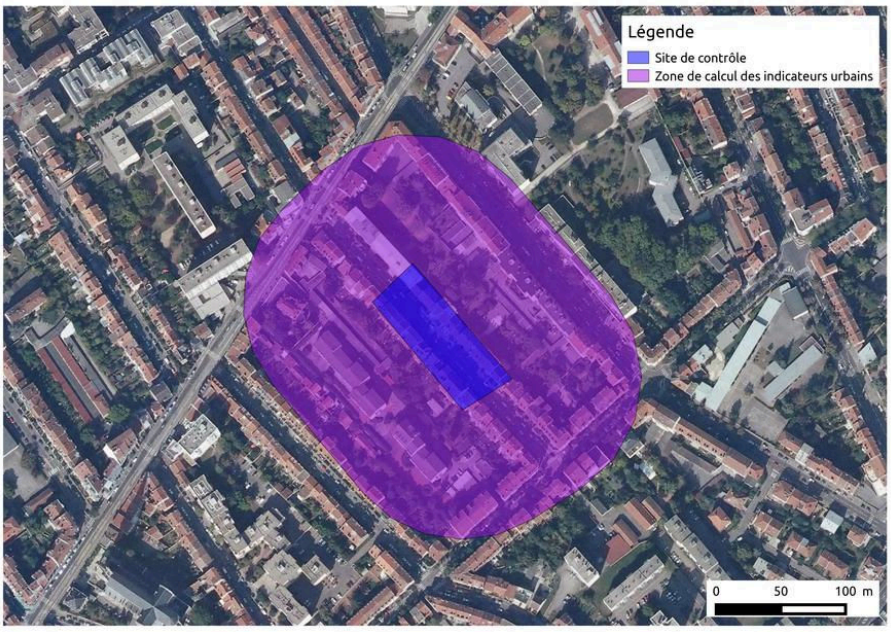


Figure 2.6 : *Exemple de construction d'un site de contrôle. La zone bleue représente le site de contrôle et la partie mauve correspond à la zone de calcul des indicateurs urbains.*

2.3.2 Construction complète de l'échantillon d'étude

À la suite de l'estimation des LCZ dans l'agglomération de Nancy, plusieurs LCZ ont été sélectionnées pour être construites complètement. Pour cette étude, la construction complète d'une LCZ consiste à effectuer le calcul des sept indicateurs urbains présentés précédemment. Si la plupart des indicateurs urbains sont obtenus de façon automatique, les fractions de surface perméable et imperméable sont déterminés manuellement.

Ainsi, treize LCZ ont été sélectionnées sur la cartographie préliminaire des LCZ (table 2.2). Le choix a été fait d'étudier les divers types de LCZ présents dans l'agglomération. Sur les onze types de LCZ présents à Nancy, six ont été étudiés, dont cinq sont urbanisés. Par ce fait, l'étude tente de prendre en compte la diversité urbaine que démontre l'agglomération de Nancy. À l'inverse, seul un type de LCZ non urbanisé a été étudié sur les cinq types présents à Nancy. Par ailleurs, chaque type de LCZ étudié est représenté par deux LCZ différentes au minimum, afin de pouvoir comparer le comportement thermique de deux LCZ de même type.

Du fait du relief de l'agglomération, certaines LCZ à Nancy présentent de forte variation d'élévation. Dans le contexte de cette étude, ces LCZ escarpées ont été écartées, et les LCZ choisies affichent une faible variation d'élévation. Les treize LCZ choisies

sont réparties sur l'ensemble de l'agglomération, du centre ville densément bâti vers la périphérie non urbanisée. Les zones usuellement qualifiées d'industrielles et de pavillonnaires sont également étudiées.

Une fois réalisée cette sélection de treize LCZ, les indicateurs urbains ont été calculés dans chacune d'entre elles afin de modifier la géométrie de la LCZ ou son type si nécessaire. Les valeurs d'indicateurs obtenues sont présentées dans la table 2.3. En outre, deux sites de contrôle ont été construits dans chaque LCZ (figure 2.6).

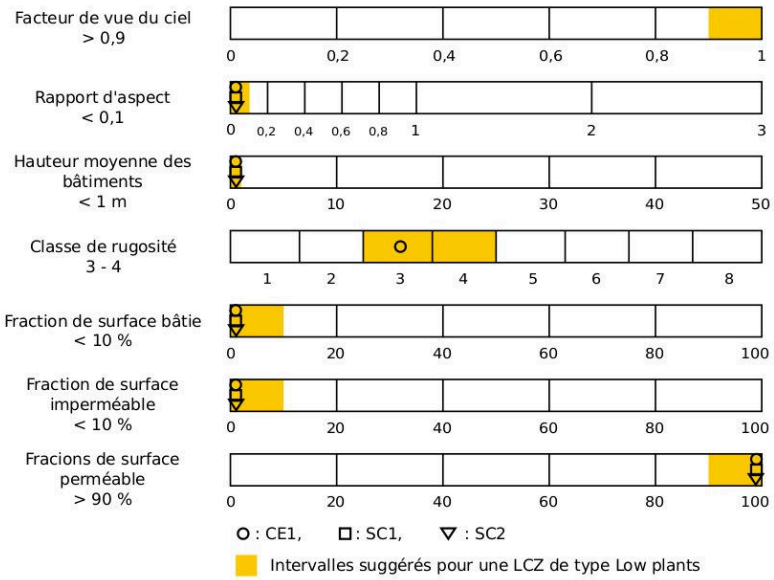
Deux premières LCZ non urbanisées de type Low plants ont été sélectionnées près de la commune de Cerville (figures 2.7 et 2.8). Il s'agit de deux LCZ exclusivement constituées de champs et traversées par une route de campagne. Aucun bâtiment n'est présent dans ces deux LCZ. Durant la période expérimentale (de juillet à septembre), ces champs étaient cultivés et donc recouverts de végétation. Pour ces deux LCZ, les indicateurs urbains calculés correspondent tout à fait aux intervalles d'indicateurs suggérés pour une LCZ de type Low plants. Les définition, fonction, localisation et illustrations correspondent également. Ainsi, ces deux LCZ sont considérées comme étant de type Low plants. Dans le cas de ces deux LCZ non urbanisées, le SVF n'a pas été calculé du fait que le modèle numérique d'élévation n'était pas disponible pour ces coordonnées géographiques. Néanmoins, les visites de terrain réalisées indiquent que le SVF pour ces LCZ se situe très certainement dans les intervalles préconisés pour une LCZ de type Low plants.

Trois LCZ de type Compact midrise ont été sélectionnées dans le centre ville de Nancy (figures 2.9, 2.10 et 2.11). Il s'agit de trois LCZ quasi-contiguës situées dans l'hypercentre de l'agglomération. Les définition, fonction, localisation et illustrations correspondent bien à des LCZ de type Compact midrise. Du point de vue des indicateurs urbains calculés, les valeurs obtenues concordent globalement avec les intervalles suggérés pour ce type de LCZ. Une exception est observée pour la LCZ TRM, la fraction de surface bâtie est légèrement inférieure à l'intervalle suggéré (-2%) tandis que la fraction de surface perméable est supérieure à l'intervalle suggéré ($+4\%$). D'une manière générale, les valeurs d'indicateurs urbains pour ces trois LCZ sont proches les unes des autres, ce qui laisse à penser que ces LCZ présentent des formes urbaines similaires. Ceci est particulièrement visible en matière de morphologie urbaine, où ces LCZ sont très semblables (SVF, AR, hauteur moyenne des bâtiments et classe de rugosité).

Code des LCZ	SVF (-)	AR (-)	H (m)	Rclass (-)	Bâti (%)	Imper (%)	Per (%)	Type de LCZ (-)
OUE	0.53	1.00	15.7	7	40	42	18	Compact midrise
OUE CS1	0.43	1.03	15.3	–	37	41	22	
OUE CS2	0.37	1.07	14.9	–	46	41	13	
CEN	0.58	0.95	16.8	7	49	41	10	Compact midrise
CEN CS1	0.44	1.50	15.4	–	61	32	7	
CEN CS2	0.43	1.28	16.5	–	58	37	5	
TRM	0.55	0.88	15.3	7	38	38	24	Compact midrise
TRM CS1	0.69	1.01	14.9	–	41	39	20	
TRM CS2	0.49	1.22	18.0	–	42	33	25	
NAT	0.66	0.32	16.5	7	18	52	30	Open midrise
NAT CS1	0.81	0.26	16.6	–	13	55	32	
NAT CS2	0.74	0.23	13.6	–	15	52	33	
THL	0.64	0.54	13.4	7	28	26	46	Open midrise
THL CS1	0.56	1.01	18.7	–	31	27	43	
THL CS2	0.58	0.42	10.6	–	29	22	49	
SMA	0.66	0.51	11.0	7	28	42	30	Open midrise
SMA CS1	0.56	0.73	11.8	–	32	43	24	
SMA CS2	0.69	0.44	10.4	–	26	44	30	
MBR	0.82	0.16	8.8	6	27	53	20	Large lowrise
MBR CS1	0.63	0.26	9.2	–	38	45	17	
MBR CS2	0.84	0.24	8.2	–	31	60	10	
PVE	0.83	0.11	6.0	6	24	51	25	Large lowrise
PVE CS1	0.87	0.18	7.7	–	34	48	18	
PVE CS2	0.83	0.22	6.5	–	27	49	24	
JAR	0.75	0.20	4.8	5	22	18	60	Open lowrise / Sparsely built
JAR CS1	0.87	0.24	5.0	–	24	19	57	
JAR CS2	0.86	0.21	4.6	–	23	21	56	
SEI	0.75	0.16	5.0	6	19	22	59	Open lowrise / Sparsely built
SEI CS1	0.85	0.21	4.4	–	23	20	57	
SEI CS2	0.85	0.21	4.3	–	22	23	56	
PUL	0.74	0.16	5.7	6	20	22	58	Open lowrise / Sparsely built
PUL CS1	0.84	0.25	7.1	–	21	24	55	
PUL CS2	0.89	0.22	5.2	–	22	23	55	
CE1	–	<0.1	<1	3	0	1	99	Low plants
CE1 CS1	–	<0.1	<1	–	0	2	98	
CE1 CS2	–	<0.1	<1	–	0	2	98	
CE3	–	<0.1	<1	3	0	1	99	Low plants
CE3 CS1	–	<0.1	<1	–	0	2	98	
CE3 CS2	–	<0.1	<1	–	0	2	98	

Table 2.3 : *Valeurs des indicateurs urbains pour les LCZ sélectionnées. SVF : Facteur de vue du ciel, AR : Rapport d'aspect, H : Hauteur moyenne des bâtiments, R : Classe de rugosité selon Davenport [Davenport* et al.*, 2000], Bati : Fraction de surface bâtie, Imper : Fraction de surface imperméable, Per : Fraction de surface perméable.*

(a)



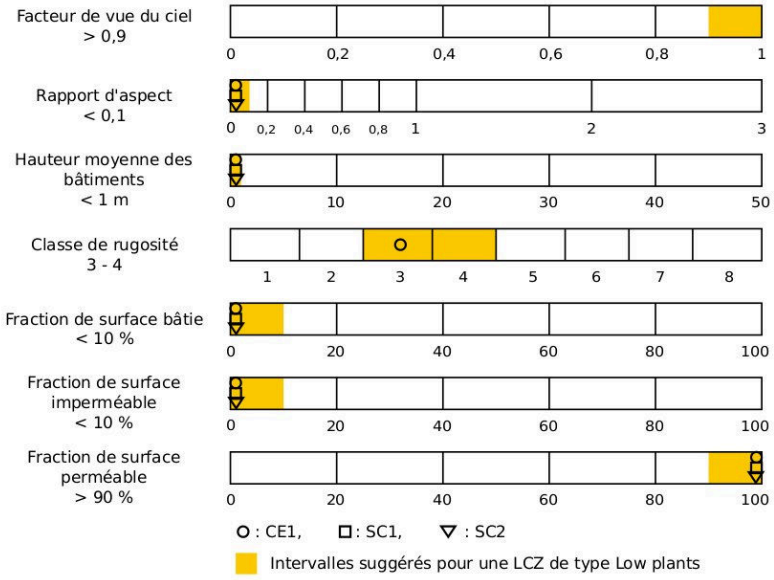
(b)

(c)

(d)

Figure 2.7 : *(a) Vue aérienne de la LCZ CE1 et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour CE1. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*

(a)

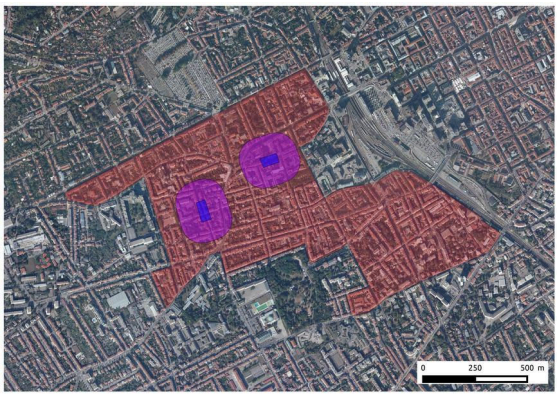


(b)

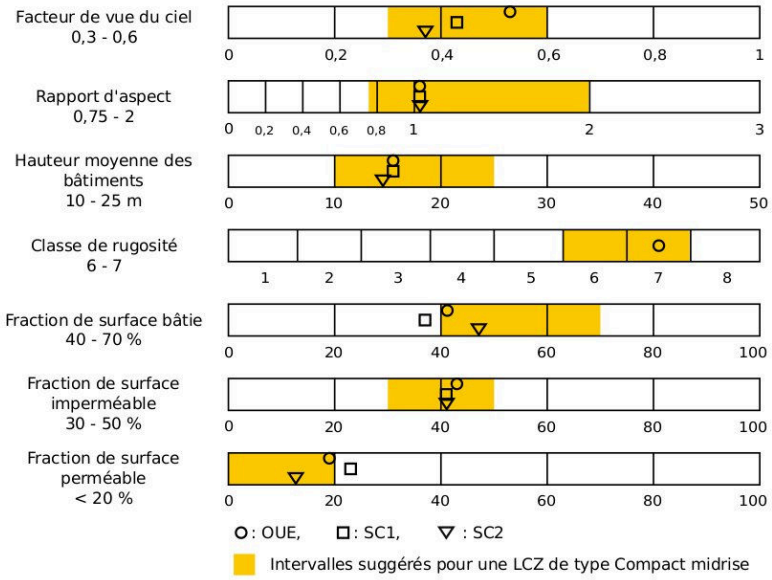
(c)

(d)

Figure 2.8 : *(a) Vue aérienne de la LCZ CE3 et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour CE3. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)

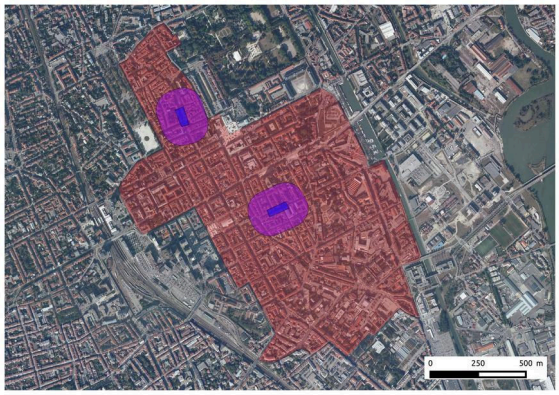


(b)

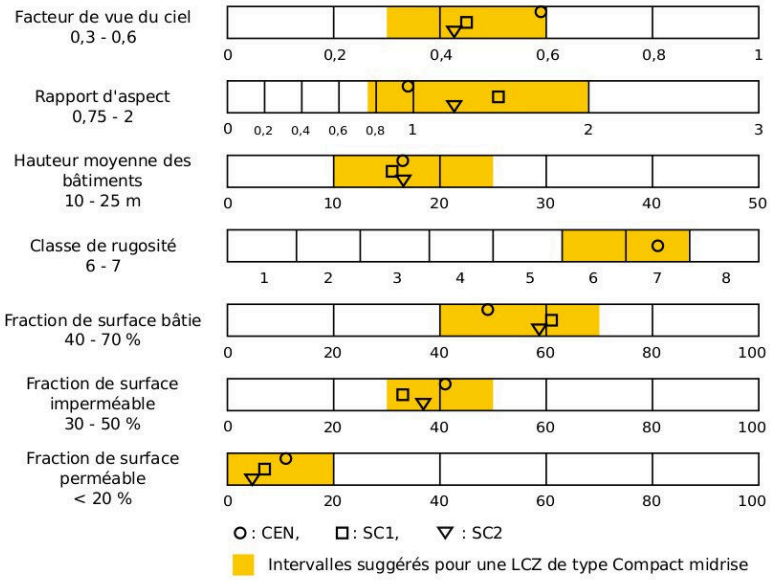
(c)

(d)

Figure 2.9 : *(a) Vue aérienne de la LCZ OUE et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour OUE. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)

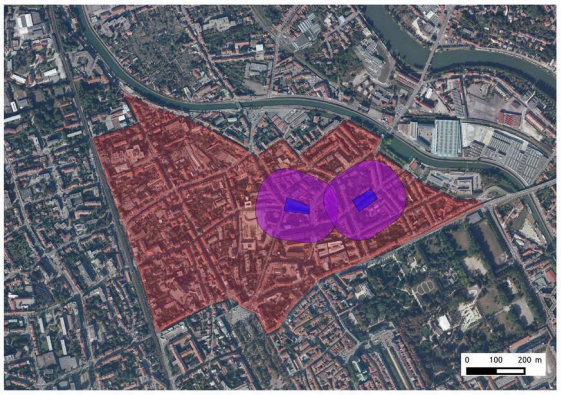


(b)

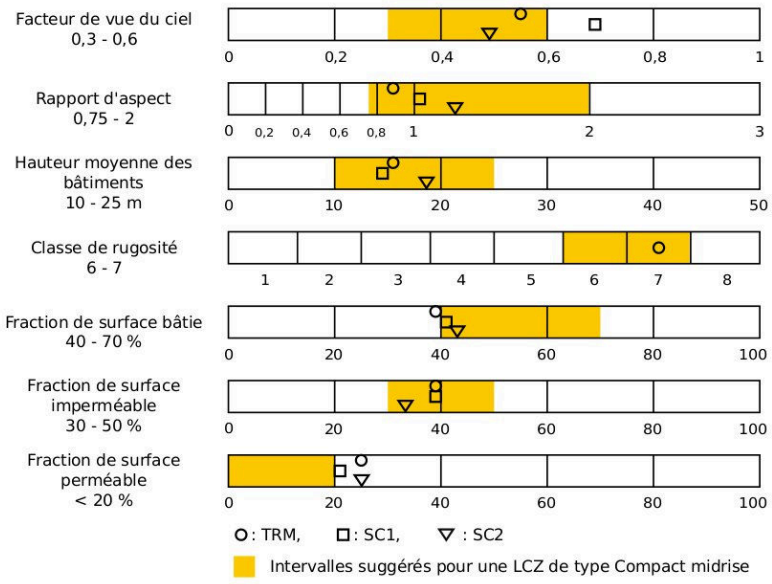
(c)

(d)

Figure 2.10 : *(a) Vue aérienne de la LCZ CEN et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour CEN. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)

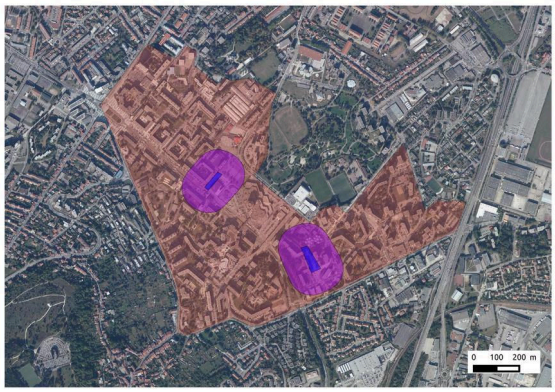


(b)

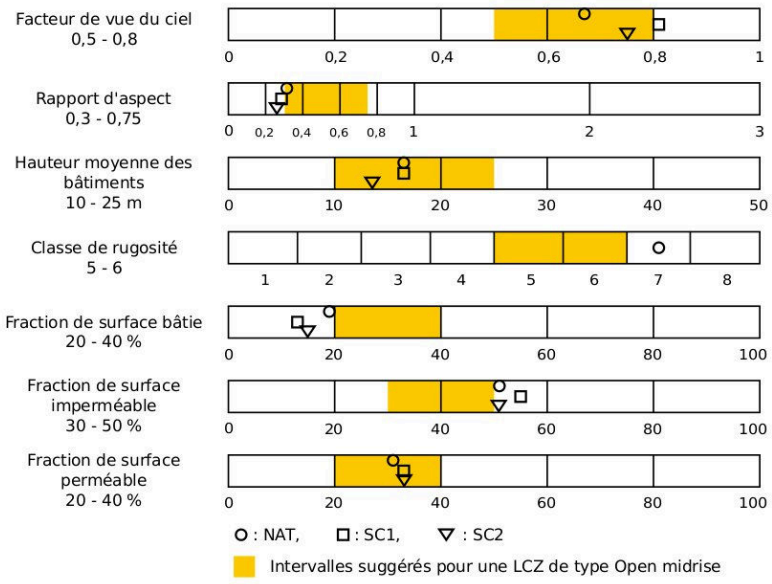
(c)

(d)

Figure 2.11 : *(a) Vue aérienne de la LCZ TRM et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour TRM. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)

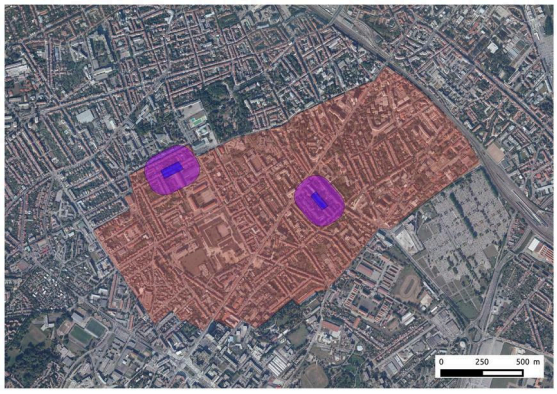


(b)

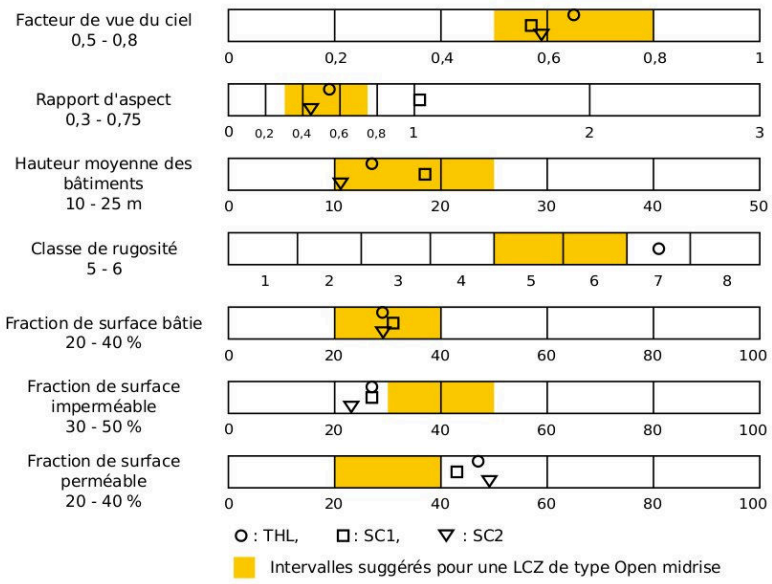
(c)

(d)

Figure 2.12 : *(a) Vue aérienne de la LCZ NAT et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour NAT. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)

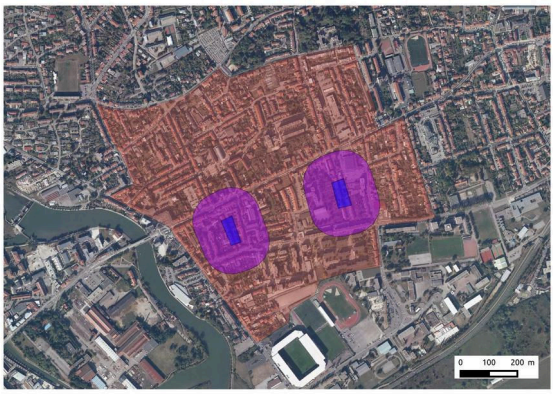


(b)

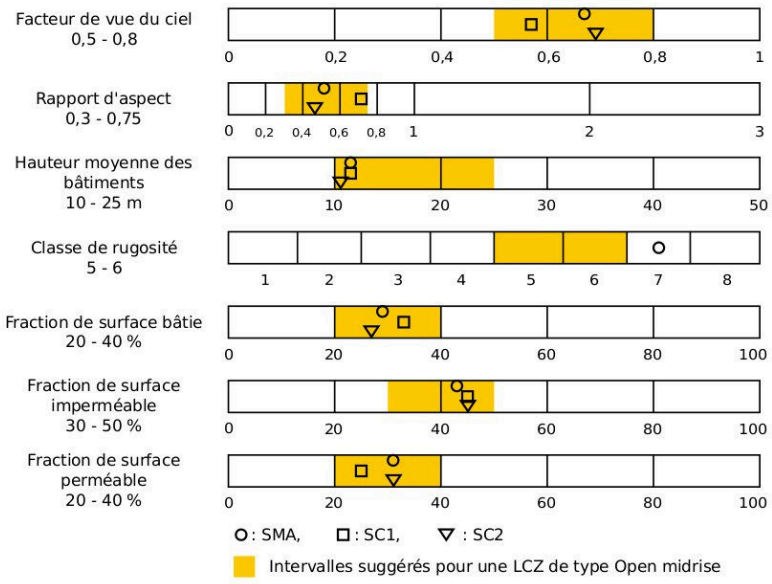
(c)

(d)

Figure 2.13 : *(a) Vue aérienne de la LCZ THL et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour THL. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)



(b)

(c)

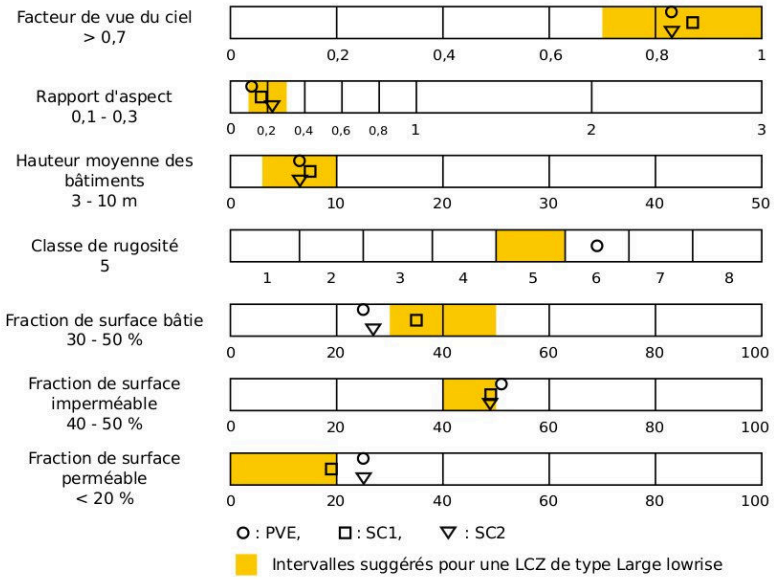
(d)

Figure 2.14 : *(a) Vue aérienne de la LCZ SMA et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour SMA. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*

Trois LCZ de type Open midrise ont également été choisies (figures 2.12, 2.13 et 2.14). Deux d'entre elles sont situées au sud ouest de l'agglomération tandis que la troisième est localisée au nord est. Les définition, fonction et localisation correspondent à des LCZ de type Open midrise. En terme d'illustration, la LCZ NAT correspond aux illustrations fournies dans la classification. Dans le cas de THL et SMA, la concordance est moins évidente. Les photographies prises dans ces zones ressemblent davantage aux images fournies pour la LCZ de type Compact midrise. Dans le cas de NAT, il s'agit d'une zone de grands ensembles résidentiels, ce qui n'est pas le cas pour THL et SMA. Le calcul des indicateurs urbains indique que du point de vue de la morphologie urbaine, les trois LCZ sont relativement proches. Dans le cas de NAT, le rapport d'aspect est plus faible et la hauteur moyenne des bâtiments plus élevée que pour les deux autres LCZ. Concernant les indicateurs d'occupation du sol, les trois LCZ sont dissemblables. Si les valeurs pour SMA sont comprises dans les intervalles suggérés, NAT présente une fraction de surface bâtie plus faible (-2%) et une fraction de surface imperméable plus élevée ($+2\%$) tandis que THL possède une fraction de surface imperméable plus faible (-4%) et une fraction de surface perméable plus élevée ($+6\%$). Ces trois zones urbaines ne se ressemblent pas au premier abord, de plus le calcul d'indicateurs urbains indique qu'elles diffèrent légèrement du point de vue de la morphologie et surtout en matière d'occupation du sol. Cependant, pour ces trois LCZ, le type Open midrise est la meilleure correspondance possible. Il n'existe pas d'autre type de LCZ qui corresponde mieux que le type Open midrise en termes d'intervalles d'indicateurs suggérés. Ainsi, ces trois LCZ sont classées en tant que type Open midrise dans le cadre de ce travail.

Deux LCZ de type Large lowrise ont également été retenues (figures 2.16 et 2.15). L'une d'entre elle est située en proche périphérie (MBR) tandis que l'autre est localisée à la frontière de l'agglomération (PVE). Dans les deux cas, il s'agit d'un ensemble de bâtiments commerciaux et d'entrepôts. Les fonction, localisation et illustrations de ces deux LCZ correspondent avec les métadonnées d'une LCZ de type Large lowrise. Cependant, si la définition d'une LCZ de type Large lowrise illustre relativement bien MBR et PVE, elle précise qu'une telle LCZ est caractérisée par une quasi-absence d'arbres. Or MBR et PVE possèdent une fraction de surface perméable significative, avec notamment la présence d'arbres. Cette situation est illustrée par le calcul des indicateurs d'occupation du sol. Par rapport aux indicateurs urbains suggérés pour une LCZ de type Large lowrise, MBR et PVE présentent une fraction de surface

(a)

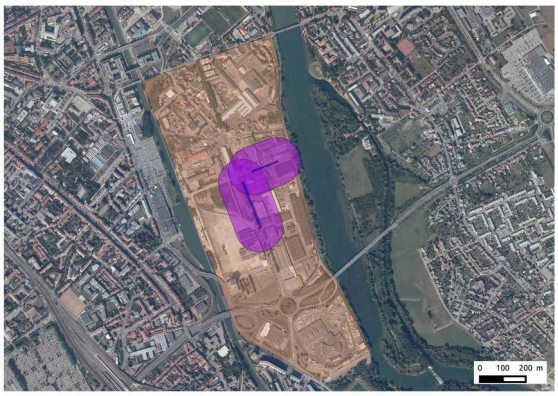


(b)

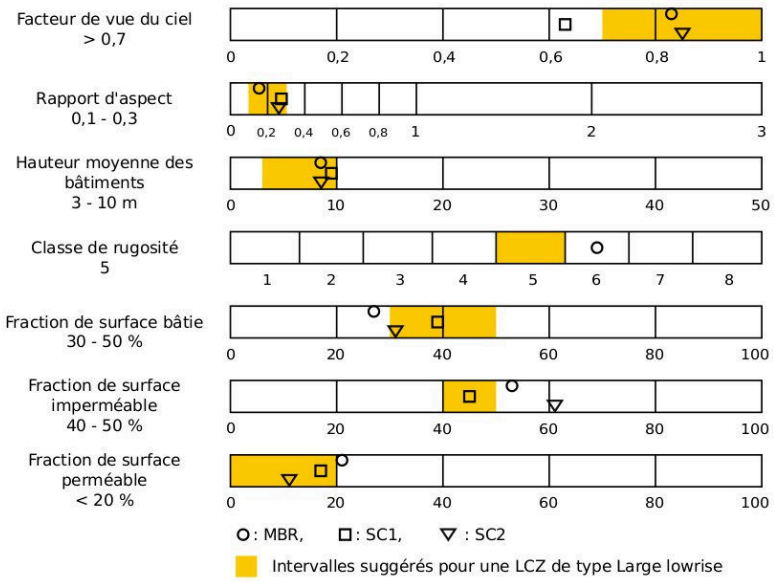
(c)

(d)

Figure 2.15 : *(a) Vue aérienne de la LCZ PVE et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour PVE. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*



(a)



(b)

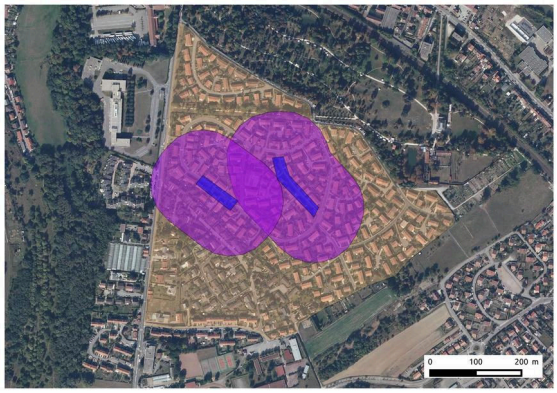
(c)

(d)

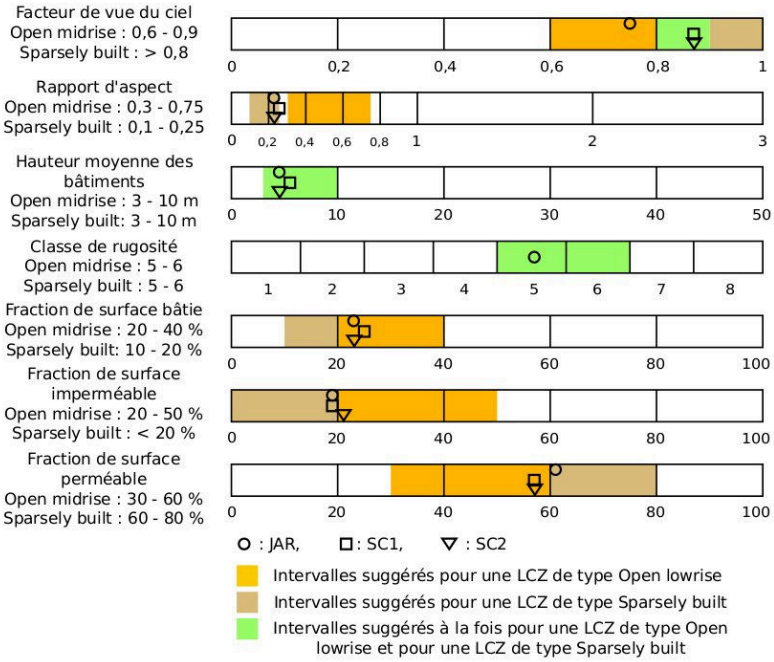
Figure 2.16 : *(a) Vue aérienne de la LCZ MBR et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour MBR. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*

bâtie inférieure (-3% et -6%) et des fractions de surface imperméable et perméable supérieures (respectivement $+3\%$ pour MBR, $+1\%$ et $+5\%$ pour PVE). Ainsi, pour ces deux LCZ, les indicateurs d'occupation du sol ne correspondent pas exactement aux valeurs préconisées pour une LCZ de type Large lowrise. Cependant, les autres critères définissant la LCZ de type Large lowrise – la majorité de la définition, la fonction, la localisation, les illustrations – poussent à identifier MBR et PVE comme étant de type Large lowrise. De plus, trois des quatre indicateurs morphologiques appartiennent aux intervalles d'indicateurs suggérés (SVF, AR, hauteur moyenne). Le type Large lowrise a donc été considéré comme étant la meilleure correspondance pour les zones MBR et PVE.

Enfin, trois autres LCZ correspondant à des zones résidentielles ont été sélectionnées (figures 2.17, 2.18 et 2.19). A l'étape d'estimation des types de LCZ, ces zones ont plutôt été considérées comme étant de type Open lowrise. En effet, l'estimation effectuée à partir de la photographie aérienne indiquait une occupation du sol comprise dans les intervalles suggérés pour une LCZ de type Open lowrise. Cependant, les valeurs d'indicateurs urbains obtenues indiquent que ces trois LCZ (JAR, SEI et PUL) présentent une occupation du sol qui se situe entre une LCZ de type Open lowrise et une LCZ de type Sparsely built. Dans le cas de JAR, la fraction de surface bâtie est dans l'intervalle suggéré pour le type Open lowrise tandis que les fractions de surface perméable et imperméable sont dans les intervalles suggérés pour un type Sparsely built. La situation inverse se présente pour SEI, à savoir que la fraction de surface bâtie est comprise dans l'intervalle de type Sparsely built, alors que les fractions de surface perméable et imperméable sont dans les intervalles suggérés pour un type Open lowrise. Dans le cas de PUL, l'occupation du sol correspond tout juste à une LCZ de type Open lowrise. Dans une telle situation, les autres éléments à disposition doivent permettre de trancher entre les deux types. En ce qui concerne les indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine, ceux-ci ne permettent pas de choisir entre type Open lowrise et type Sparsely built pour aucune des trois LCZ. En effet, pour les trois LCZ, les valeurs de SVF sont de type Open lowrise alors que les valeurs de rapport d'aspect sont de type Sparsely built. La hauteur moyenne des bâtiments ainsi que la classe de rugosité sont à la fois de type Open lowrise et de type Sparsely built. Ainsi, pour ces trois LCZ, les sept indicateurs urbains calculés ne permettent pas d'identifier un type de LCZ de façon non ambiguë. De plus, il s'avère que les définitions, fonctions, localisations



(a)



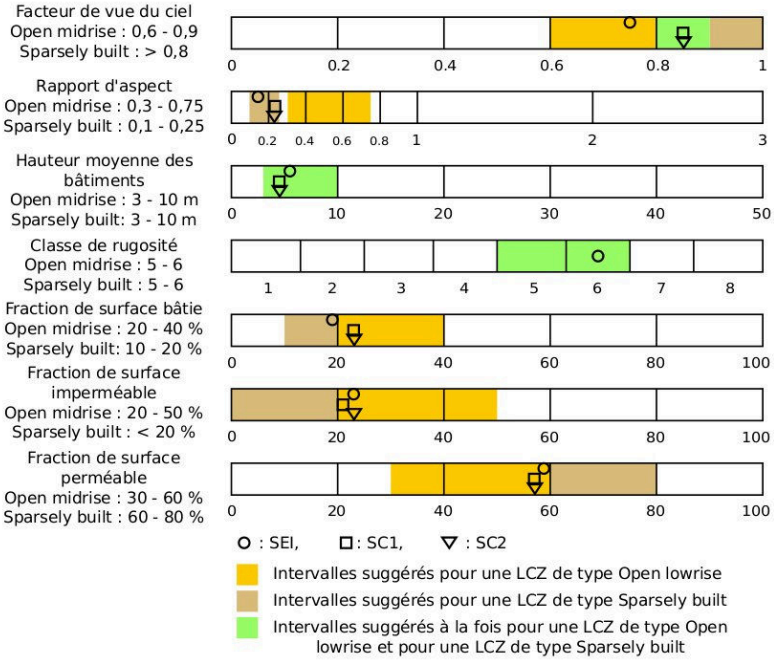
(b)

(c)

(d)

Figure 2.17 : *(a) Vue aérienne de la LCZ JAR et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour JAR. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*

(a)



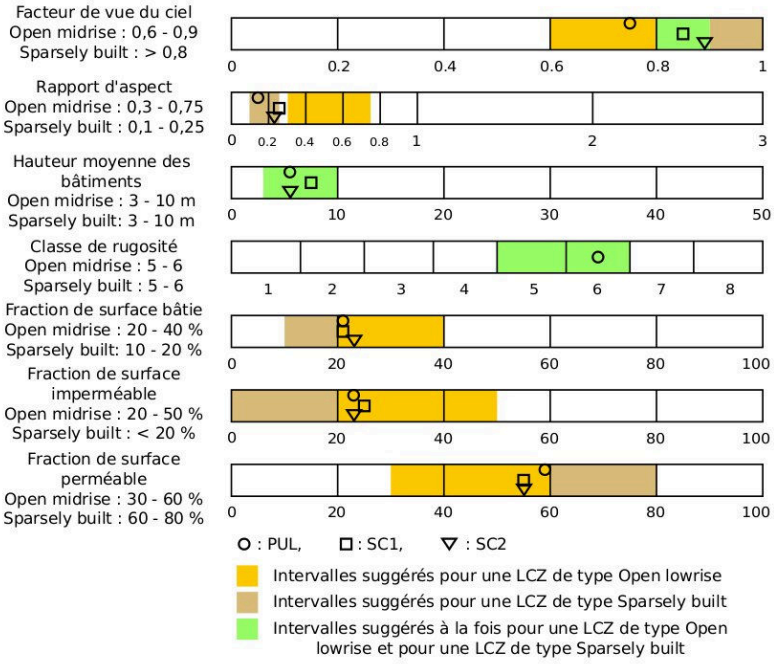
(b)

(c)

(d)

Figure 2.18 : *(a) Vue aérienne de la LCZ SEI et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour SEI. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*

(a)



(b)

(c)

(d)

Figure 2.19 : *(a) Vue aérienne de la LCZ PUL et position des deux sites de contrôle. (b) Valeurs des indicateurs urbains calculés pour PUL. (c) Prise de vue au site de contrôle 1. (d) Prise de vue au site de contrôle 2.*

et illustrations des types de LCZ Open lowrise et Sparsely built ne fournissent pas d'informations qui permettraient de choisir entre les deux types. Le type Open lowrise désigne des zones résidentielles situées en périphérie des villes ou des villes rurales. Le type Sparsely built identifie également des zones résidentielles de faible densité ou des villes rurales. Dans cette situation ambiguë, aucun choix n'a été réalisé. Dans la suite de l'étude, les LCZ JAR, SEI et PUL sont considérées comme étant à la fois de type Open lowrise et de type Sparsely built (noté type Open lowrise/Sparsely built dans la suite de ce document).

Le calcul des indicateurs urbains a permis de rectifier certains types de LCZ parmi les treize LCZ étudiées. Six LCZ ont changé de type entre l'étape d'estimation des LCZ à l'échelle de l'agglomération et l'étape de calcul des indicateurs urbains. JAR et SEI avaient été identifiées comme type Open lowrise, et PUL comme type Sparsely built. Ces trois LCZ se regroupent dans le type de LCZ hybride Open lowrise/Sparsely built, situé à la frontière entre les deux types. OUE et TRM avaient été initialement placées en type Compact lowrise, car la hauteur moyenne des bâtiments dans ces deux LCZ avait été estimée comme étant inférieur à dix mètres. Or, la hauteur moyenne des bâtiments calculée étant d'environ quinze mètres, OUE et TRM ont été reclassées en type Compact midrise. Le changement le plus important concerne THL, qui avait initialement été classée en type Sparsely built, et qui a été reclassée en type Open midrise. De la même manière que pour OUE et TRM, la hauteur moyenne des bâtiments dans cette LCZ avait été estimée comme étant inférieur à dix mètres, alors qu'elle est d'environ treize mètres. Les calculs réalisés pour THL mettent en évidence que sa morphologie correspond de façon satisfaisante à celle d'une LCZ de type Open midrise, car trois indicateurs morphologiques sur quatre sont dans les intervalles de valeurs suggérés. Par ailleurs, l'occupation du sol de THL est relativement proche des intervalles suggérés pour une LCZ de type Open midrise. Ainsi, les calculs des indicateurs urbains révèlent dans ce cas une réalité qu'il est difficile d'approcher uniquement via l'estimation visuelle à partir de la photographie aérienne.

Sites de contrôle

Vingt six sites de contrôle ont été déterminés pour cette étude. Leur emplacement et leurs caractéristiques ont été choisis afin qu'ils respectent de façon optimale

les préconisations présentées précédemment. La table 2.3 présente les valeurs des indicateurs urbains calculés pour tous les sites de contrôle.

Dans le cas des deux LCZ de type Low plants, les indicateurs urbains calculés à l'intérieur d'un rayon de 100 mètres autour des sites de contrôle sont compris dans les intervalles de valeurs suggérées pour une LCZ de type Low plants. Ils sont également très proches des valeurs obtenues pour l'ensemble de la LCZ, ce qui indique que ces sites de contrôle sont représentatifs de la LCZ en matière de morphologie et d'occupation du sol.

À l'inverse, les valeurs d'indicateurs urbains calculées aux environs des sites de contrôle pour les autres types de LCZ ne sont pas systématiquement compris dans les intervalles suggérés. Dans le contexte des LCZ de type Compact midrise, le site de contrôle 1 de la LCZ OUE présente une fraction de surface bâtie inférieure à l'intervalle suggéré (-3%), et une fraction de surface perméable supérieure ($+2\%$). De même, le site de contrôle 2 de la LCZ TRM présente une fraction de surface perméable supérieure à l'intervalle suggéré ($+5\%$). Pour les sites de contrôle correspondant aux LCZ de type Open midrise, huit valeurs d'indicateurs d'occupation du sol se situent hors des intervalles suggérés, avec des écarts allant de 2% à 9%. Du point de vue de la morphologie, seules deux valeurs de rapport d'aspect sont inférieures aux valeurs suggérées dans la LCZ NAT (écart maximal de 0,07). Pour les sites de contrôle correspondant aux LCZ de type Large lowrise, trois valeurs d'indicateurs d'occupation du sol (écart allant de 3% à 10%) et une valeur de SVF (écart de 0,07) se situent hors des intervalles suggérés.

Globalement, les indicateurs urbains calculés au niveau de l'environnement proche des points de contrôle sont très majoritairement compris dans les intervalles de valeurs suggérées pour le type de LCZ correspondant. Sur 152 valeurs calculées pour les sites de contrôle, 132 sont dans les intervalles suggérés, soit 87%. Les valeurs calculées se situant hors des intervalles suggérés sont généralement proches des bornes des intervalles. L'écart maximal entre valeur calculée et valeur suggérée est de 0.07 pour le SVF, 0.07 pour le rapport d'aspect, et 10% pour l'occupation du sol. En matière d'occupation du sol, cet écart correspond à une variation de 1780 m^2 par rapport aux bornes de l'intervalle suggéré (MBR, surface imperméable).

Dans le même temps, les indicateurs urbains calculés à l'intérieur d'un rayon de 100 mètres autour des points de contrôle sont généralement proches des indicateurs

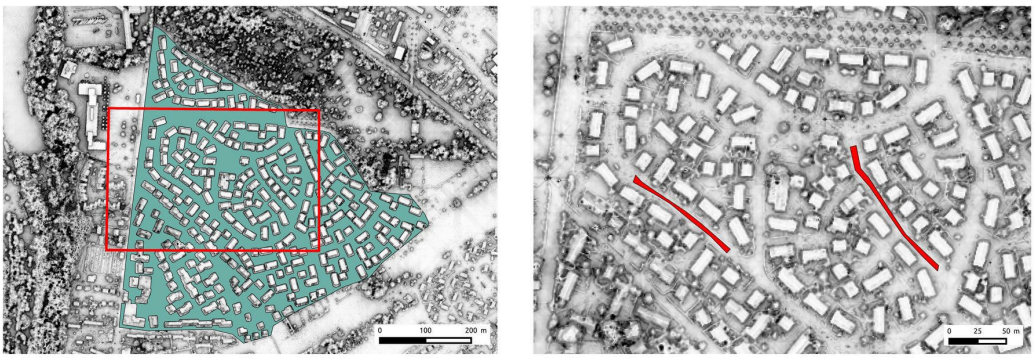
Code	Superficie LCZ (m^2)	Superficie zone source SC1 (m^2)	Zone source SC1 / LCZ (%)	Superficie zone source SC2 (m^2)	Zone source SC2 / LCZ (%)
OUE	1005490	64670	6,4	60247	6,0
CEN	1417491	65116	4,6	63474	4,5
TRM	596325	59314	9,9	58914	9,9
NAT	939303	54959	5,9	65960	7,0
THL	2056153	67454	3,3	74388	3,6
SMA	700096	61879	8,8	63761	9,1
PVE	831847	61044	7,3	68703	8,3
MBR	720033	77553	10,8	58432	8,1
JAR	272234	69448	25,5	57441	21,1
SEI	1765792	61425	3,5	54603	3,1
PUL	806958	64269	8,0	69249	8,6
CE1	7545316	97077	1,3	101786	1,3
CE3	6576046	108592	1,7	96181	1,5

Table 2.4 : *Rapport entre les superficies des zones sources des sites de contrôle et les superficies des LCZ.*

calculés pour la globalité de la LCZ. En moyenne, l'écart entre valeur pour la LCZ entière et valeur des sites de contrôle est de 0,1 pour le SVF, 0,14 pour le AR, 1,2 m pour la hauteur moyenne des bâtiments, 4% pour la fraction de surface bâtie, 3% pour la fraction de surface imperméable, 3% pour la fraction de surface perméable.

En ce qui concerne l'occupation du sol, les superficies des zones sources correspondant à un rayon de 100 mètres autour des sites de contrôle représentent en général moins de 10% de la superficie des LCZ (table 2.4). Dans ce contexte, il est souvent difficile d'obtenir le même équilibre entre surface bâtie, surface imperméable et surface perméable à l'échelle de la zone source et à l'échelle de la LCZ.

Par ailleurs, des écarts entre valeurs pour la LCZ entière et valeurs pour les sites de contrôle sont constatés de façon récurrente au niveau des valeurs de SVF. Ces différences s'expliquent notamment par le fait que le SVF est calculé selon deux méthodologies différentes au niveau des sites de contrôle et au niveau des LCZ (figure 2.20). Au niveau des sites de contrôle, le SVF est calculé sur un tronçon de route, ce qui correspond à un SVF de rue canyon. À l'inverse, le SVF de la LCZ correspond à une moyenne sur l'ensemble de la zone, selon le calcul présenté dans la section précédente. Cette moyenne prend en compte les cœurs d'îlot ainsi que les aménagements particuliers comme les places ou les squares. Or ces zones présentent une valeur de SVF en général supérieure à une rue canyon. Leur prise en compte tend



(a) (b)

Figure 2.20 : *(a) Ensemble de valeurs prises en compte pour le calcul du SVF à l'échelle de la LCZ JAR (colorisées en bleu). Le cadre rouge représente les dimensions de la figure (b). (b) Portions de rues prises en compte pour le calcul du SVF au niveau des deux sites de contrôle de la LCZ JAR (colorisées en rouge).*

à aboutir sur une valeur de SVF supérieure par rapport à la méthode qui consiste à considérer uniquement les rues canyons. Ainsi, dans les LCZ présentant des bâtiments dont la hauteur est supérieure à 10 mètres, la valeur du SVF peut avoir tendance a être plus élevée au niveau de la LCZ entière qu'au niveau des sites de contrôle (exemple des LCZ OUE, CEN et dans une moindre mesure THL).

En conclusion, les sites choisis comme sites de contrôle ont été sélectionnés en accord avec les préconisations. Les indicateurs urbains calculés dans l'environnement proche des sites de contrôle sont majoritairement inclus dans les intervalles suggérés. Leurs valeurs sont également proches de celles calculées à l'échelle des LCZ. En prenant en compte ces deux aspects, les vingt six sites de contrôle construits peuvent être considérés comme étant représentatifs des LCZ en matière de morphologie urbaine et d'occupation du sol.

2.4 Discussion

Il est possible d'apporter quelques précisions concernant la procédure de construction des LCZ proposée dans le cadre de cette étude. Concernant la première étape d'estimation des LCZ, il est parfois difficile de fixer la frontière entre deux LCZ contiguës. Les contours des LCZ peuvent être remis en question, car il s'agit là d'un choix de l'utilisateur de la méthode. La méthodologie apporte un biais utilisateur, à

savoir que deux cartes de LCZ produites par deux utilisateurs différents auraient très peu de chance d'être strictement identiques.

Ainsi, la méthodologie de cette étude pourrait être améliorée, afin de circonscrire voire de supprimer le biais introduit par l'utilisateur. Une possibilité serait d'automatiser le dessin des contours des LCZ. À l'avenir, la détermination des LCZ pourrait être réalisée de façon automatique, comme suggéré par Bechtel [Bechtel et Daneke, 2012]. Cependant, si les incertitudes concernant les frontières des LCZ peuvent être importantes, les erreurs commises en termes de surface ne représentent qu'une faible part de la surface totale de la LCZ.

Concernant l'étape de construction complète des LCZ, il apparaît que la détermination des indicateurs urbains est un problème central. Dans ce contexte, la qualité et la disponibilité des données relatives à l'environnement étudié sont des éléments cruciaux. Dans la mesure du possible, il est souhaitable d'avoir accès à des photographies aériennes les plus récentes possibles. D'autre part, le calcul automatique du SVF a pu être réalisé grâce à la mise à disposition d'un MNE en open data de la part de la communauté urbaine du Grand Nancy. Sans cette couche MNE, la détermination du SVF aurait été significativement plus difficile. De même, l'accès à certaines données IGN – notamment les couches vectorielles de surfaces bâties – ont permis le calcul direct ou indirect des trois autres indicateurs morphologiques, ainsi que la détermination de la fraction de surfaces bâties.

La détermination manuelle des fractions de surface perméable et imperméable fut une étape très longue. De ce fait, il a été choisi de calculer les indicateurs urbains sur une sélection de treize LCZ, et non sur toutes les LCZ de l'agglomération, et ce pour deux raisons. La première est une raison pratique, à savoir que le temps à consacrer pour déterminer manuellement les surfaces perméables et imperméables sur toute l'agglomération aurait été trop important. La seconde raison est expérimentale, à savoir que même en construisant toutes les LCZ de l'agglomération de façon complète, il n'était pas possible de réaliser des mesures mobiles dans toutes les LCZ de l'agglomération dans le cadre de cette recherche.

Par ailleurs, sur les dix indicateurs urbains que comprend la classification LCZ, trois n'ont donc pas été calculés ni estimés, à savoir l'albédo équivalent de la zone, l'effusivité thermique et le flux de chaleur anthropique. Ce choix se justifie d'une part de façon pratique. Aucune base de donnée n'est disponible concernant ces trois indicateurs

urbains pour la zone d'étude. Par ailleurs, les données qui permettraient de calculer ces indicateurs urbains sont pour la plupart indisponibles. En effet, il n'existe pas de base de donnée nancéienne traitant de la couleur et de la rugosité des matériaux urbains, ou des caractéristiques thermiques des matériaux rentrant dans la composition des parois urbaines. Les matériaux présents en ville sont de nature très hétérogène, ce qui rend extrêmement difficile le calcul précis des valeurs d'effusivité thermique équivalente ou d'albédo effectif. Ces trois indicateurs urbains auraient pu être estimés à partir de relevés in situ. Ils auraient également pu être déterminés à l'aide d'une méthode de calcul. Cependant, ces estimations et calculs auraient été associés à une incertitude significative. D'autre part, il existe une autre raison d'ordre méthodologique. Il s'avère que les valeurs de ces trois indicateurs urbains sont similaires pour les types de LCZ utilisés dans ce travail sur l'agglomération de Nancy. Par exemple, l'intervalle de valeur suggéré pour l'albédo équivalent est identique pour les LCZ de type Open midrise, Open lowrise et Sparsely built. De ce fait, il est impossible de savoir si le calcul de ces trois indicateurs urbains aurait permis d'aboutir à une meilleure identification des types de LCZ dans le cas présent.

2.5 Conclusion

L'utilisation de la classification LCZ dans l'agglomération de Nancy a été présentée dans le présent chapitre. La méthodologie de construction des LCZ établie pour ce travail de recherche a été exposée. Celle-ci s'est articulée en trois temps, à savoir :

- L'établissement d'une cartographie préliminaire des LCZ pour l'agglomération de Nancy
- La construction complète de 13 LCZ et le calcul de sept indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine et à l'occupation du sol
- L'établissement de sites de contrôle à l'intérieur des LCZ complètement construites

Dans un premier temps, la cartographie préliminaire des LCZ a pu être dressée pour la totalité de l'agglomération. Celle-ci a été construite à l'aide d'une photographie aérienne de l'agglomération et de données relatives aux contours et hauteurs des bâtiments. Dans certains cas où l'environnement urbain change graduellement, il est difficile de déterminer précisément les contours des LCZ. De plus, quelques zones

urbanisées n'ont pas pu être identifiées à un type de LCZ spécifique, ainsi les LCZ construites ne couvrent pas toute la surface de l'agglomération. Onze types de LCZ ont été utilisés pour l'agglomération de Nancy, avec un total de 82 LCZ urbanisées. Les LCZ construites sur ce territoire sont en majorité de taille modeste, avec un diamètre proche de 400 mètres. Si elles sont homogènes à l'échelle locale, certaines LCZ peuvent présenter des variations de morphologie urbaine et d'occupation du sol importantes à l'échelle de la dizaine de mètres. La cartographie préliminaire des LCZ a permis d'apprendre davantage sur la morphologie urbaine et l'occupation du sol dans les différentes zones de l'agglomération. Cependant, la méthode choisie nécessite d'être améliorée, afin notamment de limiter l'incertitude concernant les contours des LCZ en milieu urbain.

À la suite de l'établissement de la cartographie préliminaire, treize LCZ ont été complètement construites. Ces treize LCZ sont réparties en six types de LCZ différentes, dont cinq types urbanisés. La construction complète de ces LCZ a nécessité le calcul, pour chacune d'entre elles, de sept indicateurs urbains présents dans la typologie LCZ. Trois indicateurs urbains n'ont pas été déterminés et ont été écartés. À partir de seulement sept indicateurs urbains sur dix, dix correspondances ont pu être établies entre les zones étudiées et les types de LCZ. Dans trois zones étudiées (JAR, SEI, PUL), le choix du type de LCZ correspondant n'a pas abouti, et ce malgré le calcul des indicateurs urbains. Dans le cadre de ce travail, un type hybride a été utilisé (Open lowrise / Sparsely built). En outre, il est apparu que le calcul des indicateurs urbains est une étape incontournable pour la construction complète de LCZ. En effet, six LCZ ont vu leur géométrie ou leur type être rectifié au cours de cette phase. Par ailleurs, il s'avère que la disponibilité des données relatives à l'environnement urbain est un point crucial pour le calcul des indicateurs urbains. À titre d'exemple, le faible niveau d'information concernant l'occupation du sol a significativement entravé la construction complète des LCZ.

Enfin, deux sites de contrôle par LCZ ont pu être déterminés en respectant dans l'ensemble le cahier des charges élaboré. Six des sept indicateurs urbains ont été calculés dans un rayon de 100 mètres autour des sites de contrôle, zone qui correspond approximativement à la zone source des capteurs de température. Les indicateurs calculés à proximité des sites de contrôle sont globalement compris dans les intervalles suggérés pour les types de LCZ correspondant. Leurs valeurs sont également proches

des valeurs d'indicateurs urbains calculés à l'échelle de la LCZ. De ce fait, les sites de contrôle sont considérés dans la suite de cette étude comme étant raisonnablement représentatifs des LCZ du point de vue de la morphologie urbaine et de l'occupation du sol.

En conclusion, la classification LCZ a pu être mise en pratique dans l'agglomération de Nancy. La démarche de mesure embarquée présentée par la suite a ainsi pu s'appuyer sur les résultats détaillés dans ce chapitre.

3

Validation de la classification Local Climate Zone

3.1 Introduction

Les comportements thermiques des LCZ construites à Nancy sont analysés dans ce chapitre. Cette étude concerne la validité de la classification LCZ dans le cas d'une agglomération européenne de taille moyenne. À l'échelle locale, le concept de LCZ associe des caractéristiques urbaines (en matière de morphologie urbaine, occupation du sol, matériaux urbains, métabolisme urbain) à un comportement thermique particulier. Les mesures embarquées réalisées ici vont permettre d'interroger ce concept.

Les itinéraires des mesures mobiles sont élaborés afin de prendre en compte le découpage de l'agglomération de Nancy en LCZ. Ces mesures permettent d'enregistrer la température d'air dans de nombreuses rues de la LCZ, ce qui rend possible l'analyse détaillée de chaque LCZ au niveau de la canopée urbaine.

Les particularités climatiques de chaque LCZ sont étudiés en détail, et les spécificités thermiques observées sont traitées LCZ par LCZ. La correspondance entre caractéristiques urbaines et comportement thermique à l'échelle locale est également discutée.

(a)

(b)

Figure 3.1 : *(a) Véhicule instrumenté. (b) Boîtier à effet hélicoïde et système de ventilation.*

3.2 Moyens instrumentaux

3.2.1 Dispositif de mesures embarquées

La totalité des mesures mobiles ont été réalisées avec le même véhicule (figure 3.1). Le capteur utilisé est une sonde analogique de type PT 100, dont les caractéristiques sont présentées dans la table 3.1, étalonnée annuellement selon une procédure interne au réseau des laboratoires du Cerema. Ce capteur PT100 est placé dans un boîtier à effet hélicoïde en acier développé par Météo France. Cette enceinte permet d'abriter la sonde du rayonnement solaire, et d'assurer la circulation d'un flux d'air minimal autour de la sonde. Le système de ventilation embarqué maintient un débit d'air minimum de 10 m.s^{-1} à l'intérieur du cylindre, afin de chasser les poussières et gouttelettes d'eau. L'ensemble boîtier à effet hélicoïde et système de ventilation est monté sur le toit du véhicule à l'écart des sources de chaleur potentielles, à une hauteur de 2 mètres au dessus du sol.

Un codeur incrémental de distance est installé sur la roue arrière gauche du véhicule. Cet appareil enregistre la distance parcourue et déclenche l'acquisition d'une valeur de température d'air tous les 3 mètres, ce qui correspond à la densité spatiale d'acquisition choisie. De plus, chaque point de mesure est géolocalisé à l'aide d'un système GPS embarqué.

3.2.2 Facteurs d'influence en mesure embarquée

Une première série de tests préliminaires est effectuée afin d'étudier l'influence que peuvent exercer la stabilité atmosphérique et la vitesse du véhicule sur la variabilité

Caractéristiques techniques	Valeurs
Gamme de température	de -30°C à +45°C
Classe de précision	± 0,2°C
Temps de réponse	< 100 ms
Signal de sortie	0-5 V DC
Incertitude de mesure	± 0,2°C

Table 3.1 : *Caractéristiques techniques de la sonde PT100 utilisée.*

spatiale des relevés de température d'air. Ces tests ont également permis de tester le bon fonctionnement de l'ensemble de la chaîne d'acquisition de données.

Afin de répondre à ces objectifs, un protocole expérimental a été élaboré. Les mesures se sont déroulées dans des conditions expérimentales particulières qui peuvent être qualifiées de "standardisées". En effet, en choisissant un environnement où les caractéristiques topographiques, climatiques, morphologiques sont constantes et spatialement homogènes, les effets enregistrés lors des mesures de température d'air pourront être associés aux variations des deux paramètres étudiés dans le protocole.

Les territoires sélectionnés correspondent à des zones exemptes de bâti ou de végétation haute, afin que les variables climatiques ne soient pas perturbées par la présence d'éléments de rugosité. Ces zones sont donc dégagées et spatialement homogènes du point de vue de la morphologie et de l'occupation du sol. Au sein de ces zones, des tracés en ligne droite d'environ 1 km présentant un dénivelé très faible (inférieur à 20 m) ont été établis. Les sessions de mesure ont consisté à réaliser des aller-retour sur ces tracés rectilignes avec le véhicule instrumenté.

Les mesures ont été réalisées pour des conditions météorologiques non perturbées, à savoir des conditions anticycloniques, une nébulosité et un vent faibles, et une absence de précipitations dans les 24 heures précédent la mesure. Afin d'étudier l'influence de la stabilité atmosphérique sur la mesure de température d'air, les sessions de mesure sont réalisées alternativement en période diurne et en période nocturne. De même, dans le but d'analyser l'influence de la vitesse du véhicule sur les courbes expérimentales obtenues, les relevés sont effectués à 6 vitesses différentes. Les valeurs de vitesse choisies correspondent à celles qui seront rencontrées lors des mesures mobiles en milieu urbain (table 3.2).

Dans ce contexte d'environnement homogène et dégagé, la température d'air est supposée présenter de faibles variations sur toute la distance de mesure. Les trajets aller

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figure 3.2 : *Photographies prises au niveau des quatre points cardinaux pour l'aérodrome d'Essey-lès-Nancy. (a) vue Ouest. (b) vue Nord. (c) vue Est. (d) vue Sud. (e) Vue aérienne du site de mesure (Lat/Long : 48°41' N 6°13' E).*

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figure 3.3 : *Photographies prises au niveau des quatre points cardinaux pour Coincourt. (a) vue Ouest. (b) vue Nord. (c) vue Est. (d) vue Sud. (e) Vue aérienne du site de mesure (Lat/Long : 48°42' N 6°36' E).*

Première série de mesures	Seconde série de mesures
Période diurne (14h), 6 Aller/Retour	Période nocturne (1h), 6 Aller/Retour
1 Aller/Retour à 10 km.h^{-1}	1 Aller/Retour à 10 km.h^{-1}
1 Aller/Retour à 20 km.h^{-1}	1 Aller/Retour à 20 km.h^{-1}
1 Aller/Retour à 30 km.h^{-1}	1 Aller/Retour à 30 km.h^{-1}
1 Aller/Retour à 40 km.h^{-1}	1 Aller/Retour à 40 km.h^{-1}
1 Aller/Retour à 50 km.h^{-1}	1 Aller/Retour à 50 km.h^{-1}
1 Aller/Retour à 60 km.h^{-1}	1 Aller/Retour à 60 km.h^{-1}

Table 3.2 : *Organisation du protocole expérimental.*

et retour sont censés présenter des profils de température d'air similaires. Par ailleurs, du fait de l'installation de l'enceinte de mesure, la vitesse du véhicule ne devrait pas influer fortement sur les courbes obtenues.

La piste d'atterrissage de l'aérodrome d'Essey-les-Nancy ainsi que la route départementale 23F à proximité de la commune de Coincourt sont les deux sites sélectionnés. Dans un premier temps, un tracé rectiligne d'une longueur de 1100 m a été établi sur la piste d'atterrissage d'Essey-les-Nancy (figure 3.2). L'environnement proche de la piste est dépourvu de bâti et de végétation haute. Sur ce site, trois séries de mesures diurnes ont pu être réalisées les 12, 13 et 20 mars 2012. Dans un second temps, un tronçon de route quasi rectiligne de 1100 m a été sélectionné sur la D23F entre les communes de Coincourt et de Moncourt (figure 3.3). De même que pour la piste de l'aérodrome, l'environnement proche du site de mesure est dépourvu de bâti et de végétation haute, mis à part la présence d'un arbre au bord de la route au milieu du parcours. Des champs labourés ou non sont présents de part et d'autre de la route. Dans ce cas, quatre séries de mesures – deux nocturnes, deux diurnes – ont été réalisées les 27 et 28 mars 2012.

3.2.3 Résultats et analyse

Seules trois sessions de mesure sont présentées ici, les courbes correspondant aux autres sessions sont consultables en Annexe B.

Les trajets effectués en période diurne à l'aérodrome présentent des profils de température d'air plutôt semblables les uns aux autres (figure 3.4). Les trajets aller sont très similaires aux trajets retour. La vitesse du véhicule ne semble pas avoir d'influence ni sur le profil ni sur la valeur moyenne de la température d'air. L'écart type maximal enregistré est de 0,6°C, une valeur proche de l'incertitude de mesure du capteur (0,2°C).

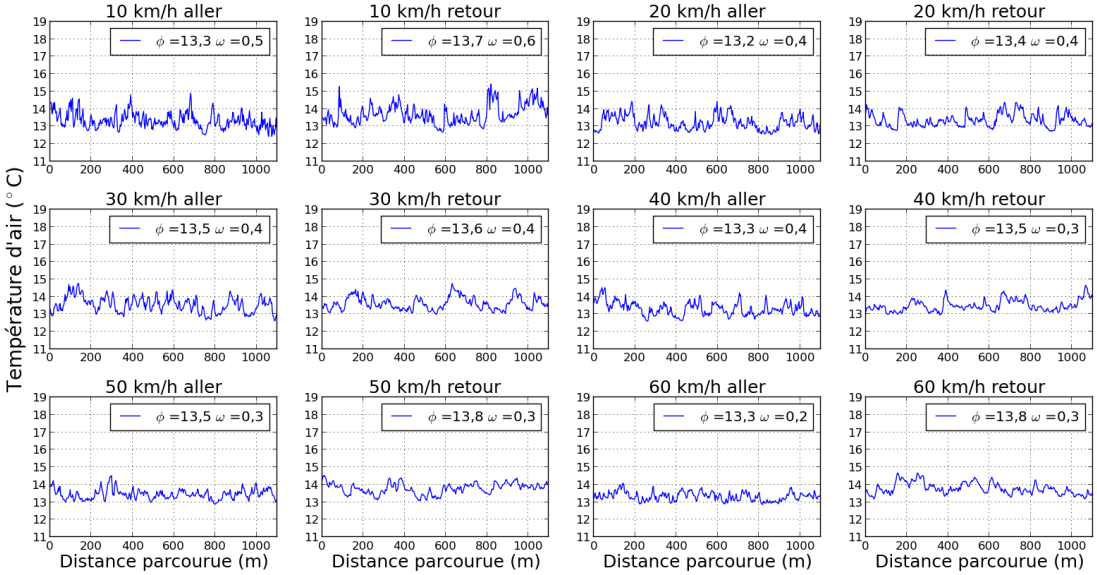


Figure 3.4 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 12 mars 2012 en période diurne à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon.*

La signature thermique des mesures à l'aérodrome reste globalement similaire à celle des mesures diurnes à Coincourt (figure 3.5). En effet, les trajets aller et retour ont des profils assez proches, et la température d'air moyenne reste stable indépendamment de la vitesse du véhicule. Les écarts type observés à Coincourt sont très légèrement supérieurs à ceux relevés à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy.

Les mesures nocturnes réalisées à Coincourt diffèrent des sessions diurnes (figure 3.6). L'amplitude de température d'air relevée est plus élevée, de même que l'écart type, qui est compris entre 0,6°C et 1,4°C. Quelle que soit la vitesse du véhicule, les profils de température obtenus sont perturbés, avec parfois des variations de température d'air de plusieurs degrés en l'espace de 100 mètres.

L'ensemble de ces tests préliminaires indique que la variabilité spatiale de la température d'air est liée à la dynamique journalière. Cette constatation peut être mise en relation avec les variations journalières de l'état de stabilité de la CLA. Les mesures diurnes à l'aérodrome et à Coincourt présentent des profils de température d'air plutôt constants, et les moyenne et écart type calculés sont proches d'un parcours à l'autre. Cette observation peut en partie s'expliquer par les conditions atmosphériques instables en période diurne qui favorisent le brassage d'air, et par conséquent l'homogénéisation spatiale de la température d'air. À l'inverse, les profils de température issus des

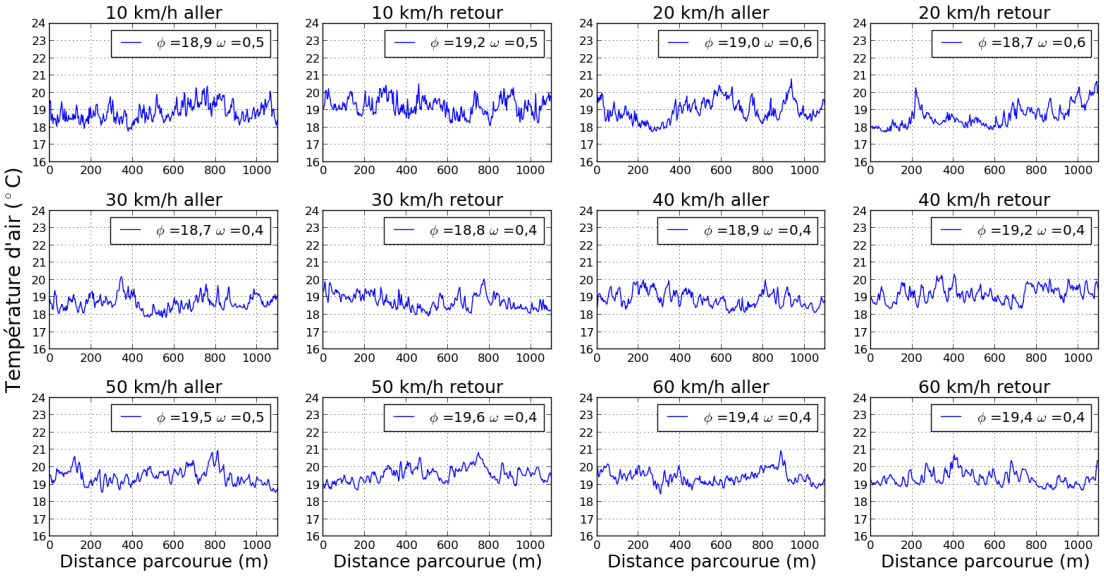


Figure 3.5 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 27 mars 2012 en période diurne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon.*

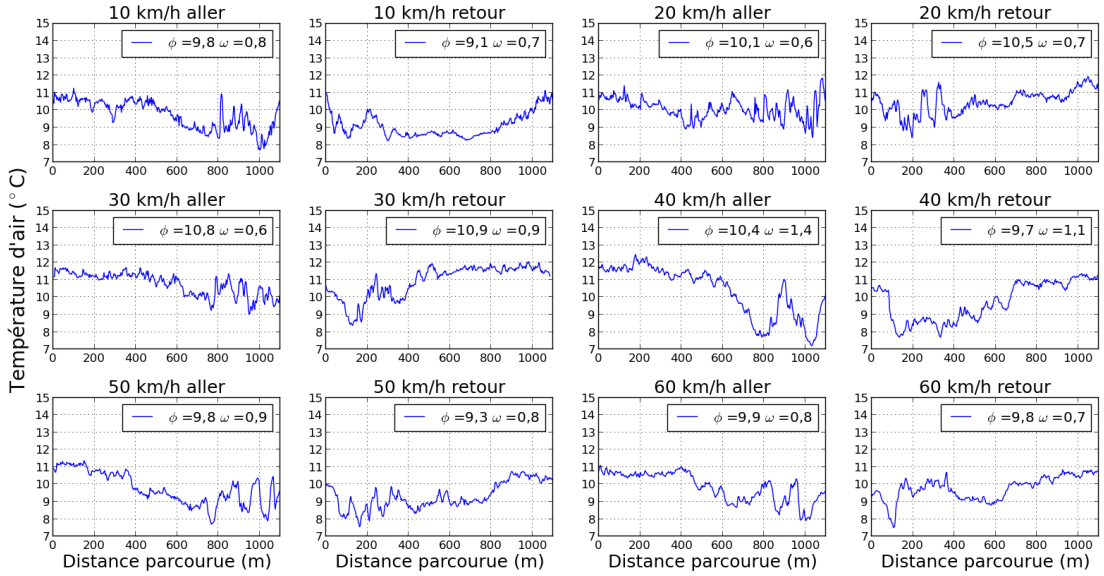


Figure 3.6 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 27 mars 2012 en période nocturne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon.*

mesures nocturnes à Coincourt sont plus chaotiques, avec des variations de température abruptes. La première moitié des profils de température aller est relativement chaude et constante, tandis que la seconde moitié de ces même profils est plus froide tout en présentant des oscillations de température d'air de plusieurs degrés. Une interprétation possible de ce phénomène est que les conditions atmosphériques stables – observées généralement en période nocturne par vent faible – peuvent aboutir à une stratification thermique des couches d'air proches de la surface terrestre. Ainsi, il est possible d'observer des gradients de température d'air important lorsque des mesures mobiles sont réalisées. Par ailleurs, les variations observées au niveau de la seconde moitié des profils de température aller peuvent également être causées par des processus physiques propres au site de mesure, et qui n'ont pas été identifiés (effet topographique ou advection d'air froid dû à une variation ponctuelle de l'occupation du sol).

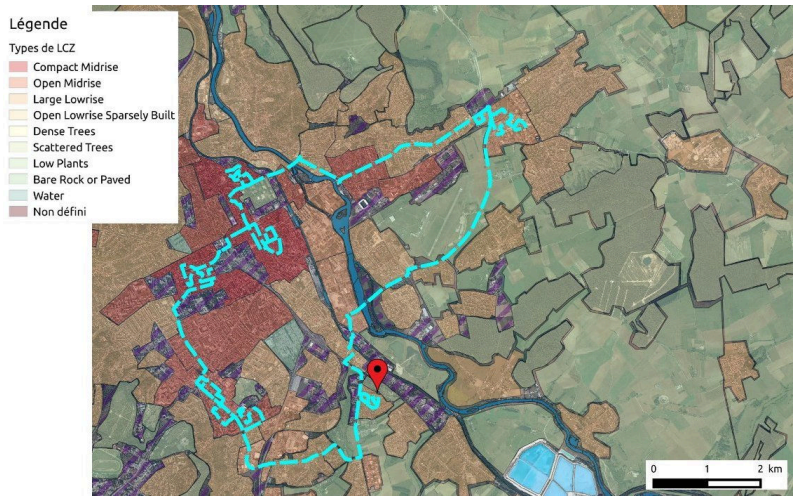
En outre, ces tests préliminaires tendent à démontrer que la mesure de la température d'air n'est pas affectée par la vitesse du véhicule. En effet, les variations de la vitesse du véhicule n'ont pas semblé avoir d'influence significative sur les profils de température obtenus.

3.3 Protocole de mesures mobiles

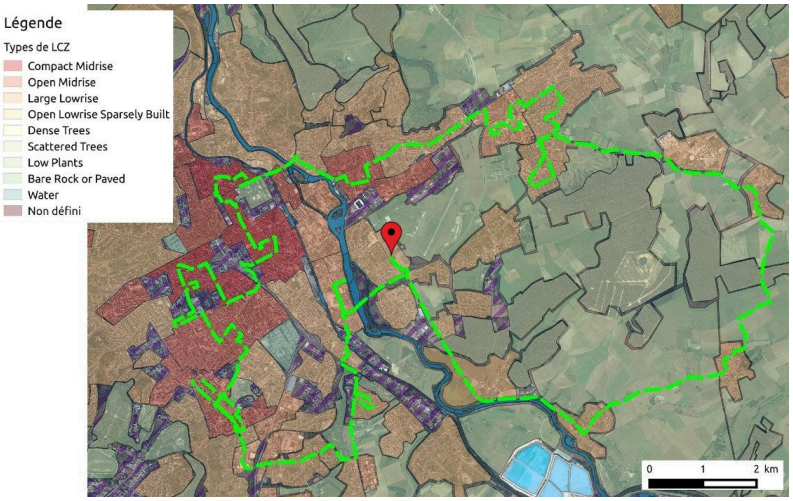
L'objectif premier de cette série de mesures embarquées est de déterminer si les LCZ construites à Nancy présentent effectivement un comportement thermique particulier pour des conditions de nébulosité et de vent faibles. Il s'agit également d'étudier la distribution spatiale de température à l'intérieur de chacune des LCZ, à l'échelle microclimatique. Afin de répondre à cet objectif, la température d'air a été relevée dans une sélection de treize LCZ en période diurne ainsi qu'en période nocturne.

3.3.1 Itinéraires de mesures

Cette première série de mesures s'est déroulée durant les été 2012 et 2013. En 2012, l'itinéraire traverse six LCZ (figure 3.7(a)). Le tracé de cet itinéraire insiste sur l'étude de la distribution de température à l'intérieur des LCZ, en choisissant de retenir un nombre réduit de LCZ, mais en parcourant en détail chacune d'entre elles. En effet, la mesure mobile offre la possibilité d'enregistrer la température d'air dans de nombreuses rues



(a)



(b)

Figure 3.7 : *Itinéraires de mesures dans les LCZ en période diurne et nocturne. Le temps de parcours est d'environ 2h30 dans les deux cas. Les points de départ et d'arrivée sont signalés par le marqueur rouge. (a) six LCZ étudiées en 2012. (b) treize LCZ étudiées en 2013.*

d'une même LCZ. Ainsi, l'itinéraire adopté en 2012 sillonne de manière approfondie chacune des six LCZ retenues, pour une durée moyenne de trajet d'environ 2h30.

En 2013, l'itinéraire établi a plutôt insisté sur la possibilité de comparer plusieurs LCZ entre elles. Le tracé choisi conserve les six LCZ étudiées l'été précédent et concerne la totalité des treize LCZ construites de façon complète (figure 3.7(b)). Il est élaboré dans l'idée de parcourir un nombre de LCZ plus important qu'en 2012, afin de pouvoir comparer les comportements thermiques de différents types de LCZ entre eux, ainsi que ceux de différentes LCZ de même type. Cependant, afin de ne pas augmenter significativement la durée de réalisation de l'itinéraire, les treize LCZ n'ont pas été parcourues en détail. En effet, du fait de l'évolution temporelle de la température d'air régionale, la mesure en début de session n'est pas identique à celle de fin de session. Il est donc nécessaire de retenir des durées de parcours réduites, afin de ne pas enregistrer un écart de température d'air trop important entre le début et la fin de la session de mesure. Ainsi en 2013, plus de LCZ ont été parcourues par rapport à 2012, ce qui implique de traverser ces LCZ assez rapidement afin de conserver un temps de parcours d'environ 2h30.

D'une année sur l'autre, les sites de contrôle ont été conservés. Ainsi les tracés de 2012 et 2013 passent dans l'ensemble des 26 sites de contrôle.

Par ailleurs, la topographie de l'agglomération de Nancy a été prise en compte lors de l'établissement des itinéraires de mesure, avec une carte topographique de résolution 1 mètre. En effet, des variations d'altitude importantes dans une LCZ pourraient influencer de façon significative la distribution spatiale de température intra-LCZ. Dans le cas présent, aucune des treize LCZ concernées par l'étude ne présente de grandes variations d'élévation. La différence d'altitude maximale observée à l'intérieur d'une LCZ est de 30 mètres environ (NAT). De même, afin de ne pas introduire un biais dans la comparaison de leur comportement thermique, les LCZ étudiées possèdent des altitudes moyennes proches. La LCZ la plus haute (NAT) est située à une altitude de 250 mètres environ tandis que la LCZ la plus basse (MBR) possède une altitude approximative de 200 mètres.

3.3.2 Conditions expérimentales

Les mesures mobiles se sont déroulées entre juillet et septembre en 2012, et entre juillet et septembre en 2013. Elles ont été réalisées à la fois en période nocturne et en

période diurne. Pour la période diurne, le but est de réaliser des mesures mobiles au moment où la température d'air atteint son maximum journalier. Ainsi, l'heure choisie pour les mesures diurnes est 14 h en 2012, puis de 15 h en 2013. Les mesures nocturnes ont été effectuées à 0h, soit au moment où le phénomène d'ICU est pleinement développé. En effet, de nombreuses publications indiquent que l'amplitude maximale de l'ICU peut être observée environ 3 heures après le coucher du soleil [Oke, 1987] [Holmer *et al.*, 2007] [Erell *et al.*, 2011].

Les mesures ont été réalisées en majorité dans des conditions météorologiques anticycloniques affichant une vitesse de vent faible (inférieure à 6,2 $m.s^{-1}$) et une faible nébulosité (inférieure ou égale à 2 octas). Afin d'évaluer l'influence de ces deux paramètres sur la température d'air, plusieurs autres relevés ont été réalisés en présence d'une nébulosité et de vitesse de vent plus élevées. En outre, la totalité des sessions se sont déroulées sur une chaussée complètement sèche. Pour la plupart des sessions, les conditions météorologiques observées le jour de la mesure étaient similaires aux conditions observées le jour précédent. En cas de précipitations, les mesures prévues ont été reportées de 24 heures au minimum.

L'ensemble des dates de mesure ainsi que des données concernant les conditions météorologiques au moment des mesures sont disponibles en Annexe C.

3.4 Méthodes de traitement des données expérimentales

3.4.1 Traitement des mesures en zone mitoyenne de deux LCZ

Pendant les mesures mobiles, le véhicule parcourt plusieurs LCZ, et passe donc en l'espace de quelques mètres d'une LCZ à l'autre. Or, lorsque le véhicule change de LCZ, le comportement thermique ne varie pas forcément brutalement. En effet, bien que chaque type de LCZ ait un comportement thermique propre, la zone frontalière entre deux LCZ de type différents est souvent l'objet d'une transition thermique progressive. Dans le cas de la transition d'une première LCZ chaude vers une seconde LCZ légèrement plus fraîche, la température d'air mesurée peut décroître de manière régulière jusqu'à se stabiliser lorsque le véhicule s'est éloigné des limites de la seconde LCZ et a pénétré plus au centre de celle-ci.

La présente étude a pour objectif d'analyser le comportement thermique des LCZ, en effectuant des mesures mobiles dans chacune d'entre elles de façon successive. De

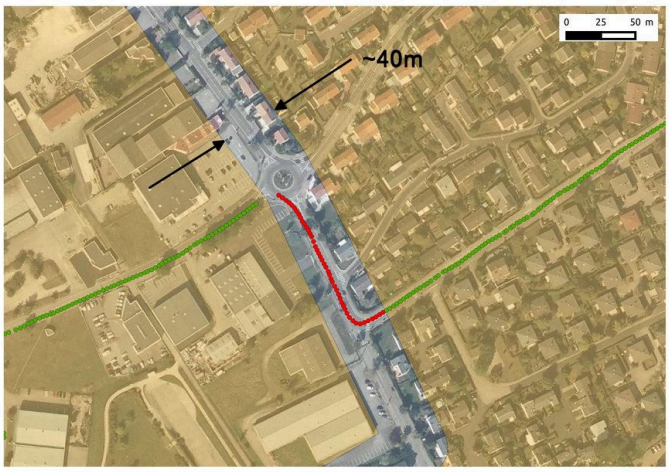


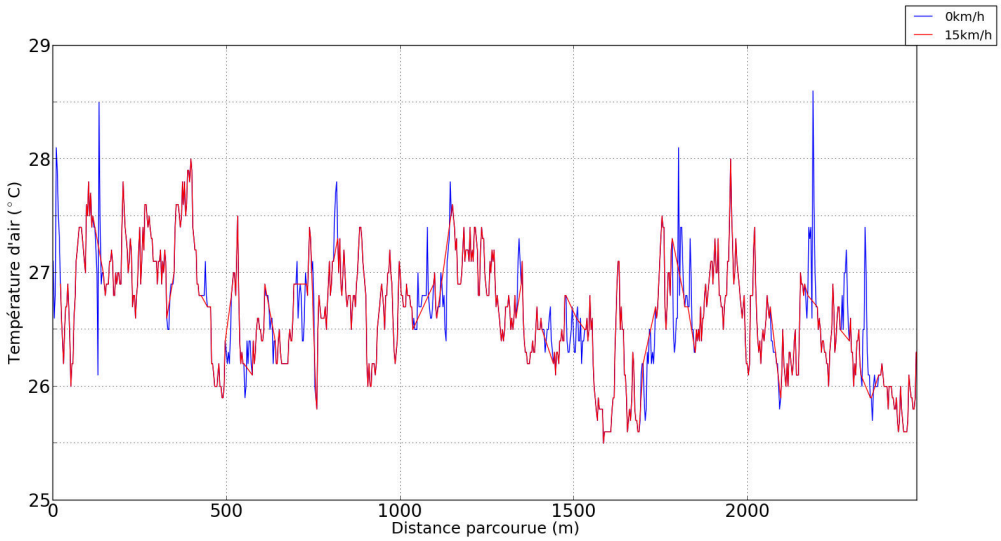
Figure 3.8 : *Exemple de traitement des mesures en zone mitoyenne entre deux LCZ. Les points verts sont les points conservés, les points rouges sont les points écartés. La zone non prise en compte correspond à une bande d'environ 40 m de large.*

ce fait, l'examen des transitions thermiques observées à la frontière de deux LCZ n'est pas pris en compte dans ce travail. Ainsi, les points de mesure correspondant aux zones frontalières entre LCZ ont été écartés (points rouges sur la figure 3.8).

En milieu urbain, la frontière entre deux LCZ se situe généralement au centre d'une route ou d'une rue. Les points de mesure se situant à une distance de moins de 20 mètres des limites des LCZ n'ont pas été pris en compte. La distance choisie (20 mètres) a été déterminée de façon empirique. L'espace non pris en compte, qualifiée de "zone tampon", correspond à une surface légèrement supérieure à l'emprise de la rue mitoyenne aux deux LCZ. Dans le cadre de cette étude, il a été choisi de construire une zone tampon de petite taille afin de conserver un nombre de points de mesure important.

3.4.2 Traitement des relevés réalisés à faible vitesse et à l'arrêt

Pendant les sessions de mesure, le véhicule instrumenté est engagé dans le trafic routier. La chaleur produite par les autres véhicules peut artificiellement augmenter la température d'air enregistrée et causer un biais dans les données récoltées. Ce phénomène est particulièrement observé pour les points de mesure correspondant aux vitesses faibles ainsi qu'aux arrêts du véhicule. De ce fait, les relevés réalisés lors des arrêts du véhicule ont été écartés du jeu de données. De même, les mesures effectuées en deçà d'une vitesse seuil n'ont pas été pris en compte.



(a)

(b)

Figure 3.9 : *(a) Profils de température d'air correspondant à l'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1} pour la LCZ OUE. (b) Localisation des points écartés lors de l'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1} pour la LCZ OUE. En vert, l'ensemble des points de mesures. En orange, les points de mesures conservés après l'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1}.*

L'influence de la valeur de vitesse seuil V_s sur la température d'air mesurée a été évaluée. Un ensemble de douze trajets a d'abord été sélectionné dans six LCZ différentes. Ceux-ci ont été choisis de manière aléatoire, en période diurne et en période nocturne. Sur chacun de ces trajets, une vitesse seuil de 15 km.h^{-1} a été appliquée.

La figure 3.9(a) présente deux profils de température d'air différents correspondant à l'application de la vitesse seuil choisie. Cet exemple illustre la relation entre vitesse faible du véhicule et pics de température d'air. En effet, pour le profil de température correspondant à l'application de la vitesse seuil (en rouge), certains points de mesure correspondant à des pics de température ponctuels sont écartés. La figure 3.9(b) démontre que les points non pris en compte correspondent bien aux intersections et aux virages du véhicule.

Pour les douze trajets sélectionnées, l'application de cette vitesse seuil n'a eu aucun impact sur la température d'air moyenne de la session. La suppression de certains pics de température ponctuels a influé de façon modeste sur l'amplitude de température d'air – calculée ici comme la différence entre la température d'air au point le plus chaud du parcours et la température d'air au point le plus froid – dans 50% des cas étudiés (table 3.3).

Certaines LCZ (JAR, PVE) peuvent être parcourues avec très peu d'arrêts et de ralentissements du véhicule, ainsi l'application d'une vitesse seuil ne supprime qu'un nombre modéré de points de mesure (moins de 10% du total des points de mesure de la session). À l'inverse, pour d'autres LCZ (CEN, OUE, TRM), les arrêts sont plus fréquents et le trafic routier plus dense. L'application d'une vitesse seuil de 15 km.h^{-1} a pour conséquence d'écarter un nombre significatif de points de mesure (plus de 25% des points de mesure supprimés pour certaines sessions), particulièrement en période diurne en raison du trafic routier important.

Au regard des résultats obtenus, la valeur de vitesse seuil de 15 km.h^{-1} semble être un compromis satisfaisant entre la suppression des pics de température ponctuels dus à l'apport thermique du trafic d'une part, et la conservation d'un nombre de points de mesure élevé pour chaque session dans les LCZ d'autre part.

3.4.3 Correction temporelle de la température d'air

Dans le cadre de la réalisation des boucles de mesure, du fait de l'évolution de la température d'air régionale entre le début et la fin d'une session de mesure – aux

LCZ	Période	Amplitude de température pour V_s = 0 km.h^{-1} (°C)	Amplitude de température pour V_s = 15 km.h^{-1} (°C)	Variation d'amplitude (°C)	Pourcentage de points supprimés pour V_s = 15 km.h^{-1} (%)
CEN	Diurne	4,2	3,6	-0,6	29
CEN	Nocturne	2,1	1,9	-0,2	21
JAR	Diurne	2,5	2,5	-	4
JAR	Nocturne	1,3	0,8	-0,5	7
NAT	Diurne	3,5	3,5	-	14
NAT	Nocturne	1,9	1,9	-	11
OUE	Diurne	3,1	2,5	-0,6	24
OUE	Nocturne	1,3	1,1	-0,2	20
PVE	Diurne	2,4	2,4	-	2
PVE	Nocturne	2,2	2,2	-	4
TRM	Diurne	3,7	3,7	-	24
TRM	Nocturne	2,2	1,4	-0,8	17

Table 3.3 : *Influence de l'application d'une vitesse seuil V_s de 15 km.h^{-1} sur l'amplitude de température d'air mesurée et sur le nombre de points de mesure écartés du jeu de données.*

alentours de 2°C pour les sessions de mesure nocturnes, une correction temporelle de la température d'air est appliquée.

La correction consiste à modifier la température d'air mesurée proportionnellement à l'écart temporel entre le début – ou la fin – de la session et l'instant de la mesure (figure 3.10). Cette correction a pour but de s'affranchir de l'évolution de la température d'air régionale et de pouvoir comparer la température d'air d'une LCZ parcourue en début de session avec celle d'une LCZ parcourue en milieu ou en fin de session.

La température de référence – c'est à dire la température à partir de laquelle les autres températures sont corrigées – correspond dans certains cas à la température d'air au début de la session, et dans d'autres cas à la température d'air en fin de session. Si la température de référence est celle du début de la session, la température d'air corrigée s'exprime de la façon suivante :

$$T_{air,correction} = T_{air,mesure} - \tau \times (t_{debut} - t_{mesure}) \tag{3.1}$$

Avec

$$\tau = \frac{T_{air,fin} - T_{air,debut}}{t_{fin} - t_{debut}} \tag{3.2}$$

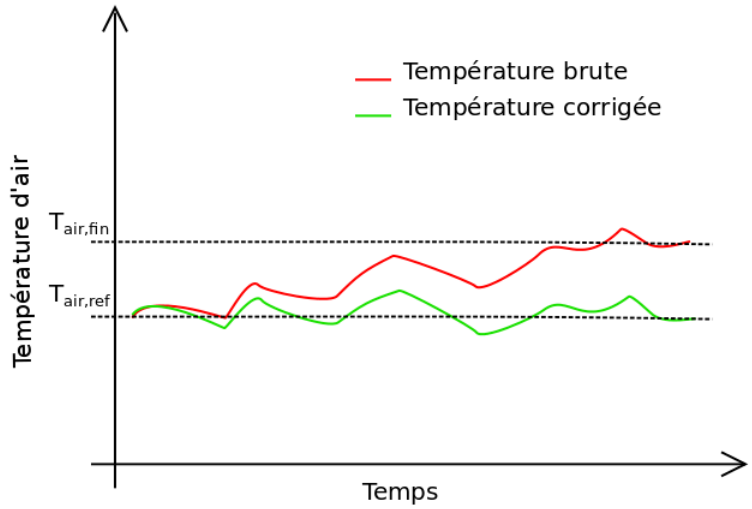


Figure 3.10 : *Exemple de correction temporelle de température d'air pour une température de référence située au début de la session. Le profil de température brute est en rouge, le profil de température corrigé est en vert.*

Dans le cas où la température de référence est celle mesurée à la fin de la session, la température d'air corrigée s'exprime de la façon suivante :

$$T_{air,correction} = T_{air,mesure} + \tau \times (t_{mesure} - t_{fin}) \tag{3.3}$$

3.4.4 Définition des variables d'analyse de la température d'air

Les relevés brutes de température d'air nécessitent d'être mis en forme afin de fournir une information concernant les distributions spatiale et temporelle de température d'air aussi bien à l'échelle microclimatique qu'à l'échelle locale. Cependant, du fait de leur relative complexité, il paraît nécessaire de détailler les calculs réalisés.

Les calculs suivants considèrent N_p comme étant le nombre de points de mesure enregistrés sur une section de route p et $T_{air,p,m}$ la température d'air mesurée au point m de la section de route p. L'amplitude de température d'air sur la section de route p, notée $\Delta T_{air,p}$ (ou ΔT_{air}), se défini comme l'écart de température d'air entre les 7 points consécutifs les plus chauds ($T_{air,p,max}$) et les 7 points consécutifs les plus froids ($T_{air,p,min}$). Le nombre de 7 points a été déterminé arbitrairement : la densité spatiale de mesure étant de 3 m, la prise en compte de 7 points de mesure permet de couvrir une zone

d'environ 21 m, ce qui est une longueur approximativement inférieure d'un facteur dix aux dimensions des rues traversées dans les LCZ les plus densément bâties.

Cette amplitude s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta T_{air,p} = T_{air,p,max} - T_{air,p,min} \tag{3.4}$$

Avec

$$T_{air,p,max} = max\left(\sum_{i=0}^{i=6} T_{air,p,m+i}\right) \tag{3.5}$$

Et

$$T_{air,p,min} = min\left(\sum_{i=0}^{i=6} T_{air,p,m+i}\right) \tag{3.6}$$

La moyenne spatiale de température d'air sur la section de route p, notée $\overline{T_{air,p}}$, s'écrit :

$$\overline{T_{air,p}} = \frac{1}{N_p} \sum_{m=1}^{m=N_p} T_{air,p,m} \tag{3.7}$$

La différence entre la moyenne spatiale de température d'air d'une LCZ X et la moyenne spatiale de température d'air d'une LCZ Y, notée $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$, s'exprime de la façon suivante :

$$\Delta T_{air,LCZ\ X-Y} = \overline{T_{air,LCZ\ X}} - \overline{T_{air,LCZ\ Y}} \tag{3.8}$$

La différence à la moyenne spatiale de température d'air au point m pour la section de route p, notée $\delta T_{air,p,m}$, s'écrit :

$$\delta T_{air,p,m} = T_{air,p,m} - \overline{T_{air,p}} \tag{3.9}$$

En considérant N_{LCZ} le nombre de trajets effectués pour une LCZ donnée, l'écart moyen à la moyenne spatiale de température d'air au point m, noté $\overline{\delta T_{air,m}}$, se défini comme :

$$\overline{\delta T_{air,m}} = \frac{1}{N_{LCZ}} \sum_{p=1}^{p=N_{LCZ}} \delta T_{air,p,m} \tag{3.10}$$

Par ailleurs, il est nécessaire de préciser la notion de température d'air d'un site de contrôle. En considérant N_{SCn} comme le nombre de points de mesure enregistrés à l'intérieur d'un site de contrôle donné SCn, la température d'air du site de contrôle,

notée $T_{air,SCn}$, s'écrit :

$$T_{air,SCn} = \frac{1}{N_{SCn}} \sum_{m=1}^{m=N_{SCn}} T_{air,SCn,m} \tag{3.11}$$

3.5 Comportements thermiques intra-LCZ

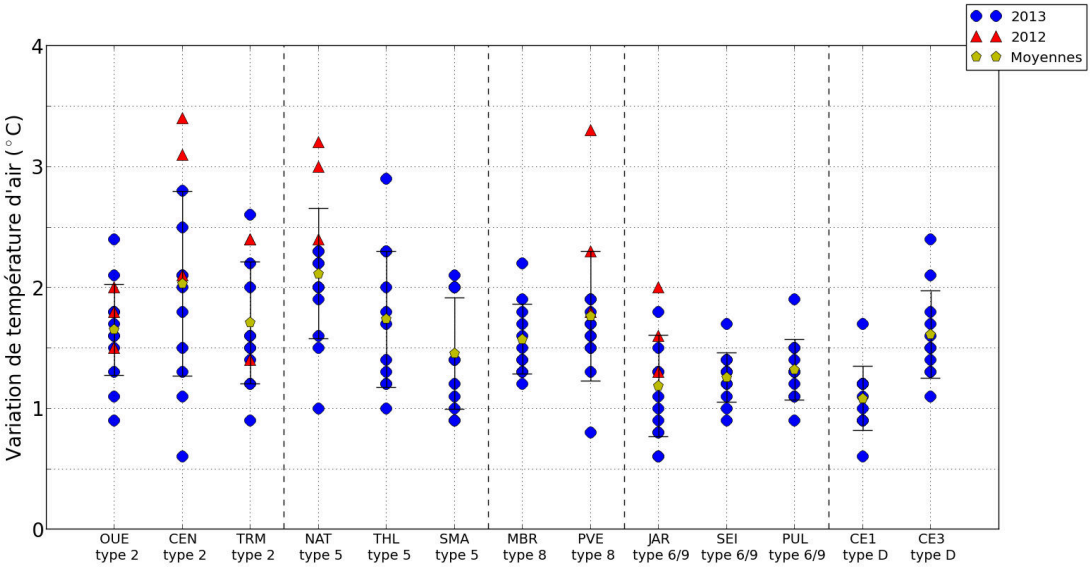
La validation du concept de LCZ consiste à vérifier l'hypothèse selon laquelle les LCZ sont construites à la fois selon une homogénéité au niveau des caractéristiques urbaines et une homogénéité en matière de température d'air. Dans une perspective de diagnostic de l'ICU, il s'agit de pouvoir considérer les LCZ comme étant des zones assez homogènes du point de vue thermique afin de pouvoir les comparer entre elles. Ainsi, cette étape de validation s'organise en trois temps :

1. Elle se focalise d'abord sur l'amplitude de température d'air ΔT_{air} dans les LCZ, afin notamment de connaître quel est l'ordre de grandeur de cette amplitude selon les périodes de mesure.
2. Elle se poursuit en analysant la distribution spatiale de température d'air dans les LCZ. En effet, il existe des variations ponctuelles de température d'air à l'intérieur des LCZ, et une anomalie thermique systématique, qu'elle soit positive ou négative, peut avoir des conséquences sur les valeurs d'amplitude relevées.
3. Elle se conclut par l'étude du comportement thermique des sites de contrôle, afin d'interroger la relation entre caractéristiques urbaines et comportement thermique à l'échelle microclimatique.

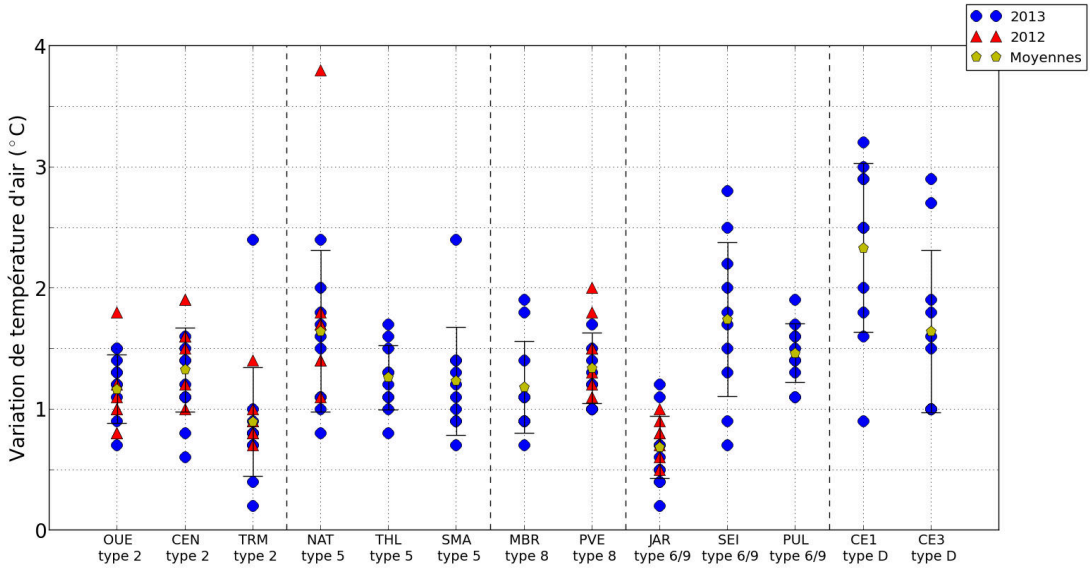
3.5.1 Amplitude de température d'air

L'amplitude de température d'air dans les treize LCZ étudiées est présentée figure 3.11 et table 3.4. En journée, l'amplitude de température moyenne est comprise entre 1,5°C et 2,1°C pour les LCZ de type Compact midrise, Open midrise, Large lowrise, ainsi que pour CE3. Dans le cas des types Open lowrise / Sparsely built et de CE1, l'amplitude de température moyenne est plutôt comprise entre 1,1°C et 1,3°C.

En outre, la distribution des valeurs d'amplitude varie selon les types de LCZ. En effet, les LCZ de type Compact midrise et Open midrise présente un écart type plus élevé (0,6°C en moyenne) que les LCZ de types Open lowrise / Sparsely built et Low plants (0,3°C en moyenne).



(a)



(b)

Figure 3.11 : *Amplitude de température d'air $\Delta T_{air,p}$ pour les 13 LCZ étudiées. Les triangles rouges correspondent aux trajets effectués en 2012, et les ronds bleus correspondent aux trajets réalisés en 2013. (a) Période diurne. (b) Période nocturne.*

Code de la LCZ	Amplitude de température : moyenne			Amplitude de température : écart type		
	Diurne	Nocturne	Diurne - Nocturne	Diurne	Nocturne	Diurne - Nocturne
OUE	1,7	1,2	- 0,5	0,4	0,3	- 0,1
CEN	2.0	1,3	- 0,7	0,8	0,3	- 0,5
TRM	1,7	0,9	- 0,8	0,5	0,4	- 0,1
NAT	2,1	1,6	- 0,5	0,5	0,7	0,2
THL	1,7	1,3	- 0,4	0,6	0,3	- 0,3
SMA	1,5	1,2	- 0,3	0,5	0,4	- 0,1
MBR	1,6	1,2	- 0,4	0,3	0,4	0,1
PVE	1,8	1,3	- 0,5	0,5	0,3	- 0,2
JAR	1,2	0,7	- 0,5	0,4	0,3	- 0,1
SEI	1,3	1,7	0,4	0,2	0,6	0,4
PUL	1,3	1,5	0,2	0,3	0,2	- 0,1
CE1	1,1	2,3	1,2	0,3	0,7	0,4
CE3	1,6	1,6	-	0,4	0,7	0,3

Table 3.4 : *Moyennes et écarts types de l'amplitude de température d'air en périodes diurne et nocturne.*

Les LCZ de type Compact midrise et Open midrise ont tendance à démontrer des amplitudes de température supérieures à 2°C, entraînant des valeurs d'écart type plus important que pour les autres LCZ. Une cause probable de cette situation est l'importance du trafic routier au sein de ces LCZ. En effet, elles sont situées au centre et en proche périphérie de l'agglomération, et de nombreux véhicules circulent dans les rues empruntées par le véhicule instrumenté durant la période de mesure diurne. Ainsi, la production de chaleur d'origine anthropique due au trafic routier est possiblement à l'origine d'anomalies positives de température ponctuelles, celles-ci influant sur les valeurs d'amplitude de température calculée.

À l'exception des LCZ Low plants et de SEI, l'amplitude de température d'air est très majoritairement comprise entre 0,5°C et 2°C en période nocturne (figure 3.11(b)). 91% des amplitudes mesurées sont inférieures à 2°C. L'amplitude de température moyenne est inférieure à 1,7°C pour l'ensemble des LCZ urbanisées, et seule CE1 possède une amplitude de température moyenne supérieure à 2°C. Excepté SEI, NAT et les LCZ de type Low plants, les écarts types enregistrés sont faibles (inférieurs ou égaux à 0,4°C) et similaires d'une LCZ à l'autre.

L'amplitude de température moyenne diminue en période nocturne par rapport à la période diurne dans le cas de JAR et des LCZ de type Compact midrise, Open

midrise, Large lowrise, tandis qu'elle augmente pour les LCZ PUL, SEI et CE1. En outre, concernant la distribution des valeurs d'amplitude, la majorité des LCZ étudiées (8 sur 13) présentent un écart type plus faible en période nocturne qu'en période diurne.

La conjonction de plusieurs causes peuvent venir expliquer cette baisse d'amplitude entre les deux périodes :

- En période diurne, les ombres portées des bâtiments et de la végétation influent localement sur la température d'air, ce qui peut augmenter l'amplitude de température calculée
- À cette même période, la quantité de flux CLO absorbée par le canyon urbain diffère selon l'orientation des rues, ce qui influence les valeurs de température d'air relevées d'une rue à l'autre, entraînant potentiellement à la hausse l'amplitude de température de la LCZ
- En période nocturne, la production de chaleur provenant du trafic routier est plus faible qu'en période diurne, limitant ainsi l'enregistrement de températures plus élevées propice à l'augmentation de l'amplitude de température

Par ailleurs, l'augmentation significative de l'amplitude de température en période nocturne pour la LCZ CE1 – et dans une moindre mesure SEI – va à l'encontre de la tendance générale observée pour les autres LCZ étudiées. À ce stade, l'étude de l'amplitude de température ne permet pas d'expliquer de tels comportements thermiques. Dans ce cas précis et afin d'étudier les zones chaudes et froides sur lesquelles repose le calcul d'amplitude de température, les variations de la distribution spatiale de température d'air doivent être analysées plus en détail.

3.5.2 Distribution spatiale de température d'air

Le calcul de l'écart moyen à la moyenne spatiale $\overline{\delta T_{air,m}}$ permet de mettre en évidence la présence de singularités thermiques à l'intérieur même des LCZ. En effet, si une zone du trajet présente une température d'air systématiquement plus élevée (resp. plus faible) que la température moyenne de la LCZ, alors cette zone apparaîtra comme étant un point chaud (resp. froid) lors du calcul de $\overline{\delta T_{air,m}}$. Dans le cas d'une zone alternativement plus chaude ou plus froide que la température moyenne de la LCZ selon les jours, celle-ci n'apparaîtra pas comme étant un point chaud ou froid systématique. Dans le cadre de cette étude, les points chauds et froids systématiques sont définis selon deux critères, à savoir :

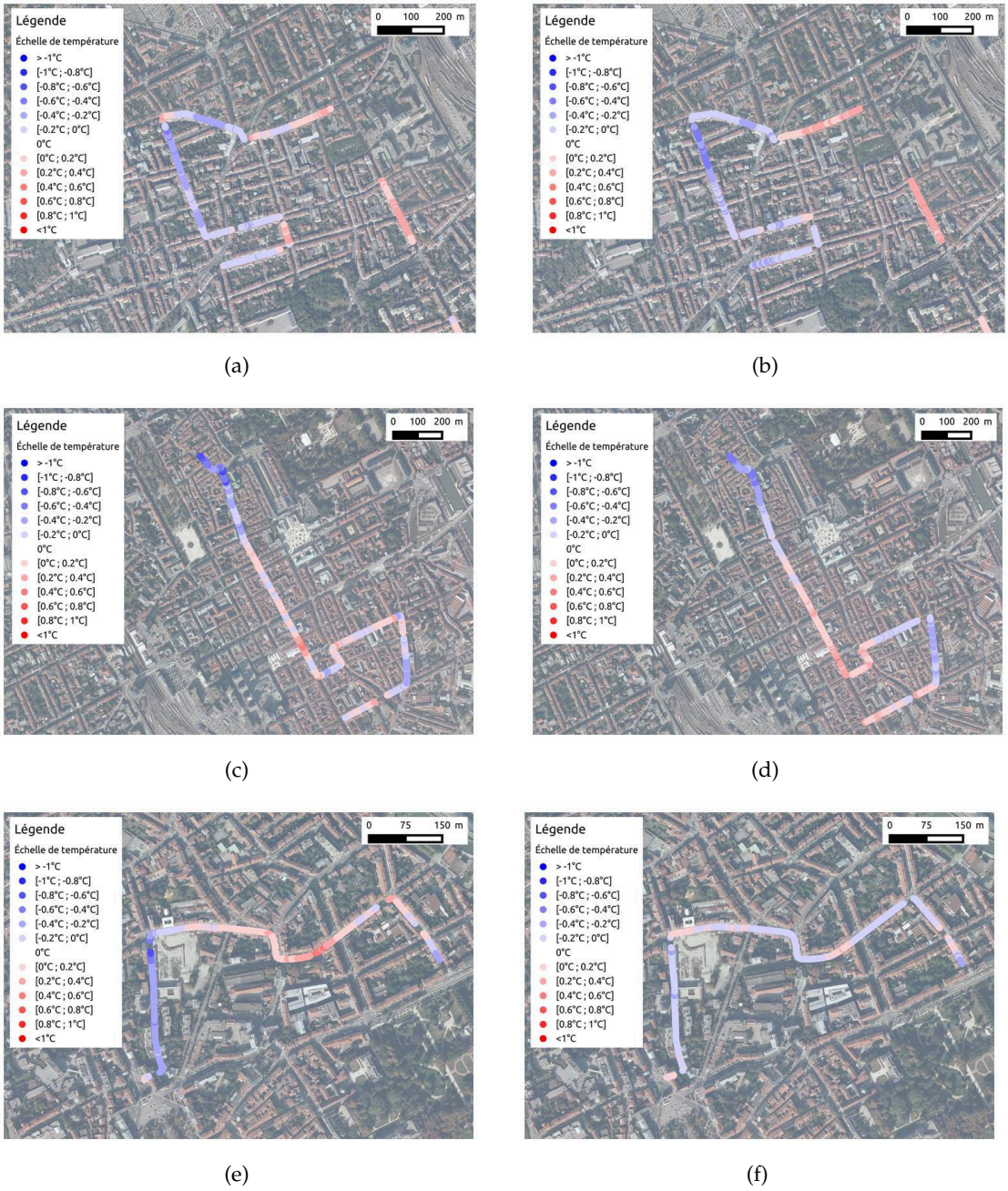
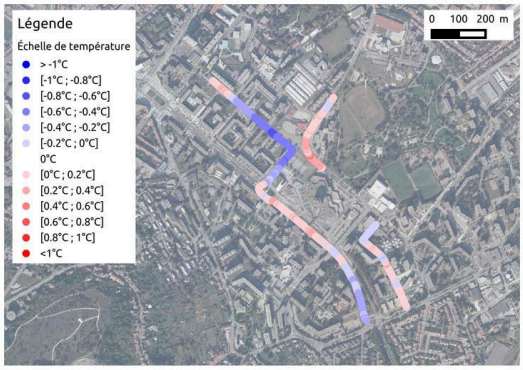
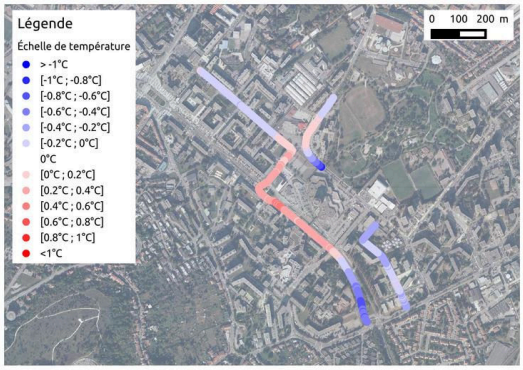


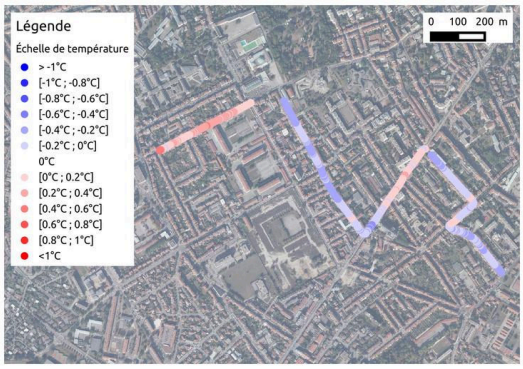
Figure 3.12 : *Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air* $\overline{\delta T_{air,m}}$ *calculés pour les LCZ suivantes : (a) OUE diurne. (b) OUE nocturne. (c) CEN diurne. (d) CEN nocturne. (e) TRM diurne. (f) TRM nocturne.*



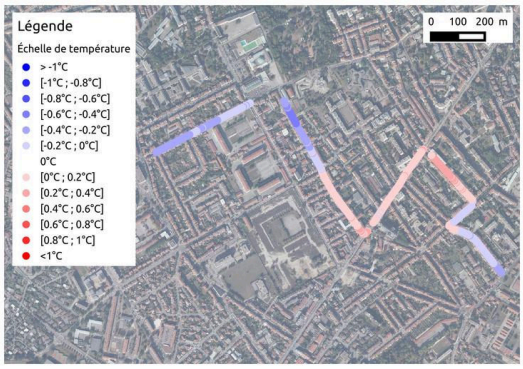
(a)



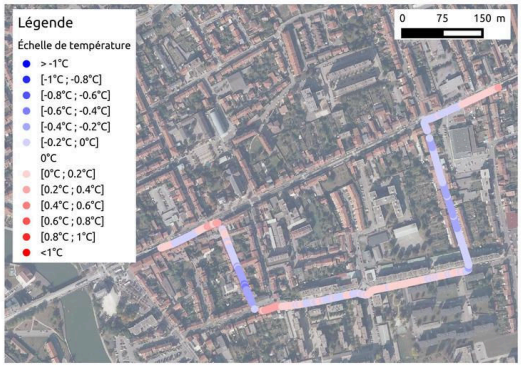
(b)



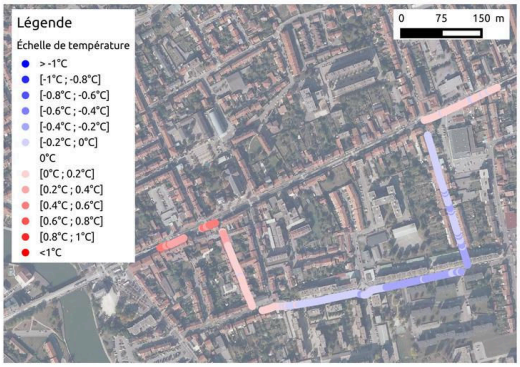
(c)



(d)

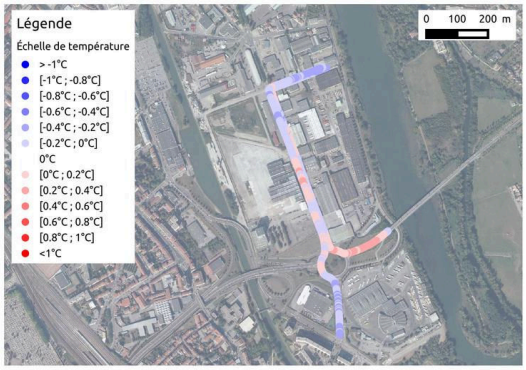


(e)

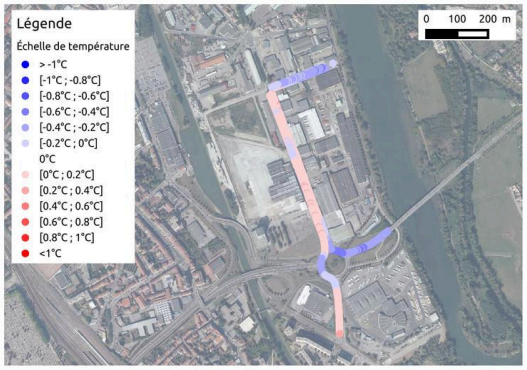


(f)

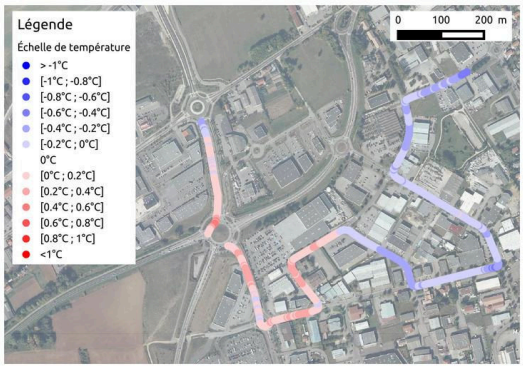
Figure 3.13 : *Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air* $\overline{\delta T_{air,m}}$ *calculés pour les LCZ suivantes : (a) NAT diurne. (b) NAT nocturne. (c) THL diurne. (d) THL nocturne. (e) SMA diurne. (f) SMA nocturne.*



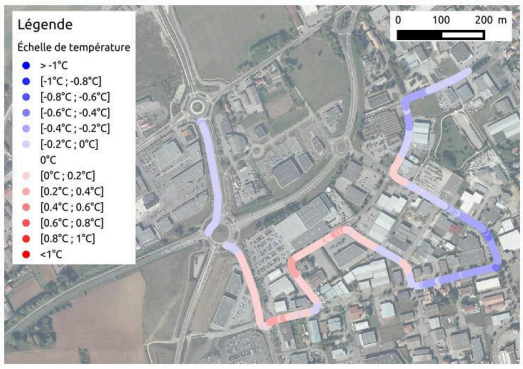
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.14 : *Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air* $\overline{\delta T_{air,m}}$ *calculés pour les LCZ suivantes : (a) MBR diurne. (b) MBR nocturne. (c) PVE diurne. (d) PVE nocturne.*

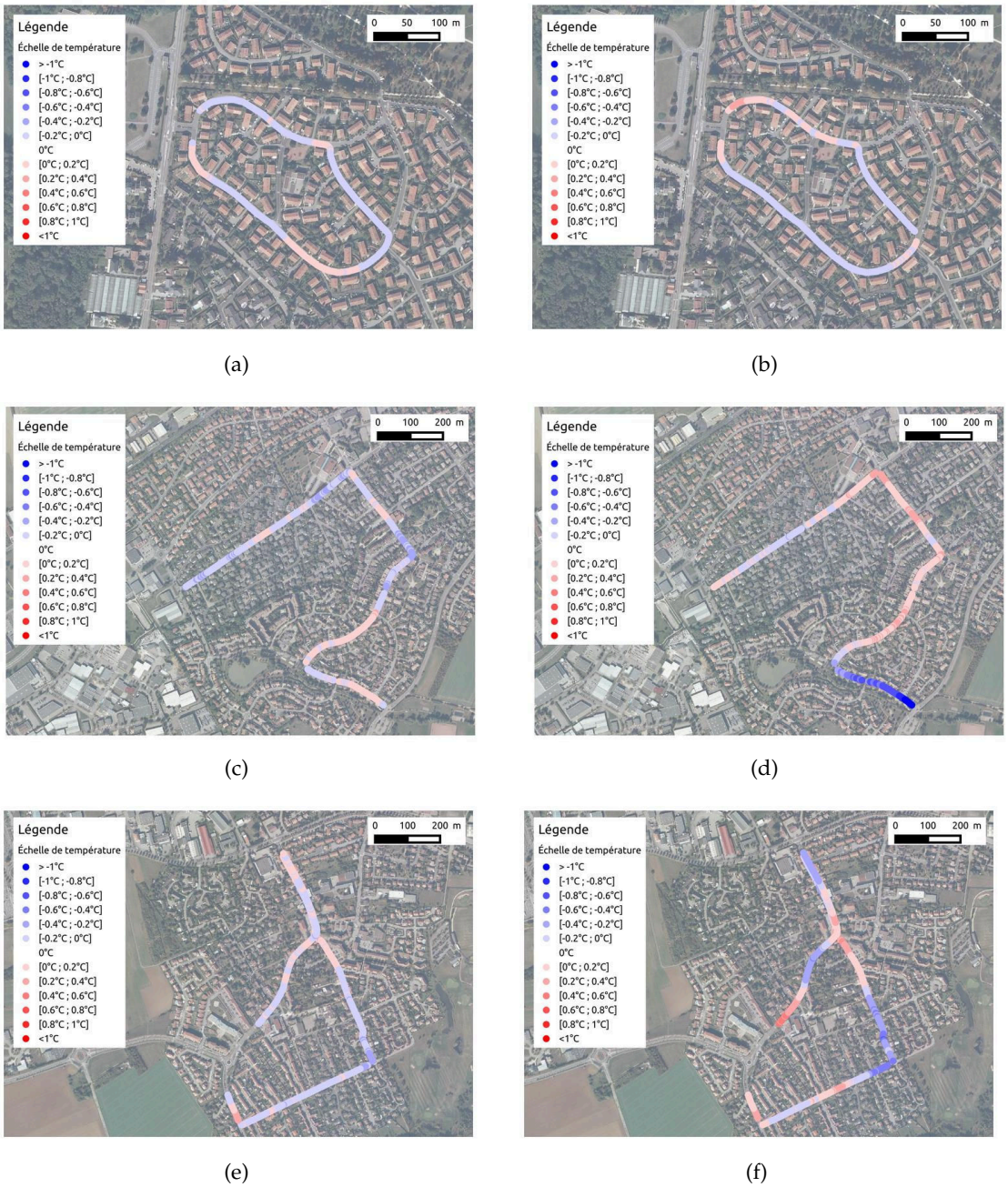
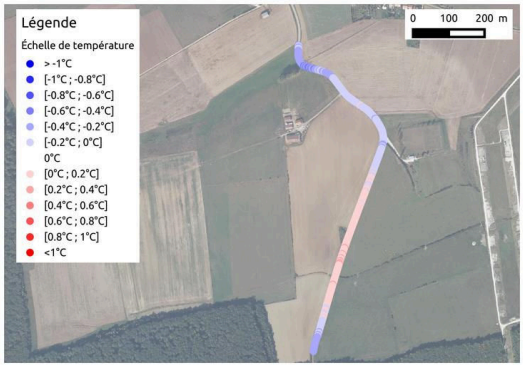
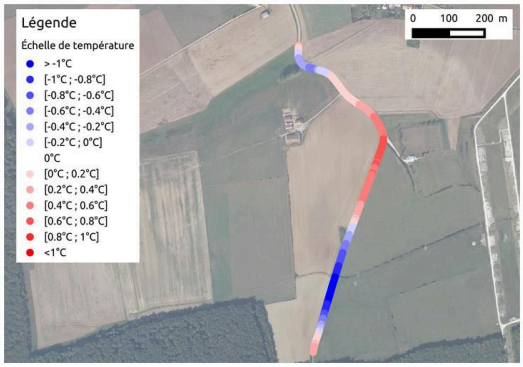


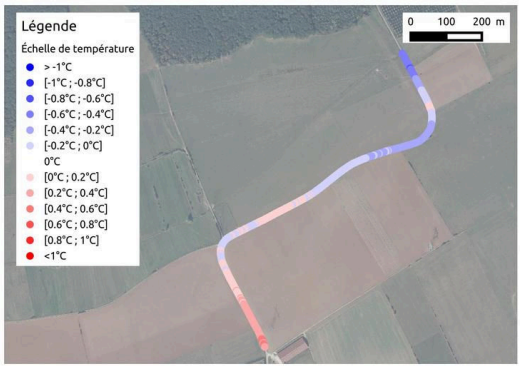
Figure 3.15 : *Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air* $\overline{\delta T_{air,m}}$ *calculés pour les LCZ suivantes : (a) JAR diurne. (b) JAR nocturne. (c) SEI diurne. (d) SEI nocturne. (e) PUL diurne. (f) PUL nocturne.*



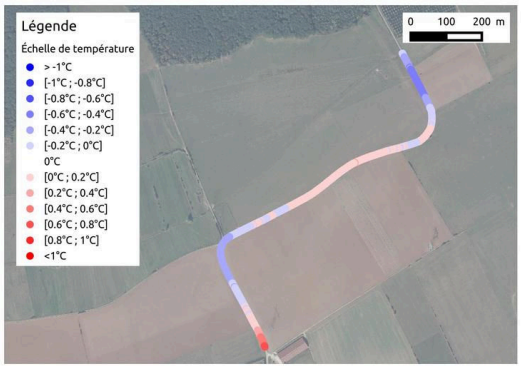
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.16 : *Écarts moyens à la moyenne spatiale de température d'air* $\overline{\delta T_{air,m}}$ *calculés pour les LCZ suivantes : (a) CE1 diurne. (b) CE1 nocturne. (c) CE3 diurne. (d) CE3 nocturne.*

– Une suite minimale de 7 points de mesure consécutifs, correspondant à une section de route d'environ 21 m
– Un écart de température systématique supérieur ou égal à 0,5°C

Les figures présentées sont construites à partir de 10 passages réalisés en 2013 dans chaque LCZ. Cependant, certaines conditions de mesure, comme par exemple la vitesse du véhicule, varient d'un passage à l'autre. Ainsi, le calcul de l'écart moyen à la moyenne spatiale s'effectue parfois sur moins de 10 valeurs. Dans le cadre de ce travail, un seuil minimal de passages pour le calcul de $\overline{\delta T_{air,m}}$ a été établit pour tenter de faciliter l'interprétation des figures. Ainsi, il a été choisi d'écarter les points pour lesquels le calcul de l'écart moyen à la moyenne spatiale s'effectue sur moins de 5 passages.

Les écarts moyens à la moyenne spatiale des treize LCZ étudiées sont présentés dans les figures 3.12 à 3.16. Certaines LCZ se révèlent être plutôt homogènes du point de vue thermique, ce qui se caractérise notamment par l'absence de singularité thermique (points chauds ou froids). Une minorité de LCZ étudiées ici ne possèdent pas de singularités thermiques – au sens où elles ont été définies précédemment. À l'inverse, la présence de singularités thermiques dans certaines LCZ démontre notamment que la distribution spatiale de température d'air est plus hétérogène. Sur les 26 cas étudiés dans les figures précédentes, 16 cas (62%) présentent des singularités thermiques (table 3.5) – 7 en période diurne, 9 en période nocturne.

Différentes configurations de singularités thermiques sont présentes. Certaines LCZ ont des singularités thermiques uniquement en période diurne, d'autres uniquement en période nocturne, et d'autres pendant les deux périodes. Dans certains cas, les singularités thermiques en période nocturne ne se situent pas aux mêmes emplacements que les singularités thermiques en période diurne. Cette observation met en lumière la complexité de la formation de ces points chauds et froids, et confirme que les causes responsables de la formation d'un point chaud (resp. froid) en période diurne peuvent être différentes de celles responsables de la formation d'un point chaud (resp. froid) en période nocturne. Par ailleurs, les singularités thermiques sont présentes à la fois dans les LCZ urbanisées et non urbanisées.

Code de la LCZ	Période diurne		Période nocturne	
	Point chaud	Point froid	Point chaud	Point froid
OUE				1
CEN	1	1		
TRM	1			
NAT		2	1	2
SEI				1
PUL			1	
CE1			1	1
CE3	1	1	1	

Table 3.5 : *Récapitulatif du nombre de singularités thermiques observées dans chacune des LCZ.*

Détail des singularités thermiques

Chacune des LCZ de type Compact midrise présente une singularité thermique. La LCZ OUE présente un point froid en période nocturne, dans une rue se situant à proximité d'un coeur d'îlot fortement végétalisé. Deux singularités thermiques sont observées dans la LCZ CEN en période diurne. Un point chaud est localisé devant le marché central, dans une zone de fort trafic routier totalement exposée au rayonnement solaire direct, tandis que le point froid est situé à l'extrémité nord de la LCZ, dans une rue très étroite orientée nord-sud et présentant de faibles valeurs de SVF et AR. De même, le point froid observé dans la LCZ TRM en période diurne est observée pour des conditions similaires de morphologie urbaine.

Au sein des LCZ de type Open midrise, la LCZ NAT est celle qui dénombre le plus de singularités thermiques. En période diurne, NAT présente deux points froids proches l'un de l'autre. Ils correspondent à une zone où l'ombre portée des bâtiments adjacents est systématiquement localisée au moment des mesures diurnes. En période nocturne, les deux points froids sont probablement liés à la présence de végétation. Le premier point froid est situé à proximité d'un parc urbain tandis que le second est localisé sur une avenue bordée de grands arbres. Cette avenue est une zone relativement fraîche aussi bien en période diurne qu'en période nocturne. Le point chaud nocturne correspond à une zone dégagée très minérale avec peu d'ombres portées en journée. Cette zone est d'ailleurs identifiée comme étant chaude en période diurne.

Les LCZ de type Open lowrise / Sparsely built possèdent également des singularités thermiques. Dans le cas de SEI en période diurne, l'existence d'un point froid en périphérie de la LCZ peut s'expliquer par un phénomène d'advection d'air froid. En effet, SEI est mitoyenne avec une LCZ de type Low plants, laquelle aura tendance à

présenter une température d'air plus basse que SEI en période nocturne. De l'air froid provenant de la LCZ non urbanisée contiguë pourrait être advecté en direction de SEI, et ainsi causer un point froid en bordure de SEI. Un point chaud est également observé à PUL en période nocturne. Dans ce cas, aucune cause unique ne vient expliquer cette singularité thermique.

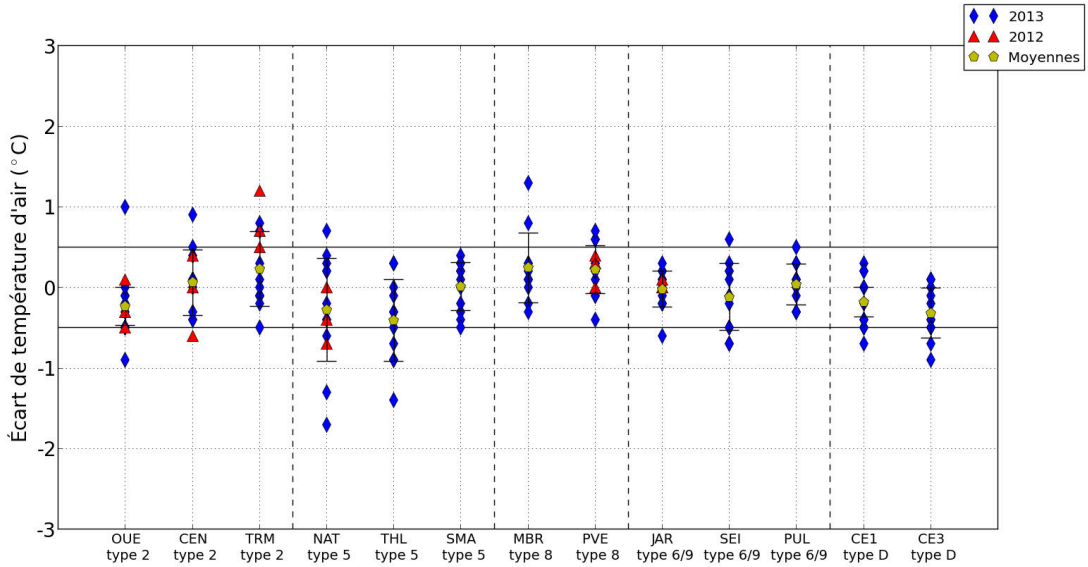
Enfin, l'étude des LCZ de type Low plants révèle la présence de points chauds et de points froids pour les deux LCZ considérées. Le point chaud et le point froid de CE1 en période nocturne peuvent avoir une explication d'ordre topographique. En effet, la partie sud de cette LCZ est légèrement plus basse que la partie nord, ce qui favorise le développement d'une "cool pool" du fait de la stratification thermique nocturne d'une part, et de l'inversion de température d'autre part. Pour CE3, le point chaud est situé au même endroit en période diurne et en période nocturne, à savoir à l'extrémité sud de la LCZ. Cependant, de même que pour PUL, les causes de ces singularités thermiques n'ont par été identifiées. À l'inverse, le point froid en période diurne est localisé à l'extrémité nord de la LCZ. Dans cette zone, CE3 est mitoyenne avec une parcelle boisée de type Dense trees, qui aurait tendance à être plus fraîche que CE3 en période diurne du fait de la présence d'arbres. Un phénomène d'advection d'air froid similaire à SEI pourrait expliquer l'existence d'un point froid à cet endroit. Par ailleurs, la zone nord de CE3 est également fraîche en période nocturne par rapport au reste de la LCZ.

Les causes possibles des singularités thermiques peuvent être de nature différente :

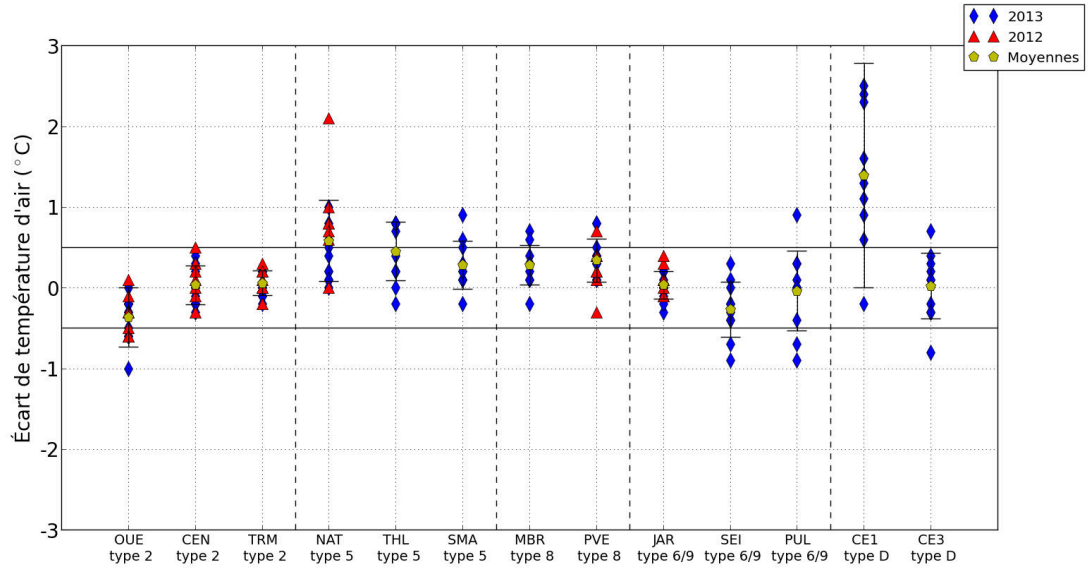
- Morphologie urbaine (SVF, AR)
- Orientation des rues
- Ombres portées des bâtiments
- Présence de végétation ou de surface perméable
- Advection d'air chaud ou froid
- Matériaux urbains utilisés
- Topographie de la LCZ

3.5.3 Sites de contrôle

La figure 3.17 permet de mettre en évidence les différences de température entre les points de contrôle ($T_{air,SC1}$ - $T_{air,SC2}$), notamment lorsque l'un des deux est situé au niveau d'une singularité thermique. En période diurne, le site de contrôle 2 tend à être légèrement plus chaud que le site de contrôle 1 pour les LCZ NAT et THL. Dans le cas

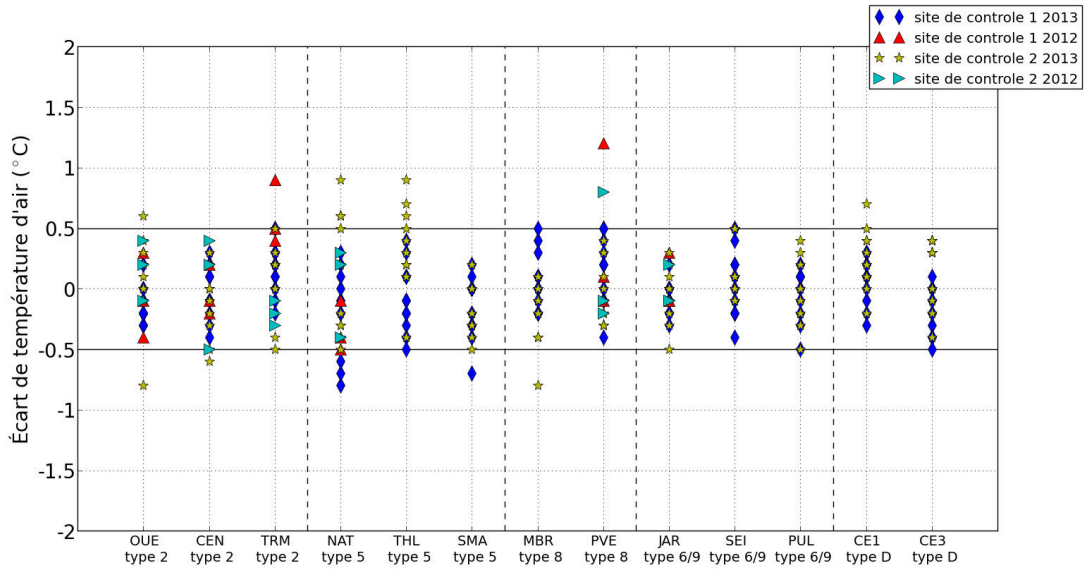


(a)

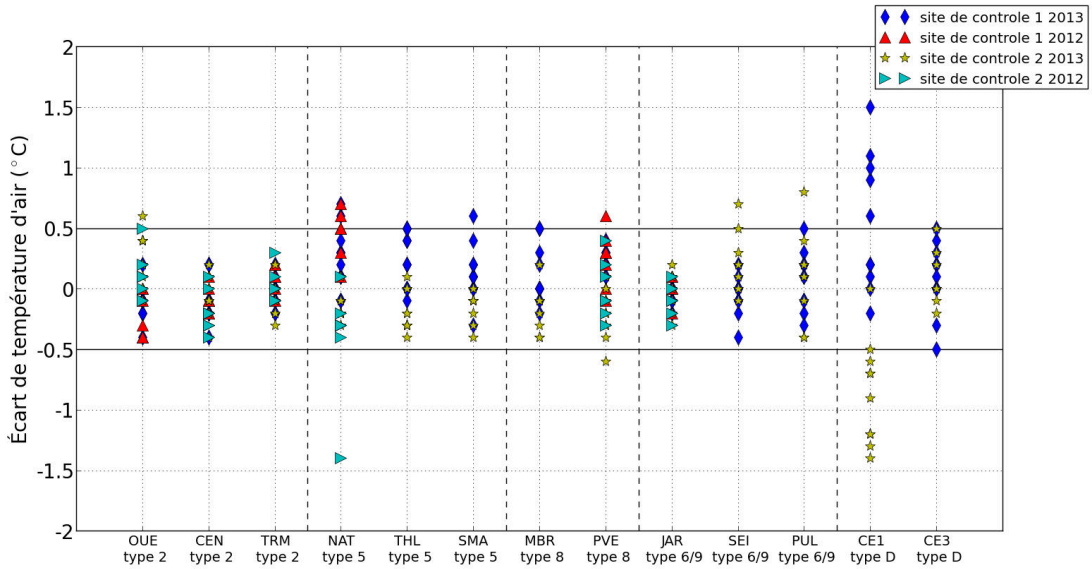


(b)

Figure 3.17 : *Différence entre $T_{air,SC1}$ et $T_{air,SC2}$ ($T_{air,SC1}$ - $T_{air,SC2}$). (a) Période diurne. (b) Période nocturne.*



(a)



(b)

Figure 3.18 : *Différence entre $T_{air,SCn}$ et $\overline{T_{air,p}}$ ($T_{air,SCn}$ - $\overline{T_{air,p}}$). (a) Période diurne. (b) Période nocturne.*

nocturne, le site de contrôle 1 présente une température d'air plus élevée que le site de contrôle 2 pour ces mêmes LCZ NAT et THL. La LCZ CE1 diffère des autres LCZ par le fait que son premier site de contrôle est en moyenne 1,4°C plus chaud que son second site de contrôle. Ce résultat s'explique par le fait que le premier site de contrôle correspond à un point chaud tandis que le second site de contrôle est situé au niveau d'un point froid.

Cette figure souligne le fait qu'en grande majorité, les températures relevées pour les deux sites de contrôle sont proches l'une de l'autre. La différence entre les deux températures est inférieure ou égale à 0,5°C dans 71% (resp. 72%) des cas en période diurne (resp. nocturne), et inférieure ou égale à 1°C dans 96% (resp. 94%) des cas en période diurne (resp. nocturne).

Il est également possible de calculer la différence entre la température d'air à un site de contrôle (notée $T_{air,SCn}$) d'une part, et la température d'air moyenne dans les LCZ (notée $\overline{T_{air,p}}$) d'autre part (figure 3.18). Pour chaque LCZ, les deux sites de contrôle sont présentés indépendamment. De même, les relevés effectués en 2012 ont été dissociés de ceux réalisés en 2013 – bien que les sites de contrôle soient identiques en 2012 et 2013.

De manière générale, les températures d'air relevées au niveau des sites de contrôle sont proches de la température d'air moyenne dans les LCZ. En période diurne, la différence entre ces deux grandeurs est inférieure ou égale à 0,5°C pour 87% des cas, et inférieur ou égale à 1°C pour plus de 99% des cas (sur un total de 320 valeurs). En période nocturne, la différence entre ces deux grandeurs est inférieure ou égale à 0,5°C pour 89% des cas, et inférieur ou égale à 1°C pour 98% des cas (sur un total de 344 valeurs). La figure 3.18(b) met en évidence la disparité spatiale de température d'air pour CE1 en période nocturne. En effet, le site de contrôle 1 se situe au niveau d'un point chaud, tandis que le site de contrôle 2 est localisé au niveau d'un point froid.

En écartant le cas particulier de CE1, la différence entre la température d'air dans les différents sites de contrôle et la température d'air moyenne dans les LCZ en période nocturne est de $\pm$ 0,5°C dans 92% des cas. En général, la distribution de cette grandeur est homogène entre -0,5°C et 0.5°C. Ces résultats démontrent que les températures d'air aux points de contrôles sont raisonnablement proches de la température d'air moyenne dans les LCZ, et par conséquent que ces températures aux points de contrôle représentent de façon convenable la température d'air moyenne dans les LCZ.

	Observations de Stewart
Faibles différences en matière de morphologie urbaine et de matériaux	$< 2°C$
Fortes différences en matière de morphologie urbaine ou de matériaux	2°C à 5°C
Fortes différences en matière de morphologie urbaine et de matériaux	$> 5°C$

Table 3.6 : *Écarts moyens nocturnes enregistrés entre différentes LCZ [Stewart, 2011].*

3.6 Discussion

Dans ce chapitre, les questions de robustesse du concept de LCZ et de validation de la classification LCZ à Nancy se sont appuyées sur des critères objectifs d'homogénéité thermique. Il y a validation du système LCZ si les LCZ construites à Nancy sur la base des indicateurs urbains présentent un comportement thermique spatialement homogène. Cette étape de validation ne traite pas du caractère spécifique de ce comportement thermique. La comparaison entre les LCZ est abordée dans le chapitre suivant.

L'amplitude de température d'air permet d'évaluer l'homogénéité générale de la LCZ, en comparant sa partie la plus chaude et sa partie la plus froide. Si l'amplitude de température d'air est faible dans la LCZ, alors le comportement thermique est considéré comme spatialement homogène dans l'ensemble de la LCZ. Une réflexion doit être engagée sur la valeur seuil en dessous de laquelle une LCZ peut être considérée comme thermiquement homogène. Cette thèse propose qu'une LCZ soit considérée comme homogène si l'amplitude de température de celle-ci est inférieure ou égale à l'écart de température entre cette LCZ et une autre LCZ de même type. Afin de choisir une valeur seuil pour ce critère d'homogénéité, il est possible de faire appel à la généralisation des observations in situ proposées par Stewart (table 3.6). Dans le cas nocturne, Stewart indique que deux LCZ possédant de faibles différences en matière de morphologie et de matériaux (et par extension deux LCZ de même type) démontrent une différence de température d'air moyenne inférieure ou égale à 2°C. En s'inspirant de cette valeur indicative fournie par Stewart, une LCZ est considérée comme spatialement homogène – dans le cadre de cette étude – si l'amplitude de température nocturne mesurée est inférieure ou égale à 2°C. Il s'avère que 91% des amplitudes de température relevées en période nocturne sont inférieures ou égales à

2°C. Hormis CE1, l'amplitude de température moyenne des LCZ est inférieure ou égale à 2°C, ce qui permet de les considérer comme étant homogène thermiquement. En utilisant ce critère d'homogénéité, les LCZ construites à Nancy sont donc validées en période nocturne.

Les valeurs indicatives fournies par Stewart dans la table 3.6 concernent uniquement la période nocturne. Ainsi, le critère d'homogénéité construit ici ne peut être utilisé en période diurne. Il s'avère que l'amplitude de température est plus élevée en période diurne qu'en période nocturne, et que par conséquent les LCZ semblent moins homogènes en période diurne qu'en période nocturne. Comme souligné précédemment, les diverses orientations des rues, les ombres portées des bâtiments et de la végétation ainsi que la production de chaleur causée par le trafic routier peuvent expliquer cette hausse de l'amplitude constatée pendant certaines sessions de mesure. L'augmentation des valeurs d'amplitude en période diurne est particulièrement observée dans les LCZ de type Compact midrise et Open lowrise, qui possèdent des caractéristiques morphologiques particulières : SVF inférieur à 0,7, rapport d'aspect supérieur à 0,35, hauteur moyenne des bâtiments supérieure à 10 m, la classe de rugosité 7. Dans ces LCZ, la densité élevée de bâti de moyenne hauteur peut accentuer les effets dus à l'orientation des rues et aux ombres portées. Néanmoins, l'augmentation de l'amplitude de température pour ces types de LCZ reste modérée, de l'ordre de 0,5°C.

Si l'amplitude de température fournit une information globale concernant l'homogénéité thermique dans les LCZ, elle ne permet pas d'identifier les causes d'une amplitude systématiquement élevée, comme c'est le cas pour SEI et CE1 en période nocturne. L'analyse portant sur 10 passages indique que dans le cas de ces deux dernières LCZ, les amplitudes de température élevées observées en période nocturne sont dues à de fortes singularités thermiques. Dans le cas de CE1, la cause est très probablement la topographie de la LCZ, tandis que pour SEI, il s'agirait d'un phénomène d'advection du à la proximité d'une LCZ de type Low plants. Sur toutes les singularités thermiques observées, seules celles de SEI et CE1 présentent un écart à la moyenne spatiale supérieur à 1°C en valeur absolue. Ainsi, l'étude des singularités thermiques systématiques a permis de mettre en évidence que les comportements anormaux en termes d'amplitude de température sont liés à des phénomènes thermiques isolés, propres à ces deux LCZ. Cette étape permet de fournir des arguments pour relativiser l'importance des résultats d'amplitude de température

obtenus dans SEI et CE1, et donc pour conforter les deux tendances majoritaires, à savoir :

- L'amplitude de température est plus faible en période nocturne qu'en période diurne
- Les LCZ présentent en très grande majorité une amplitude de température inférieure à 2°C en période nocturne

Il est toutefois nécessaire de rappeler que les valeurs d'amplitude calculées dépendent du trajet effectué à l'intérieur des LCZ. Toutes les rues des LCZ n'ont pas été parcourues, les amplitudes de température présentées sont donc relatives à l'itinéraire de mesure. En outre, les points chauds et froids sont à relativiser, car ils sont calculés sur la base de la température d'air moyenne de la LCZ. Si les singularités sont situées à la périphérie de la LCZ (comme c'est le cas pour SEI en période nocturne), il est très probable que celles-ci soit l'expression de l'influence thermique d'une LCZ sur une autre. Les zones tampons des LCZ ont été choisies de faible dimension, afin de prendre en compte un nombre important de points de mesure. La taille de ces zones tampons influe sur l'écart moyen à la moyenne spatiale calculé en chaque point, car la prise en compte des points proches de la frontière de la LCZ fait varier la valeur de la température d'air moyenne de la LCZ, ce qui influe sur l'identification des points chauds et froids dans l'ensemble de la LCZ.

Au sujet des sites de contrôle, les résultats indiquent que deux sites de contrôle sur 26 – dans la LCZ CE1 – ont été choisis au niveau d'une singularité thermique. Malgré le fait que cela ne représente que 8% de la totalité des sites de contrôle sélectionnés, cela indique tout de même que dans certains cas particuliers, la représentativité du point de vue des caractéristiques urbaines n'entraîne pas systématiquement un comportement thermique représentatif de la LCZ. Ce constat incite à remettre en question la méthode de choix des sites de contrôle. Une amélioration à envisager consiste à intégrer aux conditions de construction des sites de contrôle les causes probables des singularités thermiques identifiées dans le cadre de cette étude. À titre d'exemple, le cas de la LCZ CE1 invite à considérer en détail la topographie des LCZ non urbanisée lors de la construction des points de contrôle.

Enfin, l'analyse de l'homogénéité thermique des LCZ postule que l'amplitude de température mesurée à l'aide du véhicule correspond à l'amplitude de température de la LCZ. Il s'agit d'une hypothèse, car les données issues des mesures mobiles sont ne

sont représentatives que des zones parcourues. Telle qu'elle est mise en pratique dans cette étude, la mesure mobile n'enregistre des données que sur la voie publique. Les zones privées ou inaccessibles en voiture (coeurs d'îlots, cours intérieures, jardins) ne sont pas étudiées. Elles ne sont pas intégrées au calcul de l'amplitude de température des LCZ, et donc elles ne sont pas prises en compte lorsqu'il est question d'étudier l'homogénéité des LCZ par au rapport au critère proposé précédemment.

3.7 Conclusion

À la suite de l'application de la classification LCZ dans l'agglomération de Nancy décrite au chapitre précédent, ce chapitre présente un ensemble de résultats visant à discuter de la validation du système LCZ dans le cas étudié. Cette validation consiste à vérifier que les LCZ construites à l'aide des indicateurs urbains, considérées comme étant homogène du point de vue des caractéristiques urbaines, possèdent un comportement thermique spatialement homogène. Si tel est le cas, il est possible de considérer chaque LCZ comme une entité climatique unique, ce qui permet par la suite de réaliser des comparaisons entre les LCZ.

Une série de tests préliminaires a été tout d'abord réalisée afin d'analyser l'influence de la stabilité atmosphérique et de la vitesse du véhicule sur les mesures de température d'air. Les résultats indiquent que la vitesse du véhicule n'influe pas sur la mesure de température, et que des différences de température d'air sont observées en période nocturne. Ces gradients de température, qui ne sont pas observés en période diurne, sont probablement causés par la configuration spécifique du site de mesure.

Le protocole expérimental a été ensuite présenté, détaillant les deux itinéraires parcourus ainsi que les conditions expérimentales choisies, propices à l'observation d'un îlot de chaleur urbain développé. Plusieurs précisions concernant le post-traitement des mesures sont apportées, à savoir la création de zones tampons à la frontière des LCZ, la suppression des points de mesure correspondant à une vitesse du véhicule inférieure à 15 km.h^{-1} et l'application d'une correction temporelle de la température d'air.

L'analyse de l'homogénéité spatiale des treize LCZ complètement construites s'est articulée autour de trois calculs. En premier lieu, malgré le fait que l'amplitude de température d'air connaît une variabilité journalière significative, il s'avère que

l'analyse de celle-ci fournit une vision globale de l'homogénéité thermique des LCZ sélectionnées. L'étude de cette amplitude indique que l'homogénéité thermique des LCZ diffère selon la période considérée. En période diurne, les LCZ de type Compact midrise, Open midrise, Large lowrise ont tendance à être moins homogènes que les LCZ Open lowrise / Sparsely built et Low plants. Le constat est tout autre en période nocturne, où les LCZ urbanisées tendent à être plus homogènes que les LCZ non urbanisées, ce qui indique que la distribution spatiale de température d'air y est plus homogène durant cette période.

Dans un second temps, les singularités thermiques récurrentes à l'échelle microclimatique ont été analysées LCZ par LCZ. Une minorité de LCZ ne présente pas de singularité thermique, au sens où celles-ci ont été définies dans cette étude. Des points chauds et froids systématiques ont été observés dans 16 des 26 cas étudiés, aussi bien en période nocturne qu'en période diurne. En analysant ces singularités thermiques une à une, il s'avère que leurs causes sont variables, et peuvent notamment concerner la morphologie urbaine, l'occupation du sol ou encore les matériaux urbains présents.

Concernant les données recueillies au niveau des sites de contrôle, la différence de température d'air entre les deux sites d'une même LCZ est faible, à savoir inférieure à 0,5°C dans plus de 70% des cas. L'augmentation de cette différence de température pour certaines LCZ est souvent due à la présence d'une singularité thermique au niveau du site de contrôle. Par ailleurs, la température d'air des sites de contrôle est en général proche de la température moyenne de la LCZ. Ainsi dans leur ensemble, les sites de contrôle sont représentatifs de la LCZ aussi bien en matière d'indicateurs urbains que du point de vue de la température d'air. Cela confirme que si un site est choisi de façon à être représentatif de la LCZ en termes d'indicateurs urbains, il sera très probablement représentatif en termes de température d'air. Ce résultat est d'une grande importance dans la perspective du déploiement de stations fixes destinées à enregistrer le comportement climatique des LCZ de façon continue.

Ce chapitre a donc permis de mettre en évidence la correspondance entre caractéristiques urbaines et comportement thermique dans les treize LCZ sélectionnées pour l'étude à Nancy. Les résultats présentés ont également fournit des informations utiles au sujet de la distribution de température dans les LCZ à l'échelle microclimatique. À partir de ce constat, les LCZ sont considérées comme des zones climatiques dont

l'homogénéité thermique est acceptable. La classification LCZ peut donc être associée avec les mesures mobiles afin de réaliser un diagnostic de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Nancy.

4

Quantification et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Nancy

4.1 Introduction

Les deux précédents chapitres ont indiqué d'une part la méthode de construction des LCZ a pu être appliquée dans l'agglomération de Nancy, et d'autre part que le concept d'homogénéité thermique, validé sur le terrain, rend possible leur comparaison thermique. Ce chapitre examine l'apport de la classification LCZ pour la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain à Nancy.

Dans un premier temps, l'îlot de chaleur urbain est évalué via la comparaison des comportements thermiques locaux à partir des mesures effectuées pour l'échantillon des treize LCZ, en période diurne et nocturne. Par ailleurs, l'impact du type de LCZ sur leur comportement thermique est analysé. Dans un second temps, la dynamique de température d'air dans les LCZ est étudiée via une campagne de mesures mobiles complémentaire au pas horaire. Enfin, l'influence des facteurs de contrôle – position géographique, conditions de vent et de nébulosité – sur le comportement thermique des LCZ est également discutée.

4.2 Variabilités thermiques inter-LCZ

4.2.1 Dynamique thermique journalière

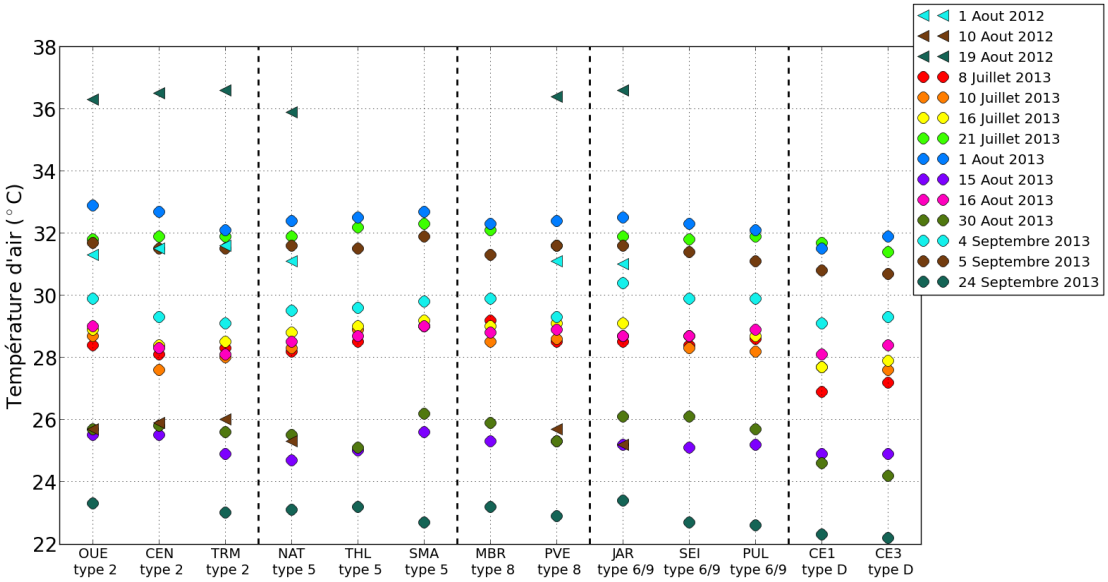
Les caractéristiques thermiques des LCZ sont d'abord analysées vis-à-vis des valeurs de température d'air moyenne $\overline{T_{air}}$ calculées à partir des mesures mobiles (figure 4.1). Les relevés analysés ont été effectués exclusivement en période de vent et de nébulosité faible (Annexe C). En période diurne, pour des températures d'air mésoclimatiques allant de 22°C à 37°C, la température d'air moyenne est relativement similaire d'une LCZ à l'autre. L'écart maximal enregistré en période diurne est de 2,3°C entre TRM et CE1 (8 juillet 2013). À partir des données regroupées à la figure 4.1(a), les différences moyennes de température d'air entre chaque LCZ sont calculées (table 4.1). Les moyennes des différences de température entre les LCZ urbanisées sont inférieures ou égales à 0,6°C (0,2°C en moyenne). Les différences de température entre LCZ urbanisées et non urbanisées sont plus marquées (0,5°C à 1,1°C.)

Par ailleurs, les différences de température entre les LCZ de même type sont faibles, à savoir inférieures ou égales à 0,3°C (en moyenne 0,1°C). Ainsi, les LCZ de même type présentent généralement une température d'air proche en période diurne.

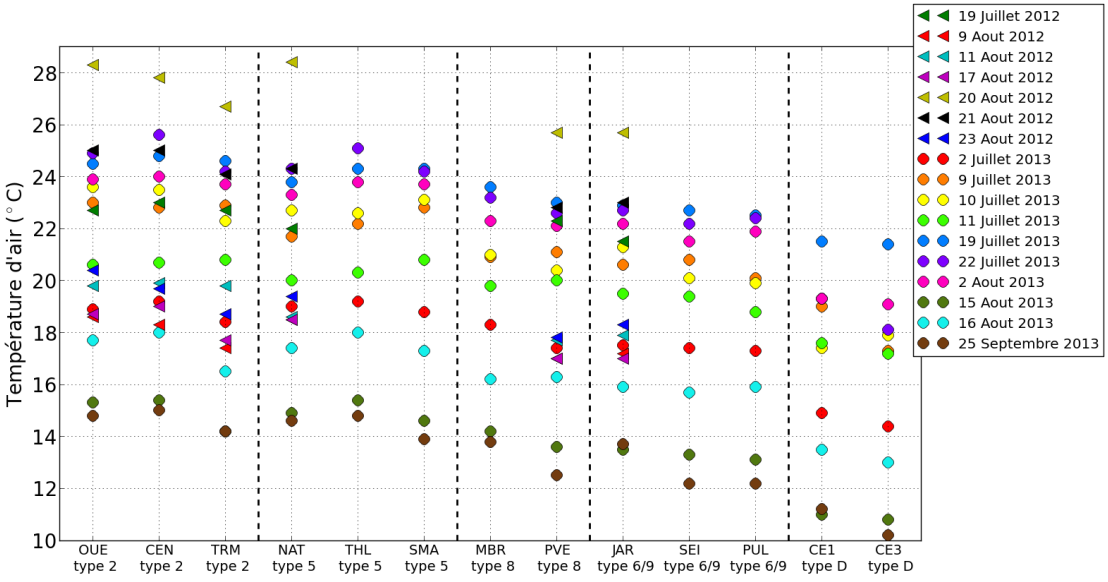
Il est possible de regrouper les LCZ par type identique afin de les comparer entre eux. La table 4.2 présente les moyennes des différences de température d'air par type de LCZ. Les mesures indiquent que les différences de température d'air sont inférieures ou égales à 0,3°C pour les LCZ urbanisées. Cette valeur est proche de celle observée lorsque les LCZ sont considérées de façon indépendante. En outre, l'écart moyen de température entre LCZ urbanisées et non urbanisées est compris entre 0.6°C et 1.0°C.

Ces résultats confirment l'hypothèse présentée au chapitre 1. En journée, en configuration de faible nébulosité, plusieurs types de phénomènes affectent les LCZ urbanisées. Le piégeage radiatif est plus important dans les LCZ urbaines. Par ailleurs, les échanges convectifs sont limités à cause de la présence de bâti (fraction de surface bâtie comprise entre 18% et 49%), le flux de chaleur latente est très réduit du fait de la faible fraction de surface perméable (entre 10% et 60%), et les caractéristiques thermiques des matériaux urbains utilisés tendent à favoriser le stockage de la chaleur.

Les LCZ urbanisées présentent des températures d'air très proches les unes des autres, ce qui peut indiquer qu'elles connaissent toutes ces phénomènes dans des proportions similaires. Les types de LCZ Compact midrise et Large lowrise sont



(a)



(b)

Figure 4.1 : *Températures d'air $\overline{T_{air}}$ relevées dans les treize LCZ étudiées. Ces relevés sont triés par type de LCZ et présentés par jour de mesure. (a) Période diurne, 3 relevés en 2012, 11 relevés en 2013. (b) Période nocturne, 7 relevés en 2012, 10 relevés en 2013.*

LCZ	OUE	CEN	TRM	NAT	THL	SMA	MBR	PVE	JAR	SEI	PUL	CE1	CE3
OUE	-	-0,1 (0,3)	0,7 (0,5)	0,6 (0,4)	0,1 (0,4)	0,4 (0,3)	1,4 (0,6)	1,8 (0,7)	1,7 (0,4)	2,2 (0,6)	2,3 (0,6)	4,3 (1,0)	4,8 (1,0)
CEN	-0,3 (0,2)	-	0,7 (0,5)	0,6 (0,4)	0,3 (0,3)	0,5 (0,4)	1,6 (0,6)	1,9 (0,6)	1,8 (0,5)	2,4 (0,6)	2,5 (0,5)	4,4 (1,0)	5,0 (1,1)
TRM	-0,2 (0,3)	0,1 (0,2)	-	-0,2 (0,8)	-0,4 (0,7)	-0,2 (0,4)	0,8 (0,6)	1,2 (0,6)	1,1 (0,5)	1,6 (0,5)	1,8 (0,6)	3,7 (0,7)	4,2 (0,9)
NAT	0,2 (0,3)	0,6 (0,3)	0,4 (0,3)	-	-0,4 (0,2)	-0,2 (0,5)	0,8 (0,4)	1,3 (0,7)	1,2 (0,5)	1,6 (0,6)	1,8 (0,5)	3,7 (1,0)	4,2 (1,0)
THL	0,1 (0,3)	0,4 (0,4)	0,3 (0,3)	-0,1 (0,2)	-	0,2 (0,6)	1,2 (0,4)	1,7 (0,6)	1,6 (0,4)	2,0 (0,6)	2,2 (0,4)	4,1 (1,0)	4,6 (1,1)
SMA	0,0 (0,3)	0,4 (0,3)	0,2 (0,3)	-0,2 (0,4)	-0,1 (0,3)	-	1,0 (0,6)	1,5 (0,5)	1,4 (0,5)	1,8 (0,5)	1,9 (0,5)	3,9 (0,9)	4,4 (0,9)
MBR	-0,2 (0,3)	0,1 (0,3)	0,0 (0,4)	-0,4 (0,3)	-0,3 (0,2)	-0,2 (0,2)	-	0,4 (0,5)	0,4 (0,3)	0,8 (0,4)	0,9 (0,4)	2,9 (0,6)	3,4 (0,7)
PVE	-0,2 (0,3)	0,1 (0,3)	0,0 (0,3)	-0,5 (0,3)	-0,3 (0,3)	-0,2 (0,4)	0,0 (0,3)	-	-0,1 (0,5)	0,4 (0,2)	0,5 (0,3)	2,4 (0,6)	3,0 (0,8)
JAR	0,1 (0,5)	0,5 (0,4)	0,3 (0,5)	-0,1 (0,3)	0,0 (0,4)	0,1 (0,5)	0,3 (0,3)	0,3 (0,4)	-	0,5 (0,5)	0,6 (0,5)	2,5 (0,7)	3,0 (0,8)
SEI	0,0 (0,4)	0,4 (0,2)	0,2 (0,3)	-0,2 (0,3)	-0,1 (0,3)	0,0 (0,4)	0,2 (0,3)	0,2 (0,2)	-0,1 (0,4)	-	0,1 (0,3)	2,1 (0,6)	2,6 (0,8)
PUL	0,1 (0,4)	0,4 (0,3)	0,2 (0,2)	-0,2 (0,4)	0,0 (0,4)	0,1 (0,3)	0,3 (0,3)	0,3 (0,3)	-0,1 (0,4)	0,0 (0,2)	-	1,9 (0,7)	2,5 (0,8)
CE1	0,8 (0,4)	1,1 (0,5)	0,9 (0,5)	0,5 (0,4)	0,7 (0,4)	0,7 (0,5)	1,0 (0,4)	1,0 (0,4)	0,6 (0,4)	0,7 (0,4)	0,7 (0,4)	-	0,5 (0,6)
CE3	0,7 (0,4)	1,1 (0,5)	0,9 (0,5)	0,5 (0,5)	0,6 (0,4)	0,7 (0,4)	0,9 (0,3)	0,9 (0,5)	0,6 (0,5)	0,7 (0,5)	0,7 (0,4)	0,0 (0,2)	-

Table 4.1 : *Moyennes des différences de température d'air entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$. En bas à gauche, les différences de température en période diurne entre la LCZ en colonne moins la LCZ en ligne. En haut à droite, les différences de température en période nocturne entre la LCZ en ligne moins la LCZ en colonne. L'écart type est précisé entre parenthèses.*

potentiellement sensiblement plus chaudes que les autres LCZ urbanisées. Ces LCZ ont comme point commun de posséder une fraction de surface perméable inférieure ou égale à 25%, ce qui peut notamment induire un flux de chaleur latente réduit par rapport aux autres LCZ urbanisées.

Par ailleurs, les LCZ non urbanisées de type Low plants sont sensiblement plus fraîches que les LCZ urbanisées. Dans ces zones, le piégeage radiatif est négligeable, et seuls quelques éléments de rugosité éparses sont présents, favorisant les échanges convectifs entre le sol et l'air. En outre, le flux de chaleur latente est supposé être significativement plus élevé, du fait que plus de 99% de la surface de la LCZ est perméable. De plus en été, une grande partie de cette surface perméable est végétalisée. Les végétaux présents ont tendance à faire augmenter le flux de chaleur latente via le phénomène d'évapotranspiration. Ces différences fondamentales entre LCZ urbanisées et non urbanisées peuvent à elles seules expliquer la différence de température observée, qui est en moyenne de 0,8°C.

La situation est clairement différente en période nocturne. L'écart de température d'air peut atteindre plusieurs degrés entre certaines LCZ (figure 4.1(b)). Cette figure

Type de LCZ	Compact midrise	Open midrise	Open lowrise / Sparsely built	Large lowrise	Low Plants
Compact midrise	-	0.2 (0.5)	1.8 (0.6)	1.5 (0.6)	4.4 (1.0)
Open midrise	0.3 (0.3)	-	1.5 (0.6)	1.3 (0.7)	4.2 (1.0)
Open lowrise / Sparsely built	0.3 (0.4)	-0.1 (0.4)	-	-0.3 (0.4)	2.4 (0.7)
Large lowrise	0.0 (0.3)	-0.3 (0.3)	-0.3 (0.3)	-	2.9 (0.7)
Low plants	0.9 (0.5)	0.6 (0.4)	0.7 (0.4)	1.0 (0.4)	-

Table 4.2 : *Moyennes des différences de température d'air entre type de LCZ* $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$. *En bas à gauche, les différences de température en période diurne entre le type de LCZ en colonne moins le type de LCZ en ligne. En haut à droite, les différences de température en période nocturne entre le type de LCZ en ligne moins le type de LCZ en colonne. L'écart type est précisé entre parenthèses.*

indique également que pour chaque session de mesure, un scénario identique se reproduit, à savoir que certaines LCZ sont systématiquement plus chaudes que d'autres. Ce constat s'effectue pour les différentes températures d'air mésoclimatiques étudiées – de 28°C à 12°C. L'écart maximal enregistré en période nocturne est de 7,5°C entre les LCZ CEN et CE3 (22 juillet 2013).

La table 4.1 présente également les moyennes des différences de température d'air entre chaque LCZ en période nocturne. Entre deux LCZ urbanisées, la différence de température moyenne est au maximum de 2,5°C, tandis qu'entre une LCZ urbanisée et une LCZ non urbanisée, cette différence moyenne peut atteindre 5,0°C. Les différences entre LCZ de même type sont inférieures ou égales à 0,7°C, et sont en moyenne de 0,4°C. Le cas suggère qu'en général, les LCZ de même type présentent une température proche en période nocturne.

En considérant les comportements thermiques des LCZ en période nocturne, il est possible de regrouper les LCZ selon trois groupes (table 4.2) :

- Un premier groupe constitué des LCZ de type Compact midrise et Open midrise, nommé par la suite "groupe Midrise"
- Un second groupe composé des LCZ de type Open lowrise / Sparsely built et Large lowrise, nommé par la suite "groupe Lowrise"
- Un troisième groupe correspondant aux LCZ de type Low plants, nommé par la suite "groupe Plants"

Au sein de chaque groupe, les températures d'air relevées dans les LCZ sont proches. Pour groupe Midrise, la moyenne des différences de température entre LCZ est de 0,4°C. Cette même moyenne est de 0,5°C pour le groupe Lowrise, tandis qu'elle est de 0,5°C pour le groupe Plants. Cependant, chacun de ces trois groupes diffère

	Groupe Midrise	Groupe Lowrise	Groupe Plants
SVF	< 0,7	[0,7 ;0,9]	> 0,9
AR	> 0,3	[0,1 ;0,2]	< 0,1
Hauteur moyenne des bâtiments	> 10 m	< 10 m	< 1 m
Classe de rugosité	7	5 à 6	3

Table 4.3 : *Indicateurs urbains relatifs à la morphologie urbaine pour les groupes Midrise, Lowrise et Plants.*

significativement des deux autres. En moyenne, les LCZ du groupe Midrise sont plus chaudes que les LCZ du groupe Lowrise de 1,5°C. En outre, ces dernières présentent des températures d'air plus élevées que les LCZ du groupe Plants, d'environ 2,7°C en moyenne.

Une première façon de décrire l'îlot de chaleur urbain est de donner une différence de température moyenne entre les différents types de LCZ. Les résultats présentés pour la période nocturne tendent à démontrer que le type de LCZ influe sur la température d'air observée à l'intérieur d'une LCZ. Certains types de LCZ sont significativement plus chauds que d'autres, de façon récurrente.

Le groupe Midrise comprend les types de LCZ les plus chauds. Du point de vue des caractéristiques urbaines, ces types diffèrent des autres types de LCZ de par leur caractéristiques morphologiques (table 4.3). En effet, ils possèdent un SVF inférieur à 0,7, un rapport d'aspect supérieur à 0,3, une hauteur moyenne des bâtiments supérieure à 10 m, et une classe de rugosité de 7. Ces valeurs correspondent à une zone densément bâtie comportant des constructions de moyenne hauteur.

Ainsi, la morphologie urbaine semble jouer un rôle important dans les différences de comportement thermique observées entre les LCZ. Dans ces LCZ, les faibles valeurs de SVF et les valeurs élevées de rapport d'aspect peuvent limiter l'évacuation de chaleur par le flux radiatif GLO ascendant. De même, le refroidissement des surfaces urbaines par convection est réduit car l'écoulement de l'air est perturbé par les éléments de rugosité. Ainsi, la chaleur accumulée dans la journée par les matériaux urbains est restituée progressivement au cours de la nuit.

Les LCZ Compact midrise possèdent en moyenne une fraction de surface bâtie plus élevée (+17%) et une fraction de surface perméable plus faible (−18%) que les LCZ Open midrise. Cependant, il semble que cette différence significative en matière d'occupation du sol n'influence que très peu le comportement thermique en période

nocturne, car les LCZ Compact midrise et Open midrise présentent des températures d'air proches (différence moyenne de 0,2°C entre les deux types).

Le groupe Lowrise est un groupe intermédiaire entre le groupe Midrise et le groupe Plants. Il diffère du groupe Midrise principalement du point de vue de la morphologie urbaine : SVF supérieur à 0,7, rapport d'aspect inférieur à 0,2, hauteur moyenne des bâtiments inférieure ou égale à 10 m et classe de rugosité comprise entre 5 et 6. À la différence du groupe Midrise, ces LCZ ne présentent pas de configuration urbaine de type rue canyon, notamment du fait de leur faible hauteur et densité de bâti (inférieure à 30%). Ces différences morphologiques influent sur le flux radiatif GLO ascendant, qui est très probablement plus développé pour ce groupe que pour le groupe Midrise. En outre, la taille plus modeste des éléments de rugosité tend à favoriser les échanges convectifs.

Il existe des différences remarquables en matière d'occupation du sol entre les LCZ de type Open lowrise / Sparsely built et Large lowrise. En effet, si les pourcentages de surface bâtie sont proches entre ces deux types de LCZ (20% en moyenne pour Open lowrise / Sparsely built, 26% pour Large lowrise), le rapport de la surface imperméable sur la surface perméable est supérieur à 2 pour les LCZ Large lowrise et d'environ 0,4 pour les LCZ Open lowrise / Sparsely built. Or ces LCZ possèdent un comportement thermique similaire en période nocturne, au point d'être rassemblés dans un même groupe. Ce résultat indique que la variation du rapport de la surface imperméable sur la surface perméable ne semble pas influencer significativement le comportement thermique des LCZ.

Enfin, le groupe Plants est constitué des deux LCZ de type Low plants. Ces LCZ ne sont pas urbanisées, elles sont donc radicalement différentes des autres LCZ étudiées, aussi bien du point de vue de la morphologie urbaine que de l'occupation du sol. Le flux radiatif ascendant est très développé du fait des valeurs de SVF proches de 1. La quasi absence d'éléments de rugosité rend cette zone propice aux échanges convectifs. Par ailleurs, les matériaux ruraux présentent des caractéristiques thermiques – notamment une faible effusivité thermique – qui leur permet de restituer aisément la chaleur accumulée. Comparativement aux autres types de LCZ, le refroidissement nocturne est très favorisé dans ce type de LCZ, ce qui implique une baisse de température importante durant cette période.

	Vancouver	Uppsala	Glasgow	Berlin	Nancy
$\Delta T_{air,LCZ\ 1-D}$	5,6°C				
$\Delta T_{air,LCZ\ 2-D}$		2,8°C			4,4°C
$\Delta T_{air,LCZ\ 4-D}$	3,6°C				
$\Delta T_{air,LCZ\ 5-D}$		2,0°C			4,2°C
$\Delta T_{air,LCZ\ 5-B}$				5°C	
$\Delta T_{air,LCZ\ 6-D}$	3,2°C				
$\Delta T_{air,LCZ\ 6-8/D}$			3,0°C		
$\Delta T_{air,LCZ\ 6/9-D}$					2,4°C
$\Delta T_{air,LCZ\ 8-D}$					2,9°C
$\Delta T_{air,LCZ\ 9-D}$		1,8°C			
$\Delta T_{air,LCZ\ A-D}$	1,6°C				
$\Delta T_{air,LCZ\ B-D}$	1,6°C				

Table 4.4 : *Différences de température d'air en période nocturne entre types de LCZ (Annexe A) pour plusieurs villes : Vancouver (moyenne sur 6 nuits), Uppsala (moyenne sur 17 nuits), Glasgow (1 nuit), Berlin (moyenne sur 293 nuits), Nancy (moyenne sur 10 ou 17 nuits selon les LCZ).*

Les résultats expérimentaux indiquent que les moyennes des différences de température entre LCZ sont beaucoup plus élevées en période nocturne qu'en période diurne. En période diurne, les températures des LCZ urbanisées sont proches les unes des autres. Seul un écart significatif peut être observé entre les LCZ urbanisées et non urbanisées, de l'ordre de 0,8°C en moyenne. Les résultats de la période nocturne sont tout autre, et révèlent des différences de températures d'air systématiques entre les types de LCZ. Ainsi, des écarts moyens supérieurs à 1,5°C sont observés entre deux types de LCZ urbanisées en période nocturne, alors que ces LCZ urbanisées sont plutôt homogènes en période diurne. Ces observations sont en accord avec la description de l'évolution journalière de température détaillée dans la littérature, à savoir une faible différence de température d'air dans l'agglomération en journée et de forts contrastes thermiques 3 à 5 heures après le coucher du soleil [Oke, 1987] [Holmer *et al.*, 2007] [Erell *et al.*, 2011].

4.2.2 Confrontation aux études antérieures

La classification LCZ rend plus pertinente la comparaison des valeurs de température entre agglomérations. Par ailleurs, il est indispensable de mettre en perspective les résultats obtenus à Nancy avec ceux d'autres études portant sur la classification LCZ (table 4.4).

Pour établir le concept, Stewart a confronté la classification LCZ à plusieurs séries de mesures mobiles réalisées à Uppsala [Sundborg, 1951] et Vancouver [Stewart, 2011]

	Fraction de surface bâtie	Hauteur moyenne des bâtiments
Compact highrise Compact midrise	[40% ;60%] [40% ;70%]	> 10 m
Open highrise Open midrise	[20% ;40%] [20% ;40%]	> 10 m
Open lowrise Large lowrise Sparsely built	[20% ;40%] [30% ;50%] [10% ;20%]	< 10 m

Table 4.5 : *Fraction de surface bâtie et hauteur moyenne des bâtiments pour les types de LCZ concernés par les comparaisons de* $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$.

[Stewart *et al.*, 2013]. D'autres études ont analysé les différences de température entre LCZ, notamment en utilisant des données de stations météorologiques fixes, comme par exemple à Glasgow [Emmanuel et Krüger, 2012] et à Berlin [Fenner *et al.*, 2014]. Dans le cas de Glasgow, la valeur correspond à une mesure réalisée dans des conditions météorologiques propices au développement d'un îlot de chaleur urbain, à savoir une faible nébulosité et une vitesse de vent inférieur à 1m.s^{-1}, tandis qu'à Berlin, la valeur correspond à une moyenne sur 293 nuits. Dans ce dernier cas, les journées retenues présentent une température d'air maximale supérieure à 25°C, sans prendre en compte les paramètres de vent et de nébulosité. Les mesures réalisées à Uppsala datent de 1951 [Sundborg, 1951]. À cette date, la morphologie de l'agglomération était différente, et la population était moindre qu'actuellement.

Les travaux de recherche sélectionnés ici ne permettent pas d'effectuer toutes les comparaisons de $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ souhaitées. Seule l'étude menée à Uppsala permet une comparaison directe avec Nancy pour les cas de $\Delta T_{air,LCZ\ 2-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 5-D}$. Il est néanmoins possible de confronter les résultats en regroupant les $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ selon deux indicateurs urbains, à savoir la fraction de surface bâtie et la hauteur moyenne des bâtiments (table 4.5). Les LCZ Compact highrise et Compact midrise possèdent une fraction de surface bâtie supérieure à 40%, tandis que les LCZ Open highrise et Open midrise démontrent une fraction de surface bâtie inférieure à 40%. Sur la base de cet indicateur, il est donc possible de dissocier $\Delta T_{air,LCZ\ 1-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 2-D}$ d'une part, et $\Delta T_{air,LCZ\ 4-D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 5-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 5-B}$ d'autre part. En outre, les LCZ Open lowrise, Large lowrise et Sparsely built sont les types de LCZ urbanisés dont la hauteur moyenne des bâtiments est inférieure à 10 m, ce qui permet de regrouper $\Delta T_{air,LCZ\ 6-D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 6-8/D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 6/9-D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 8-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 9-D}$.

	Observations de Stewart	Mesures à Nancy
Faibles différences en matière de morphologie urbaine et de matériaux	< 2°C	0,2°C à 0,5°C
Fortes différences en matière de morphologie urbaine ou de matériaux	2°C à 5°C	1,3°C à 1,8°C
Fortes différences en matière de morphologie urbaine et de matériaux	> 5°C	4,2°C à 4,4°C

Table 4.6 : *Moyenne des différences de température d'air en période nocturne entre types de LCZ. Comparaison entre les ordres de grandeur de Stewart [Stewart, 2011] avec les valeurs mesurées à Nancy.*

Dans le cas des $\Delta T_{air,LCZ\ 1-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 2-D}$ – qui présentent les écarts de température entre des LCZ possédant de fortes contrastes du point de vue des caractéristiques urbaines – Nancy (4,4°C) se situe entre Vancouver (5,6°C) et Uppsala (2,8°C). De même pour $\Delta T_{air,LCZ\ 4-D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 5-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 5-B}$, Nancy (4,2°C) affiche une valeur plus basse que Berlin (5°C) mais plus élevée que Vancouver (3,6°C) et Uppsala (2,0°C). Enfin, dans le cas de $\Delta T_{air,LCZ\ 6-D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 6-8/D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 6/9-D}$, $\Delta T_{air,LCZ\ 8-D}$ et $\Delta T_{air,LCZ\ 9-D}$, Nancy présente également des valeurs intermédiaires (2,9°C et 2,4°C), inférieures à celles de Vancouver (3,2°C) et Glasgow (3,0°C) mais supérieures à celles d'Uppsala (1,8°C).

Par ailleurs, Stewart a proposé des ordres de grandeur des moyennes des différences de température d'air en période nocturne entre types de LCZ, construits sur la base de relevés expérimentaux (table 4.6). Afin d'illustrer son propos, il fournit également une infographie illustrant des ordres de grandeur (figure 4.2). Ceux-ci peuvent être comparés aux différences moyennes de température d'air entre types de LCZ de Nancy. Il s'avère que les différences de température observées à Nancy sont inférieures aux ordres de grandeurs proposés par Stewart, et ce dans chacun des trois cas proposés. Dans le cas des LCZ proches du point de vue de la morphologie et des matériaux (partie en bleue sur la figure 4.2), les différences de température observées à Nancy sont inférieures ou égales à 0,5°C, soit bien inférieures à la limite de 2°C proposée par Stewart. Cela correspond aux différences de températures observées à l'intérieur des trois groupes. Les différences de température d'air sont comprises entre 1,3°C et 1,8°C à Nancy entre les LCZ présentant de fortes différences en matière de morphologie urbaine ou de matériaux (partie en gris sur la figure 4.2), à savoir entre les LCZ du groupe Midrise et les LCZ du groupe Lowrise. Ces valeurs se situent en dessous de l'intervalle de température (entre 2°C et 5°C) suggéré par Stewart. Enfin, les LCZ

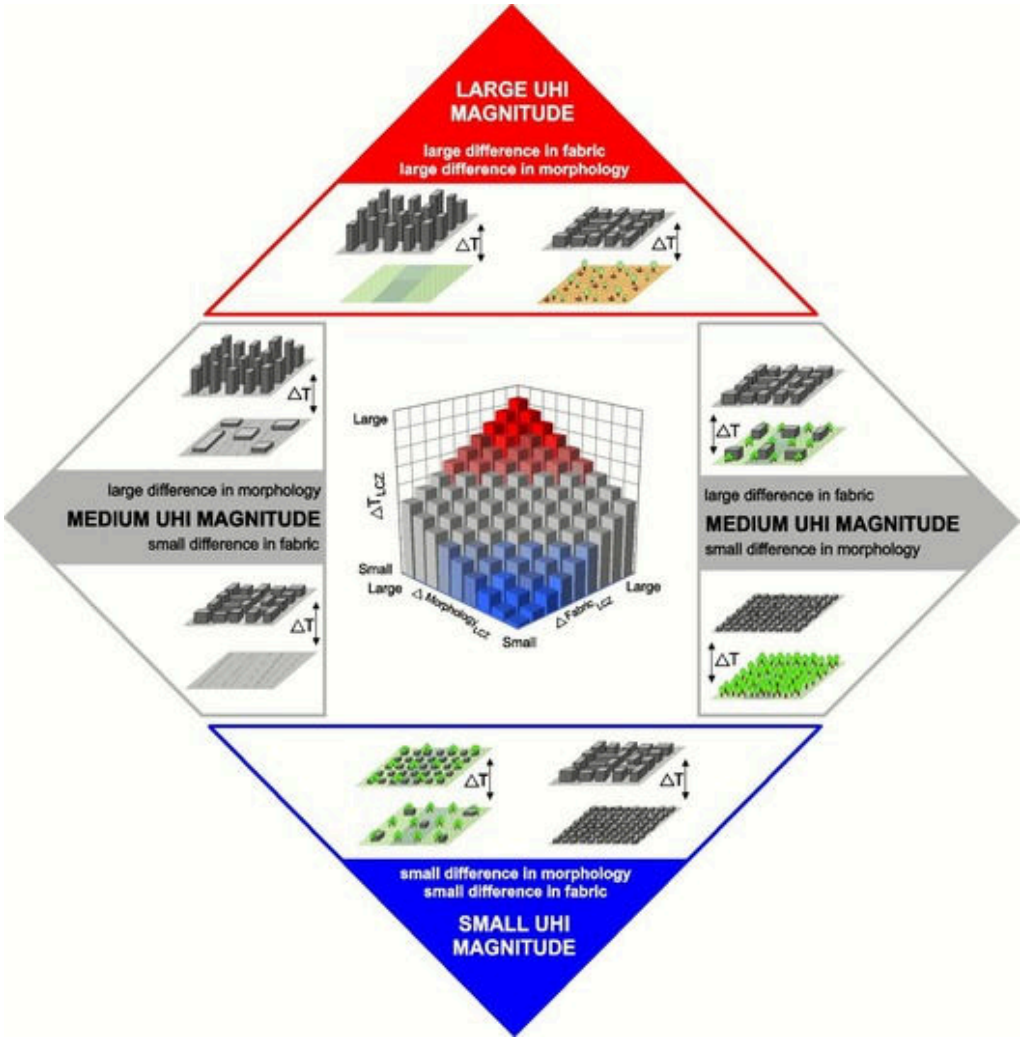


Figure 4.2 : *Illustration des différences de température d'air entre LCZ en période nocturne proposée par Stewart [Stewart, 2011].*

démontrant de fortes différences en termes de morphologie urbaine et de matériaux (partie en rouge sur la figure 4.2) présentent une différence de température comprise entre 4,2°C et 4,4°C à Nancy, en deçà de la valeur minimale proposée par Stewart (5°C). Il s'agit ici de l'écart de température entre les LCZ du groupe Midrise et les LCZ du groupe Plants.

La taille de la ville peut potentiellement expliquer la différence observée entre les ordres de grandeur de Stewart et les résultats à Nancy. En effet, ceux proposés à la table 4.6 semblent se baser sur les valeurs observées à Vancouver, qui est une ville nord-américaine dont l'agglomération présente une population d'environ 2,5 millions d'habitants. La taille plus réduite de l'agglomération de Nancy pourrait expliquer le fait que les valeurs mesurées soient en dessous des ordres de grandeur. Cette hypothèse

est formulée à partir des travaux de Oke, qui a mis en évidence une corrélation entre population (et par extension taille de l'agglomération) et amplitude de l'îlot de chaleur urbain (équation 1.16). Cette équation traduit le fait que plus l'agglomération est grande, plus les différences de température entre deux types de LCZ donnés sont importantes.

4.3 Dynamique thermique intra-LCZ

La précédente campagne de mesure concerne deux instants particuliers de la journée. De ce fait, elle fournit seulement une partie de l'information concernant la distribution temporelle de température d'air. L'objectif de cette seconde série de mesures est de mieux comprendre la dynamique journalière du comportement thermique des LCZ. Pour cela, des mesures de température d'air ont été réalisées sur une période de 24 h dans quatre LCZ à une fréquence horaire.

4.3.1 Protocole de mesures mobiles

Itinéraires de mesures

Le tracé de cet itinéraire a dû prendre en compte la contrainte de la mesure à une fréquence horaire. Ce trajet devait être parcouru en moins d'une heure, ce qui a impliqué de sélectionner un nombre réduit de LCZ. Dès lors, la priorité a été donnée aux différences de comportement climatique observables entre le centre de l'agglomération et sa proche périphérie (figure 4.3). Ainsi, cette seconde série de mesures se focalise sur quatre LCZ parmi les treize construites de façon complète, à savoir les LCZ CEN (Compact midrise), OUE (Compact midrise), THL (Open midrise) et JAR (Open lowrise / Sparsely built). Le tracé construit intègre les deux sites de contrôle de chaque LCZ.

Conditions expérimentales

Les mesures mobiles à fréquence horaire durant 24 h ont été réalisées à deux reprises : le 2 août 2013 entre 4 h 30 et 23 h 30, et entre le 21 août 2013 à 8 h et le 22 août à 7 h 30. Cette série de mesures s'est déroulée dans des conditions météorologiques favorisant une forte amplitude de l'îlot de chaleur urbain (conditions

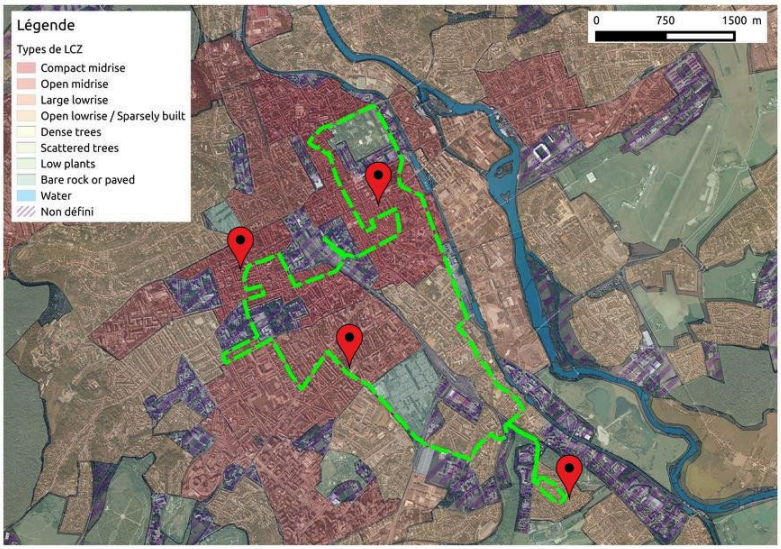


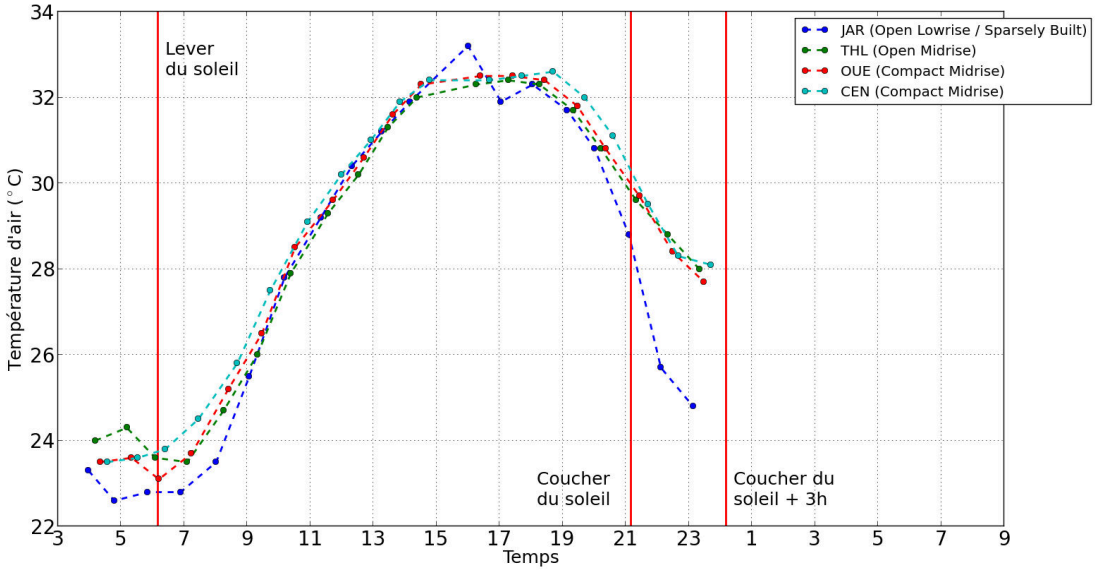
Figure 4.3 : *Itinéraire pour les mesures mobiles à fréquence horaire. Les quatre LCZ étudiées sont repérées par un marqueur rouge.*

météorologiques anticycloniques, vitesse de vent inférieure à 12 km.h^{-1}, et nébulosité inférieure ou égale à 2 octas). Les conditions météorologiques observées le jour de la mesure étaient similaires aux conditions observées le jour précédent. Les données concernant les conditions météorologiques au moment des mesures sont disponibles à l'Annexe C. En raison de la dégradation des conditions météorologiques en cours de nuit, la première session s'est interrompue à la fin de la 19ième heure de mesure.

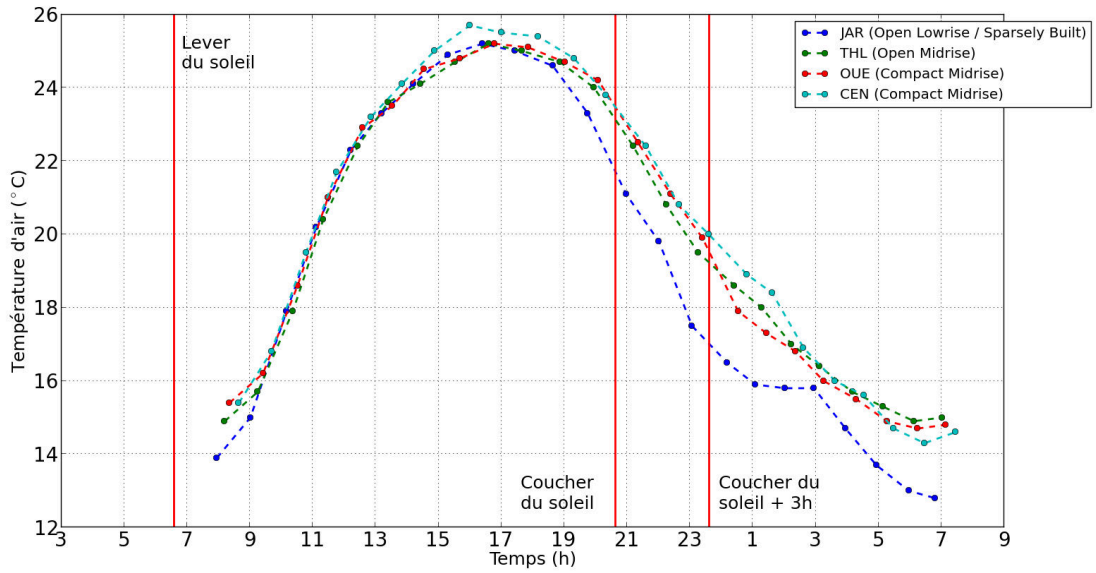
4.3.2 Résultats

La figure 4.4 présente les températures d'air des quatre LCZ étudiées dans le cadre du protocole. Chaque courbe est constituée de l'ensemble des températures d'air $\overline{T_{air}}$ relevées dans une LCZ spécifique à un instant donné. Du fait des conditions météorologiques rencontrées le 2 août, le comportement thermique nocturne est étudié uniquement sur la session du 21 août.

Il est possible de constater sur les figures 4.4(a) et 4.4(b) des caractéristiques semblables pour chaque session du point de vue de la dynamique de température d'air. Au lever du soleil, les LCZ présentent des températures d'air $\overline{T_{air}}$ différentes. À partir de cet instant, l'intensité du flux radiatif CLO augmente fortement, et la température à l'intérieur des LCZ commence à converger vers une même valeur. Environ trois



(a)



(b)

Figure 4.4 : *Température d'air $\overline{T_{air}}$ à fréquence horaire dans quatre LCZ. En partant de la gauche, les trois lignes rouges verticales représentent respectivement l'heure de lever du soleil, l'heure du coucher du soleil, et 3h après le coucher du soleil. (a) 2 août 2013. (b) 21 août 2013.*

heures après le lever du soleil, les quatre LCZ étudiées présentent des températures très similaires, et ce jusqu'à atteindre le maximum journalier de température vers 17h.

Environ 1 à 2h avant le coucher du soleil, le flux radiatif CLO décline fortement. C'est à ce moment que la température de JAR évolue différemment des autres LCZ. Au fur et à mesure que le flux radiatif CLO diminue, l'écart de température entre JAR et les autres LCZ augmente. Pour la session du 21 août 2013, l'écart maximal est atteint approximativement 3h après le coucher du soleil (3°C entre les LCZ JAR et CEN). Cette session de mesure indique que les LCZ ne se refroidissement pas au même rythme pendant la période qui s'étend de 1 à 2h avant le coucher du soleil à 3 à 5h après le coucher du soleil. Certains types de LCZ (ici Open lowrise / Sparsely built) se refroidissent plus rapidement que d'autres (ici Compact midrise et Open midrise) durant cette période. À partir de minuit et jusqu'à 8h, l'écart de température se stabilise entre JAR d'une part, et les autres LCZ d'autre part (cas du 21 août 2013, figure 4.4(b)). La courbe de JAR se rapproche seulement des trois autres courbes à 3h de manière ponctuelle, pour une raison indéterminée.

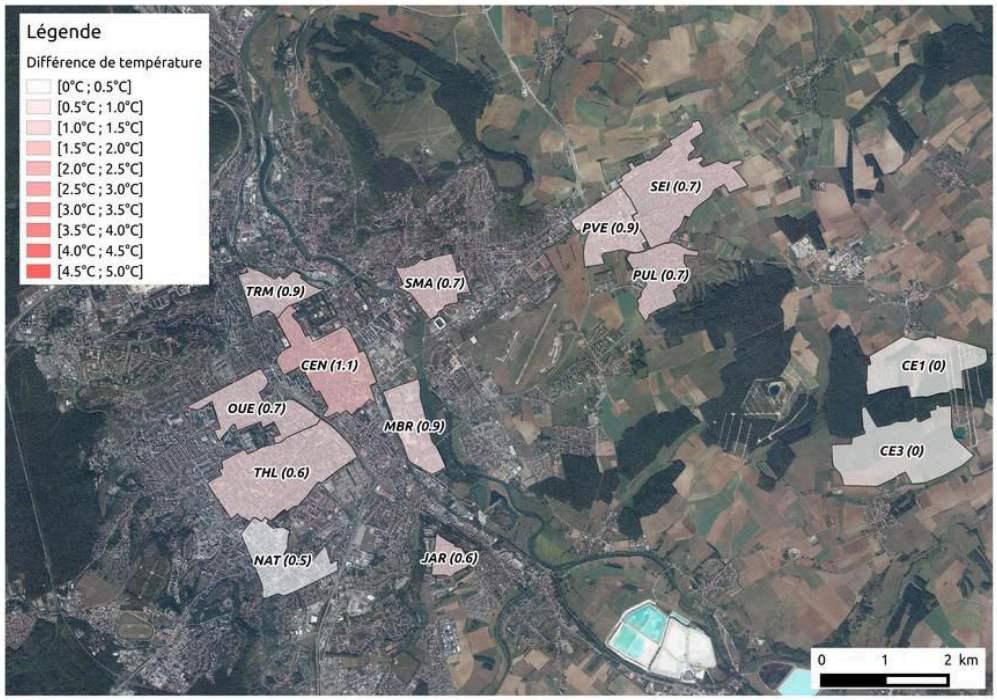
Ces deux sessions de mesure sont à mettre en relation avec les résultats des trajets réalisés dans les treize LCZ. Les mesures horaires indiquent qu'entre 14h et 17h30, les LCZ urbanisées ont tendance à présenter une température d'air proche. Cette observation concorde avec le faible écart de température enregistré entre les treize LCZ en période diurne. En outre, les mesures horaires confirment que les écarts de température entre les LCZ sont particulièrement important entre minuit et 3h30, période durant laquelle les sessions de mesure nocturne ont été menées dans les treize LCZ.

4.4 Cartographie climatique de l'agglomération de Nancy

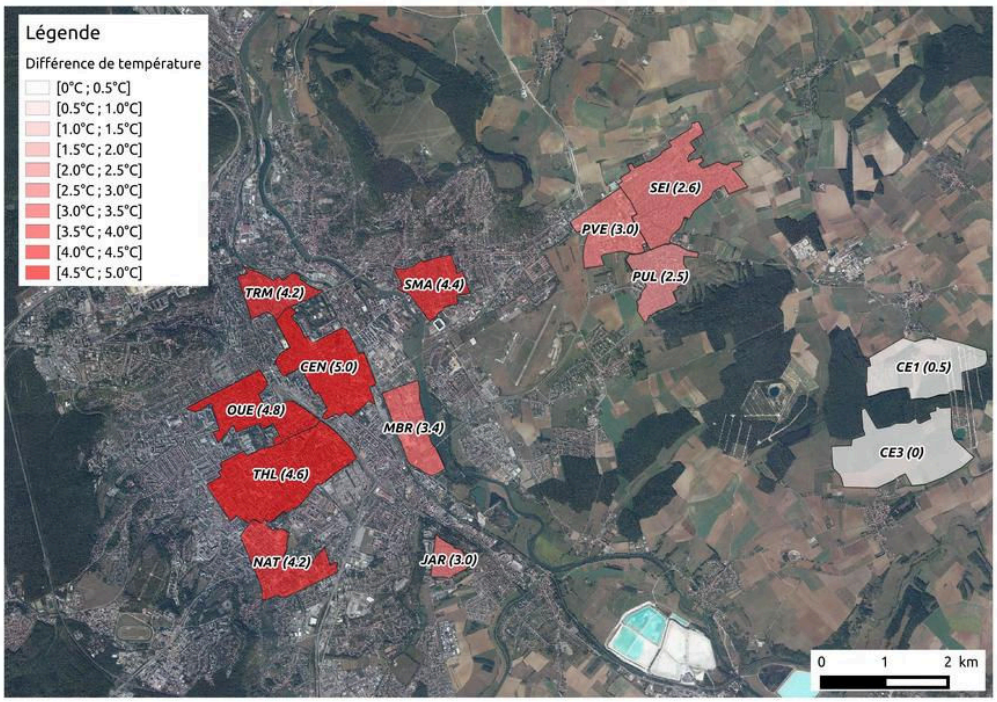
4.4.1 Influence de la position relative des LCZ

La représentation spatiale des résultats présentés dans la table 4.1 permet d'interroger la relation entre température d'air et position relative de la LCZ dans l'agglomération (figure 4.5).

La LCZ CEN (type Compact midrise) peut être considérée comme le centre géographique de l'agglomération. En moyenne sur la période diurne, cette LCZ s'avère



(a)



(b)

Figure 4.5 : *Cartographie des écarts de température moyen construite à partir des 13 LCZ étudiées. Les valeurs utilisées sont présentées dans la table 4.1. Les écarts sont exprimés à partir de la LCZ présentant la température d'air la plus basse. Dans le cas de ces deux figures, il s'agit de CE3* $\Delta T_{air,LCZ\ X-CE3}$. *(a) Période diurne. (b) Période nocturne.*

Type de LCZ	LCZ	Distance par rapport à CEN (km)	Écart moyen de température par rapport à CEN (°C) (période diurne)	Écart moyen de température par rapport à CEN (°C) (période nocturne)
Compact midrise	OUE	1,3	0,3	0,1
	TRM	1,4	0,1	0,7
Open midrise	THL	1,9	0,4	0,3
	SMA	2,1	0,4	0,5
	NAT	3,2	0,6	0,6
Large lowrise	MBR	1,7	0,1	1,6
	PVE	5,0	0,1	1,9
Open lowrise Sparsely built	JAR	3,6	0,5	1,8
	PUL	5,4	0,4	2,5
	SEI	6,2	0,4	2,4
Low plants	CE1	9,2	1,1	4,4
	CE3	9,4	1,1	5,0

Table 4.7 : *Distance par rapport à la LCZ CEN et écart moyen de température par rapport à CEN en périodes diurne et nocturne de 12 LCZ étudiées. La distance par rapport à CEN est calculée entre le centre de la LCZ CEN et le centre de chaque LCZ. Au sein de chaque type, les LCZ sont organisées de la plus proche de CEN à la moins proche.*

être la plus chaude. Les LCZ les plus fraîches, à savoir CE1 et CE3 (type Low plants), sont localisées en grande périphérie de l'agglomération.

En période nocturne, les LCZ les plus chaudes correspondant au groupe Midrise sont toutes situées au centre et en proche périphérie. La situation du groupe Lowrise est plus contrastée. Deux LCZ de ce groupe sont proches du centre (MBR et JAR), tandis que les trois autres (PVE, SEI, PUL) sont localisées en périphérie de l'agglomération. Enfin, les LCZ du groupe Plants présentent les températures les moins élevées, et sont situées à un peu moins de 10 km du centre de l'agglomération.

Le paramètre de la distance par rapport au centre de l'agglomération n'explique pas à lui seul les variations de température observées (table 4.7). En période diurne, THL et SEI présentent le même écart de température par rapport à CEN (0,4°C), alors que leur distance par rapport à CEN est respectivement de 1,9 km et 6,2 km. De même, MBR et PVE, qui appartiennent au même type de LCZ Large Lowrise, présentent le même écart de température par rapport à CEN (0,1°C), alors que leur distance par rapport à CEN est respectivement de 1,7 km et 5,0 km.

Le constat est identique en période nocturne. En effet, NAT et JAR se situent respectivement à 3,2 km et 3,6 km de CEN, pourtant NAT (Open Midrise) est significativement plus chaude que JAR (Open lowrise / Sparsely built) (0,6°C d'écart par rapport à CEN contre 1,8°C). De même, MBR et THL sont localisés respectivement à 1,7 km et 1,9 km de CEN, cependant la température moyenne nocturne est plus faible pour MBR (1,6°C d'écart avec CEN) que pour THL (0,3°C d'écart avec CEN).

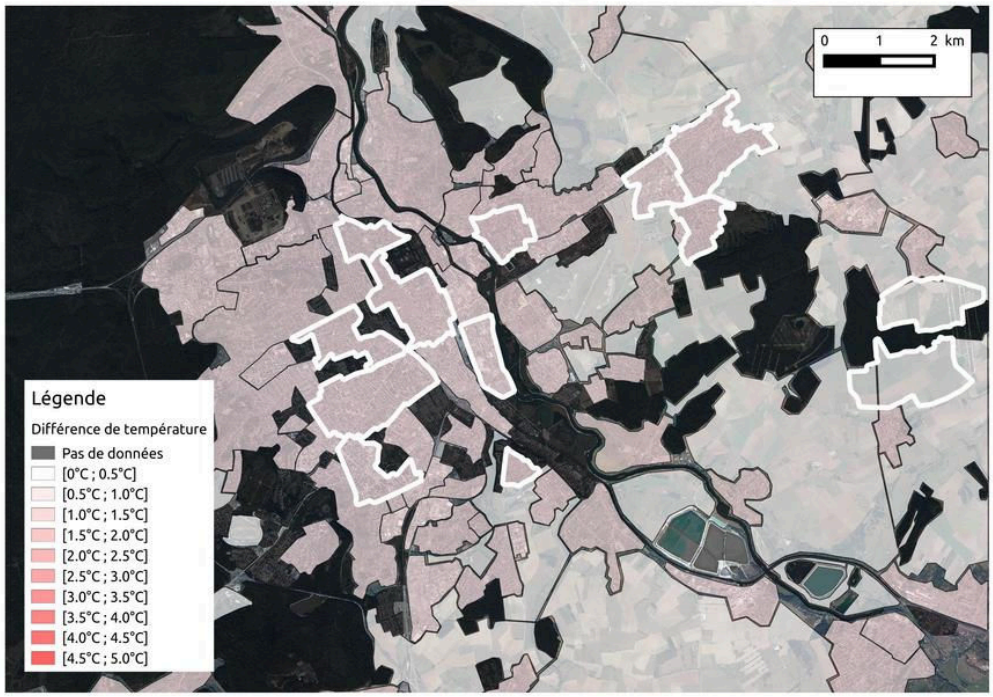
Cependant, pour la période nocturne, la distance par rapport à CEN peut avoir une influence au sein de chaque type de LCZ. En effet, en considérant indépendamment chaque type de LCZ, la LCZ la plus chaude au sein d'un type donnée est la LCZ la plus proche de CEN. À l'inverse, la LCZ la plus froide au sein d'un type donné est la LCZ la plus éloignée de CEN. Ce constat s'applique principalement aux types de LCZ Open Midrise, Open lowrise / Sparsely built et Large Lowrise.

Les résultats confirment l'hypothèse selon laquelle le comportement thermique des LCZ est principalement dicté par le type de la LCZ, et non par sa distance au centre de l'agglomération. Néanmoins en période nocturne, les écarts de température entre LCZ de même type semblent être influencés par ce paramètre, à savoir plus la LCZ est proche du centre de l'agglomération, plus sa température est élevée. La circulation de l'air entre les LCZ pourrait expliquer ce phénomène. Les LCZ les plus chaudes (Compact midrise) étant situées à Nancy au centre de l'agglomération, de l'air chaud peut être advecté depuis celles-ci vers les LCZ qui leur sont mitoyennes. Ainsi, quelque soit le type de ces dernières, elles auront tendance à présenter une température légèrement plus élevée que les autres LCZ du même type. Ce phénomène peut potentiellement se répéter pour chaque LCZ et être responsable des écarts de température observés au sein de chaque type de LCZ.

Par ailleurs, l'influence de la topographie est considérée comme marginale, du fait que l'ensemble des treize LCZ présentent des altitudes proches.

4.4.2 Extrapolation à l'ensemble de l'agglomération

La figure 4.6 est conçue à partir des valeurs de la table 4.2. Les moyennes des différences de température d'air $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ sont appliquées à toutes les LCZ de la cartographie préliminaire construite au chapitre 2. Aucune valeur n'a été attribuée pour les types de LCZ qui n'ont pas été étudiés, comme par exemple le type Dense trees.



(a)

(b)

Figure 4.6 : *Extrapolation de la cartographie des écarts de température moyen à toutes les LCZ de l'agglomération. Les treize LCZ étudiées sont entourées en blanc. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants* $\Delta T_{air,LCZ\ X-Low\ plants}$. *(a) Période diurne. (b) Période nocturne.*

Cela explique notamment la grande zone sombre située à l'ouest de l'agglomération, correspondant à une forêt.

En période diurne, la discrimination thermique entre LCZ urbanisée et non urbanisée est visible, les premières étant en moyenne plus chaudes que les secondes d'environ 0,8°C. En période nocturne, la température la plus élevée (anomalie de température positive de plus de 4°C) est observée au sein d'un rectangle de 5 km de longueur et de 3 km de largeur. En effet, il s'avère que la majorité des LCZ du groupe Midrise sont concentrées à l'intérieur de cette zone. Les LCZ du groupe Lowrise constituent l'essentiel du reste de la zone urbanisée, et présentent une anomalie de température positive d'environ 2,7°C en moyenne. En s'éloignant du centre de l'agglomération vers la périphérie, les LCZ urbanisées et non urbanisées se présentent de façon alternée.

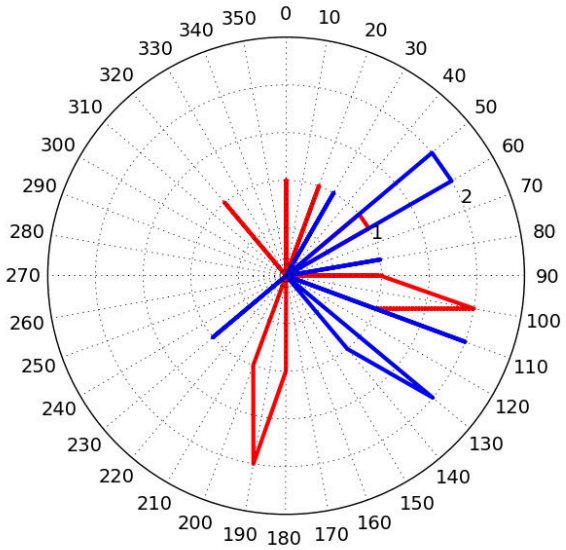
La distribution spatiale de température d'air dans l'agglomération semble dépendre de la répartition des types de LCZ dans l'agglomération. Dans le cas de l'agglomération de Nancy, les LCZ du groupe Midrise sont les plus chaudes, or elles se situent au centre de l'agglomération. Les LCZ du groupe Lowrise présentent une température d'air plus faible, et se répartissent proches du centre ainsi qu'à la périphérie de l'agglomération. À Nancy, la disposition quasi concentrique des types de LCZ devrait aboutir à une anomalie positive de température forte au centre géographique de l'agglomération.

Cette figure illustre les possibilités offertes par la classification LCZ en matière de diagnostic de l'îlot de chaleur urbain à Nancy. Cependant les valeurs numériques présentées doivent être prises avec précaution, car les valeurs de température d'air ont été attribuées à des LCZ qui n'ont pas été complètement construites – c'est à dire des LCZ dont les indicateurs urbains n'ont pas été calculés et confirmés – et qui n'ont pas fait l'objet de mesures mobiles. Ainsi, cette figure est susceptible d'évoluer dans le cas où après calcul des indicateurs dans toutes les LCZ, le type ou les contours de certaines LCZ seraient redéfinis.

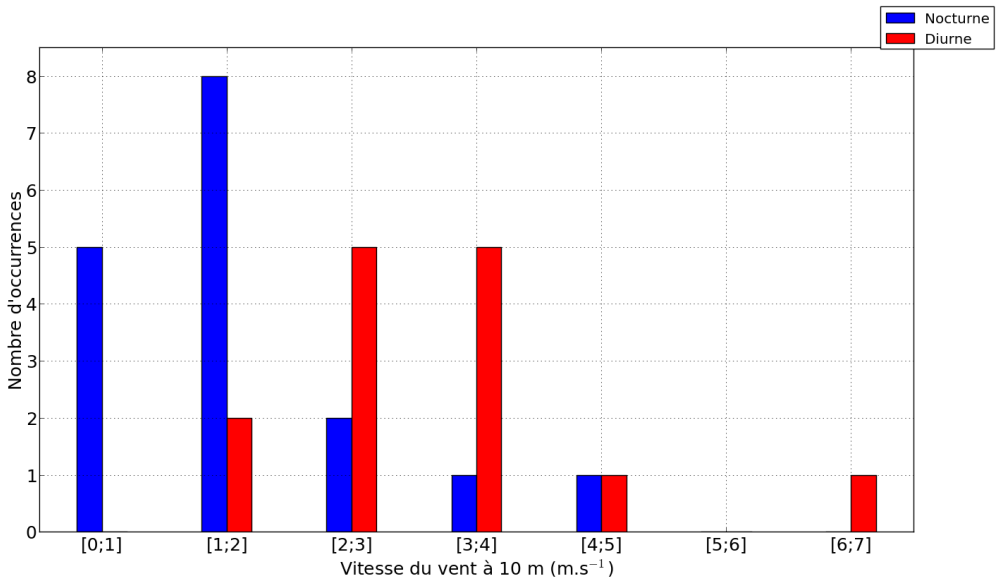
4.5 Influence des conditions météorologiques

4.5.1 Influence de la direction du vent

La figure 4.7(a) présente la direction du vent pour toutes les mesures réalisées en 2012 et 2013 en cas de nébulosité inférieure ou égale à 2 octas (Annexe C). En

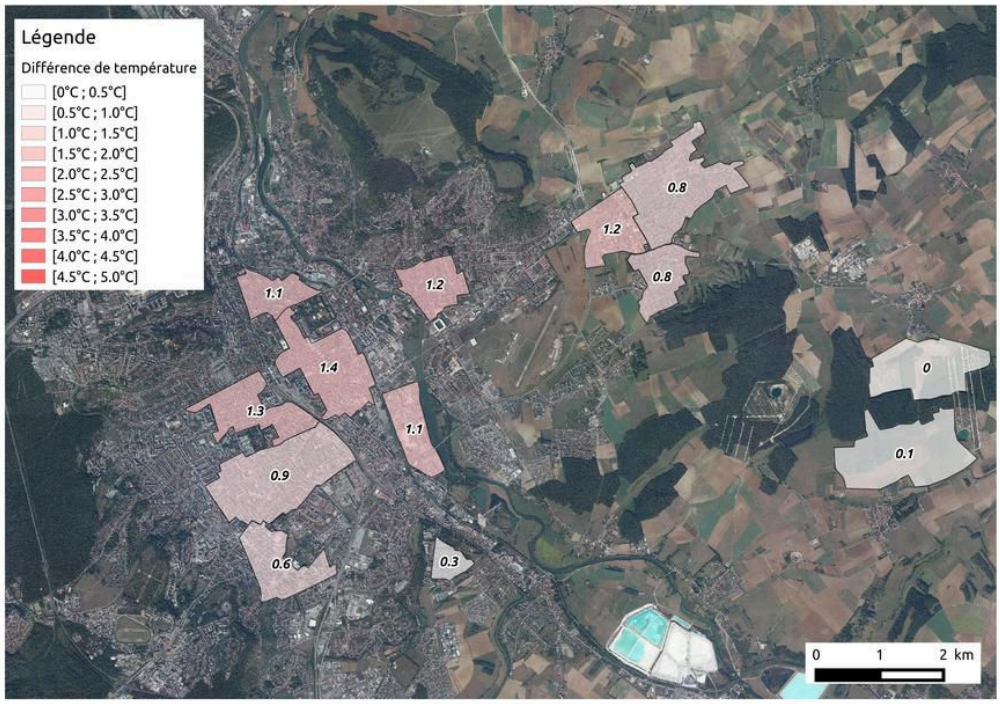


(a)

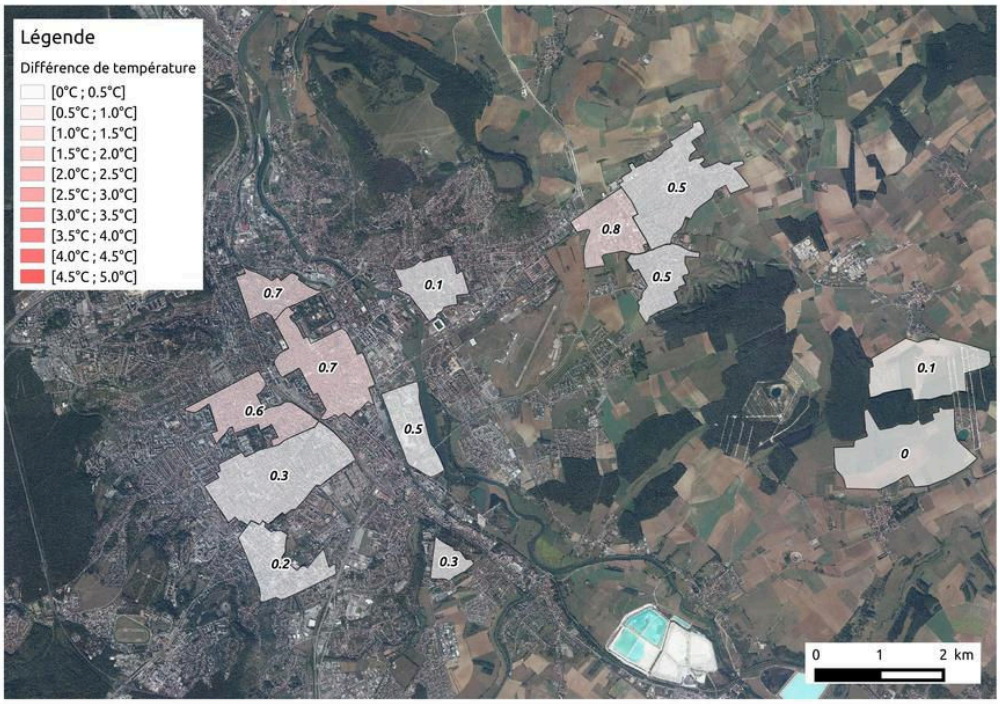


(b)

Figure 4.7 : *(a) Rose des vents pour les mesures réalisées en cas de nébulosité inférieure ou égale à 2 octas. Les sessions présentant une direction du vent variable ont été écartées. (b) Histogramme des vitesses de vent en cas de nébulosité inférieure ou égale à 2 octas.*



(a)



(b)

Figure 4.8 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la direction du vent en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vent de secteur nord-est (Vitesse moyenne = 4,2 m.s^{-1}, 10 juillet et 16 juillet). (b) Vent de secteur est (Vitesse moyenne = 2,8 m.s^{-1}, 21 juillet et 4 septembre).*

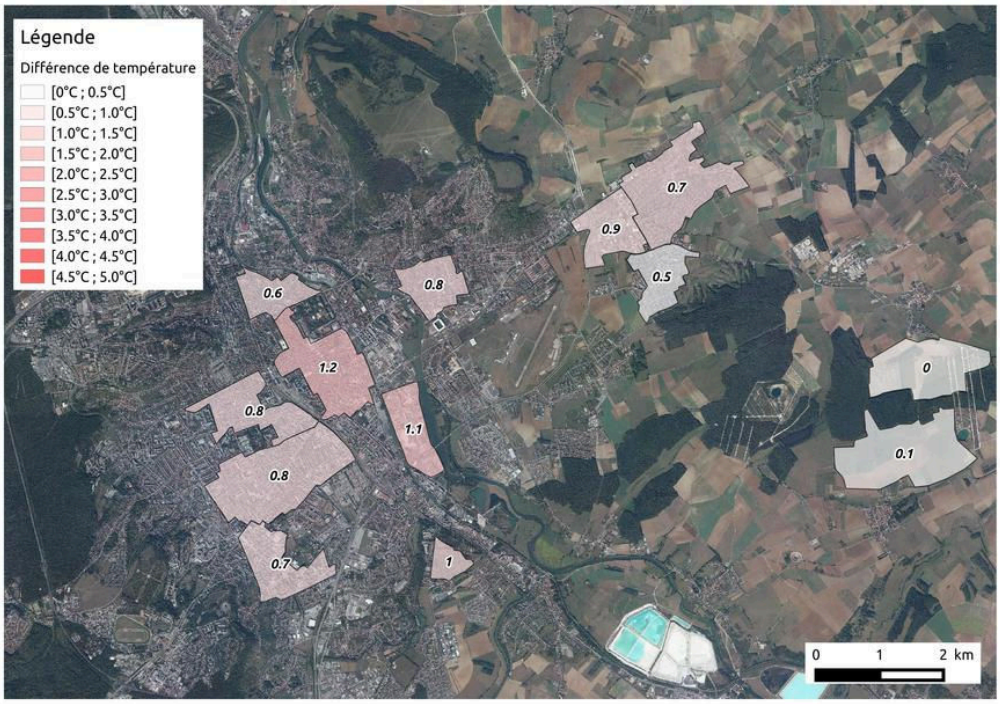
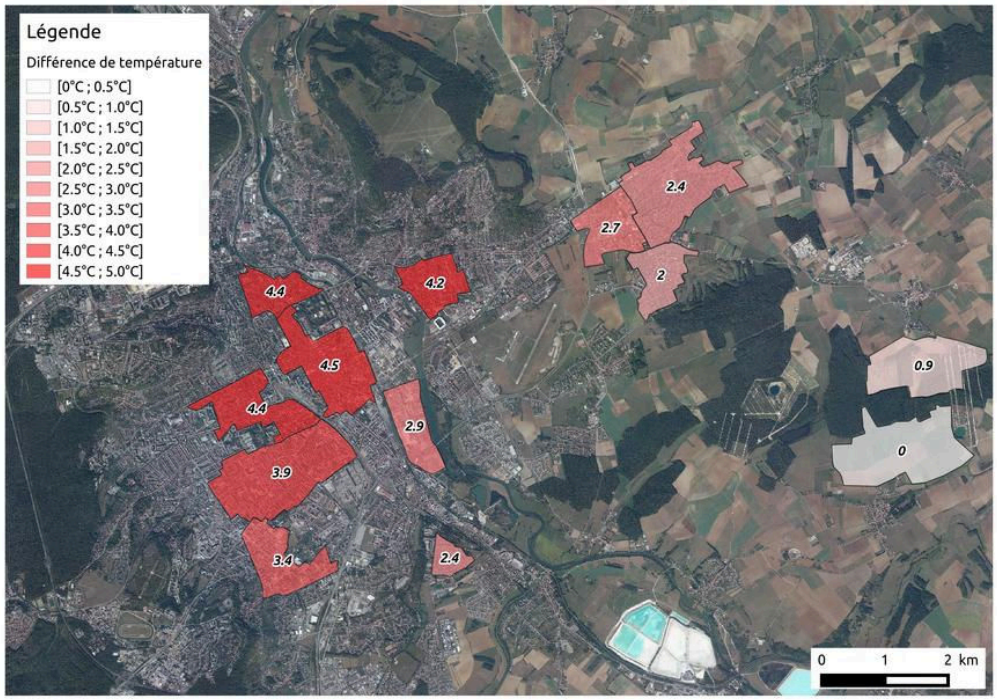


Figure 4.9 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la direction du vent en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. Vent de secteur sud (Vitesse moyenne = 3,0 m.s^{-1}, 1 août et 5 septembre).*

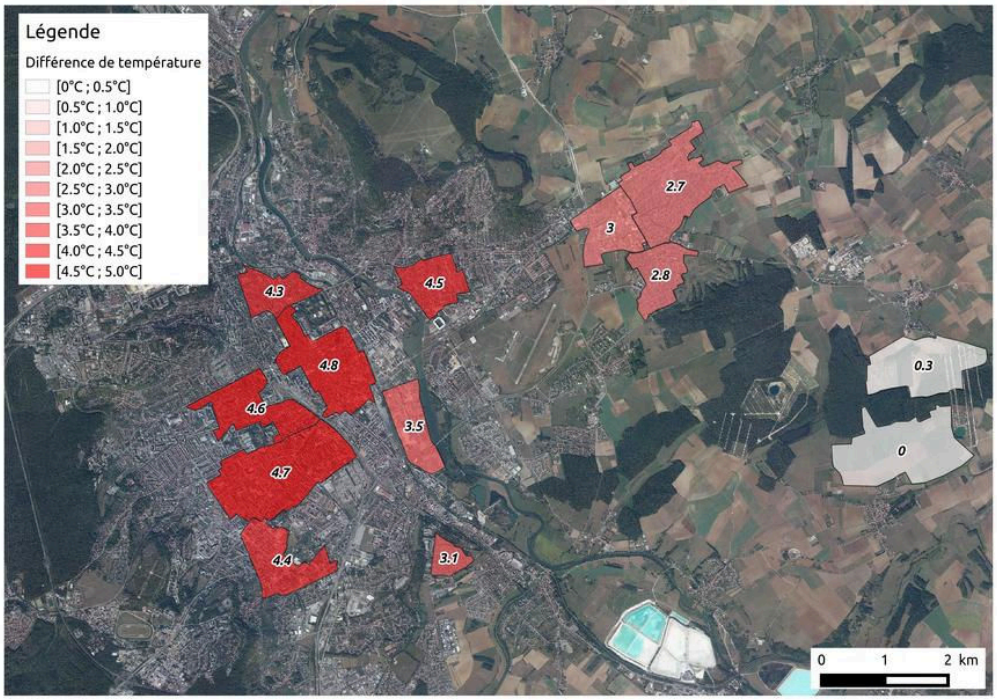
période diurne, le vent provient en majorité de trois directions, à savoir le nord-est (4 occurrences entre 0° et 60°), l'est (4 occurrences entre 90° et 110°) et le sud (4 occurrences entre 180° et 200°). En période nocturne, la direction du vent est principalement orientée nord-est (6 occurrences entre 30° et 80°) et sud-est (5 occurrences entre 110° et 140°).

Les figures 4.8, 4.9 et 4.10 illustrent l'influence de la direction du vent sur la température d'air enregistrée dans les LCZ. Pour les deux périodes diurnes et nocturnes, chaque direction de vent prépondérante est étudiée séparément. Afin de pouvoir comparer les configurations de vent entre elles, il est nécessaire de sélectionner des sessions présentant une nébulosité faible (à savoir inférieure ou égale à 2 octas) ainsi que des vitesses de vent comparables. Du fait de cette contrainte, seules deux sessions de mesures ont été choisies pour chacune des directions de vent observées.

En période diurne, les cas de vents de secteur nord-est et sud présentent des distributions spatiales de températures d'air similaires. Le cas des vents de secteur est diffère des deux cas précédents, les différences de température entre les LCZ sont plus faibles. Dans les trois cas, les LCZ de types Compact midrise et Large Lowrise sont légèrement plus chaudes que les autres LCZ, ce qui confirme l'observation effectuée



(a)



(b)

Figure 4.10 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la direction du vent en période nocturne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vent de secteur nord-est (Vitesse moyenne = 2,1 m.s^{-1}, 9 juillet et 19 juillet). (b) Vent de secteur sud-est (Vitesse moyenne = 1,6 m.s^{-1}, 2 juillet et 2 août).*

en considérant ensemble toutes les directions de vent. Ainsi dans le cas diurne, la direction du vent ne semble pas influer de façon significative sur la distribution spatiale de température d'air.

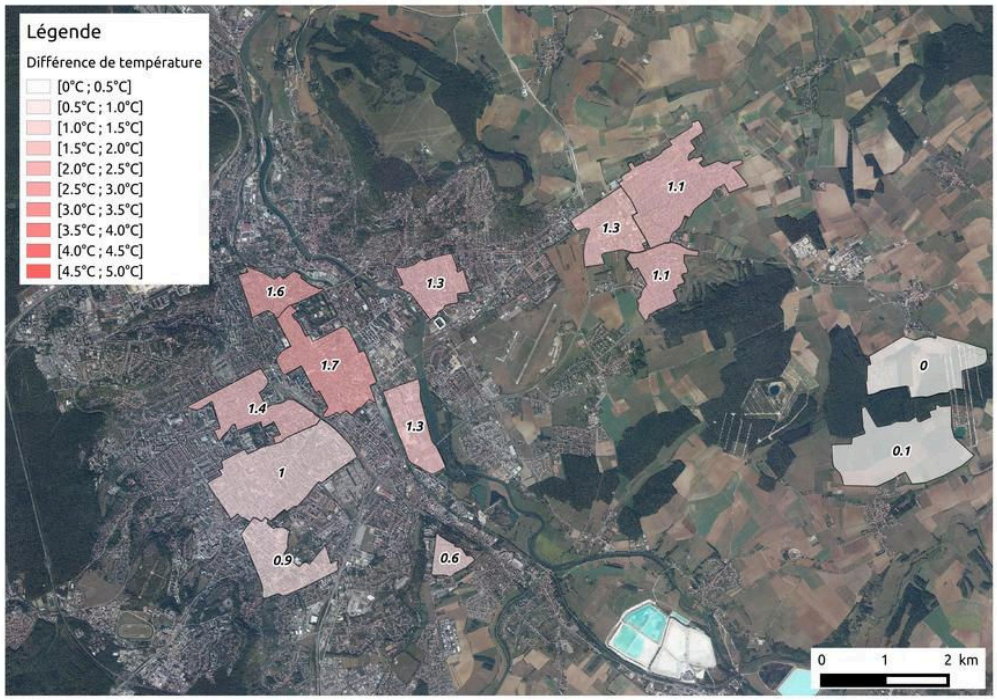
En période nocturne, les deux cas correspondant aux directions de vent de secteur nord-est et sud-est sont également similaires. Pour le secteur nord-est, les LCZ les plus chaudes sont de types Compact midrise (4,5°C en moyenne) et Open midrise (3,8°C en moyenne), suivi des LCZ de types Large lowrise (2,8°C en moyenne) et Open lowrise / Sparsely built (2,3°C en moyenne). Cette distribution des températures est très similaire pour le cas des vents de secteur sud-est. Les types Compact midrise et Open midrise présentent des températures nettement plus élevées que les LCZ de types Large lowrise et Open lowrise / Sparsely built (respectivement 4,6°C et 4,5°C en moyenne contre 3.3°C et 2,9°C). Ainsi, la distribution spatiale de température ne semble pas dépendre de la direction du vent en période nocturne.

Il apparaît que la direction du vent influe peu sur la distribution spatiale de température d'air. Ceci peut s'expliquer par le fait que les mesures ont été réalisées dans des conditions de vent faible. Ainsi, pour les vitesses de vent concernées, les variations de la direction du vent n'entraînent pas de variation de la configuration de l'îlot de chaleur urbain.

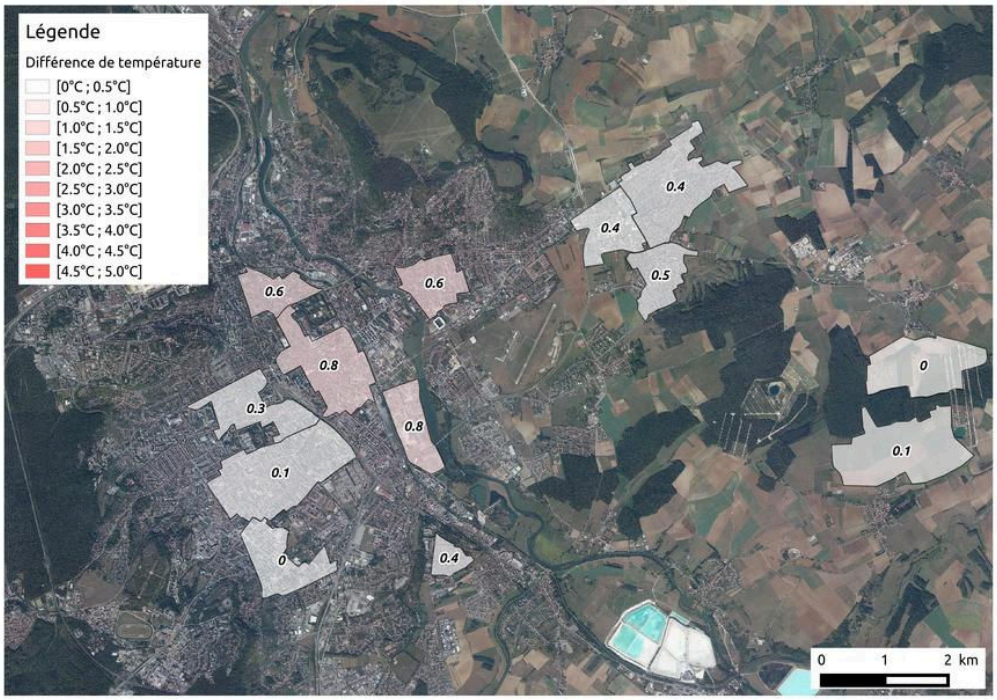
4.5.2 Influence de la vitesse du vent

Il est également nécessaire d'étudier l'influence de la vitesse du vent sur la distribution spatiale de la température d'air. La figure 4.7(b) fournit la vitesse de vent observée à 10 m au niveau de l'aérodrome d'Essey-les-Nancy (Annexe C). Cette donnée provient des relevés effectués en continu par Météo France. En période diurne, la vitesse de vent observée à 10 m est dans l'ensemble comprise entre 2 et 4 $m.s^{-1}$. Le vent est plus faible en période nocturne, sa vitesse est en règle générale inférieure à 2 $m.s^{-1}$. Seules trois mesures ont été effectuées pour une vitesse de vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$, et une seule correspond à une vitesse de vent supérieure à 6 $m.s^{-1}$.

Il faut signaler que la vitesse de vent observée en milieu urbain est plus faible que celle observée au niveau de la station Météo France. En effet, la mesure de vent à Météo France est effectuée pour une hauteur de 10 m et en terrain dégagé. Du fait de l'absence d'éléments de rugosité à proximité du site de mesure, la valeur de vitesse de vent est nécessairement plus élevée dans ces conditions que dans les LCZ urbanisées

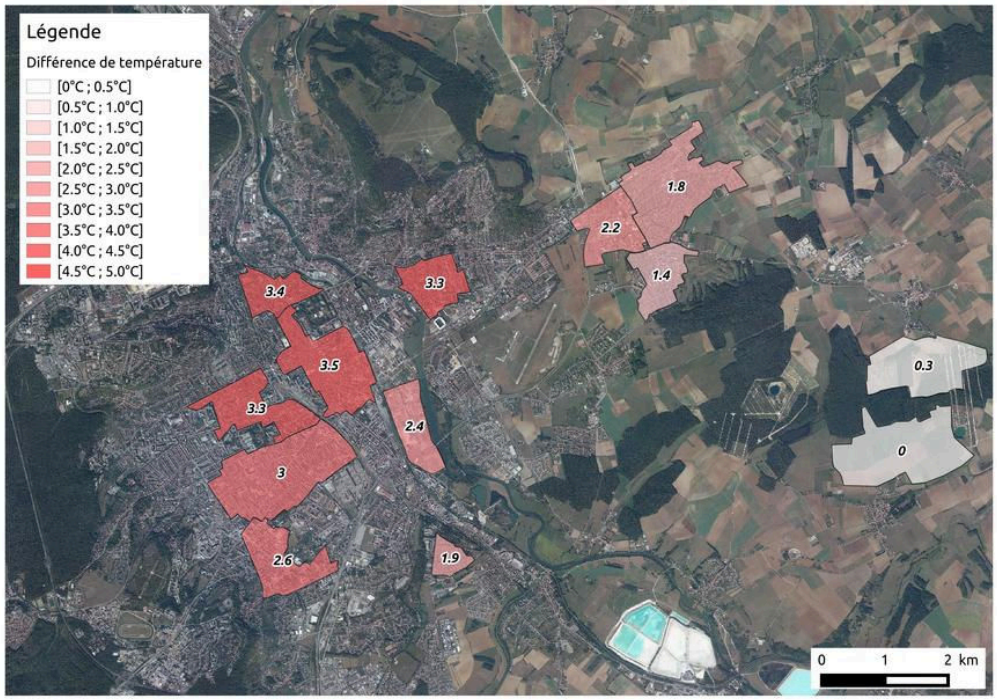


(a)

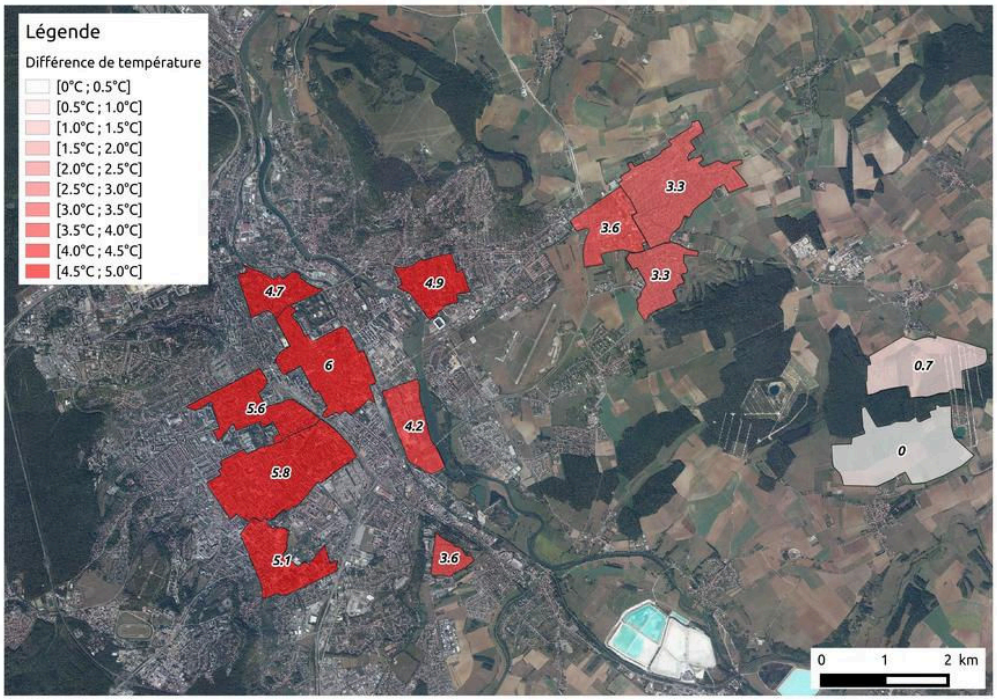


(b)

Figure 4.11 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la vitesse du vent en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vitesse de vent modérée (Vitesse moyenne = 5,4 m.s^{-1}, 8 juillet et 10 juillet). (b) Vitesse de vent faible (Vitesse moyenne = 1,9 m.s^{-1}, 15 août et 16 août).*



(a)



(b)

Figure 4.12 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la vitesse du vent en période nocturne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Vitesse de vent modérée (Vitesse moyenne = 3,1 m.s^{-1}, 11 juillet et 19 juillet). (b) Vitesse de vent faible (Vitesse moyenne = 1,1 m.s^{-1}, 22 juillet et 15 août).*

de l'agglomération. Ces valeurs ne correspondent pas à la vitesse de vent effective dans les LCZ.

Les figures 4.11 et 4.12 présentent l'influence de la vitesse du vent sur la température d'air relevée dans les LCZ. Pour les deux périodes diurnes et nocturnes, deux cas de vitesse de vent sont sélectionnés. Deux sessions de mesures ont été considérées dans chaque cas.

En période diurne, il s'avère que les différences de température entre LCZ urbanisées et non urbanisées sont plus élevées en cas de vent fort qu'en cas de vent faible. La différence de température entre les LCZ Compact midrise (resp. Large Lowrise) et Low plants est en moyenne de 1,6°C (resp. 1,3°C) en cas de vent fort, et de 0,6 (resp. 0,6°C) en cas de vent faible. Cet écart entre les deux cas peut s'expliquer par le comportement thermique des LCZ de type Low plants. En cas de vent fort, les échanges convectifs peuvent être très développés dans ces LCZ, de par l'absence d'éléments de rugosité. De plus, ce vent fort favorise le processus d'évapotranspiration dans ces zones généralement majoritairement végétalisées. Ces deux phénomènes peuvent limiter la hausse des températures en période diurne, et donc entraîner une augmentation de la différence de température entre LCZ urbanisées et non urbanisées.

En période nocturne, la vitesse du vent est un paramètre fondamental concernant les différences de température entre LCZ. En effet, ces différences sont significativement plus importantes en cas de vent faible. Entre le cas de vent fort et le cas de vent faible, la différence de température par rapport aux LCZ Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$ augmente de 2°C pour les LCZ Compact midrise, de 2,3°C pour les LCZ Open midrise, de 1,6°C pour les LCZ Large lowrise et de 1,7°C pour les LCZ Open lowrise / Sparsely built.

La présence de vents forts brasse les masses d'air, favorise l'advection et donc limite les différences de température entre les zones de l'agglomération. À l'inverse, les échanges convectifs entre l'air et les surfaces urbaines sont plus limités en cas de vent faible, de même que l'advection d'air d'une LCZ à l'autre. De ce fait, le flux radiatif GLO ascendant et la restitution de chaleur par la surface de la LCZ prennent une place importante dans le processus de refroidissement des LCZ. Dans le cas de l'agglomération de Nancy, le flux radiatif GLO ascendant est maximisé dans les LCZ Low plants du fait de leur morphologie (SVF proche de 1). À l'inverse, les LCZ urbanisées présentent des valeurs de SVF plus faibles, et donc un flux radiatif GLO ascendant réduit. Les types de LCZ possédant des valeurs de SVF faibles (groupe

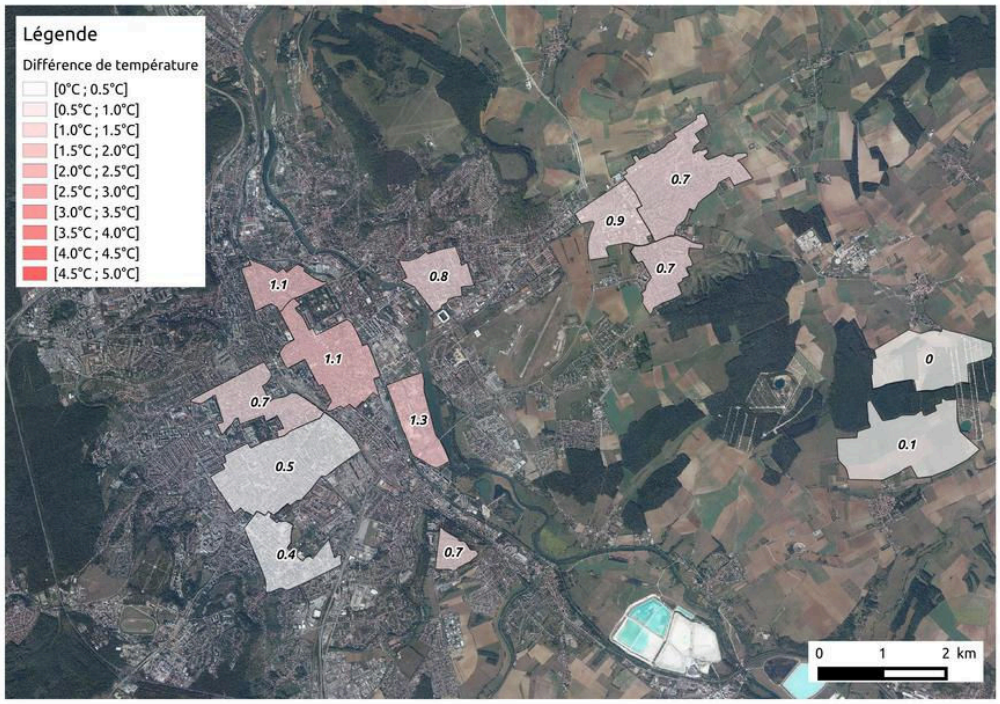
Midrise) sont ceux dont la différence de température par rapport aux LCZ Low plants augmente le plus. En outre, les matériaux des LCZ urbanisées emmagasinent plus de chaleur pendant la journée que les matériaux des LCZ non urbanisées, du fait de leur effusivité thermique plus élevée. Ainsi, les premiers réémettent plus de chaleur en période nocturne que les seconds, ce qui tend à accroître la différence de température entre LCZ urbanisées et non urbanisées.

4.5.3 Influence de la nébulosité

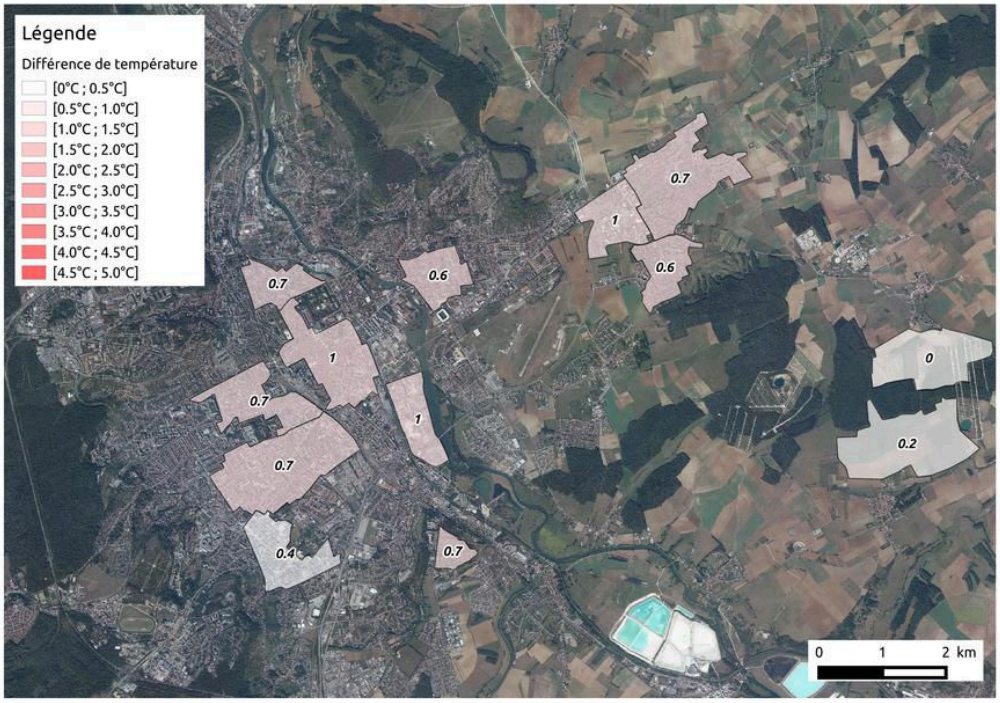
Les figures 4.13 et 4.14 renseigne sur l'influence de la nébulosité sur la température d'air dans les LCZ en période diurne et nocturne. Pour les deux périodes diurnes et nocturnes, deux cas de nébulosité identiques sont considérés. Trois sessions de mesures ont été sélectionnées dans chaque cas, et la vitesse de vent moyenne est choisie proche entre les deux périodes.

En période diurne, les deux cas étudiés correspondent à une nébulosité très élevée (7 octas) ainsi qu'à une nébulosité nulle (0 octas). Aucune variation marquante en termes de différences de température n'est observée entre les deux cas de nébulosité étudiés.

En période nocturne, les résultats démontrent l'importance de la nébulosité sur la distribution spatiale des températures. En cas de nébulosité moyenne (4 octas), les LCZ du groupe Midrise présentent une différence de température par rapport aux LCZ Low plants comprise entre 2,2°C et 3°C, tandis que les LCZ du groupe Lowrise possèdent une différence comprise entre 1,1°C et 2°C. Ces différences entre LCZ s'accroissent significativement lorsque la nébulosité est nulle. Dans ce cas, les LCZ du groupe Midrise présentent une différence de température par rapport aux LCZ du groupe Plants comprise entre 4,2°C et 5°C, tandis que les LCZ du groupe Lowrise possèdent une différence comprise entre 2,6°C et 3,4°C. L'impact de la nébulosité sur la distribution de température s'explique par le fait que celle-ci perturbe le flux radiatif GLO ascendant au sein des LCZ. En cas de nébulosité nulle, le flux radiatif GLO ascendant est potentiellement maximal et le refroidissement des LCZ repose sur leur caractéristiques urbaines. Dans cette configuration, les LCZ Low plants connaissent une diminution de la température d'air plus importante que les autres LCZ, notamment du fait de leur morphologie – SVF proche de 1 – qui favorise le flux radiatif GLO ascendant. En cas de nébulosité moyenne, le flux radiatif GLO ascendant est réduit, et le refroidissement des LCZ est limité pour toutes les LCZ de l'agglomération. Dans

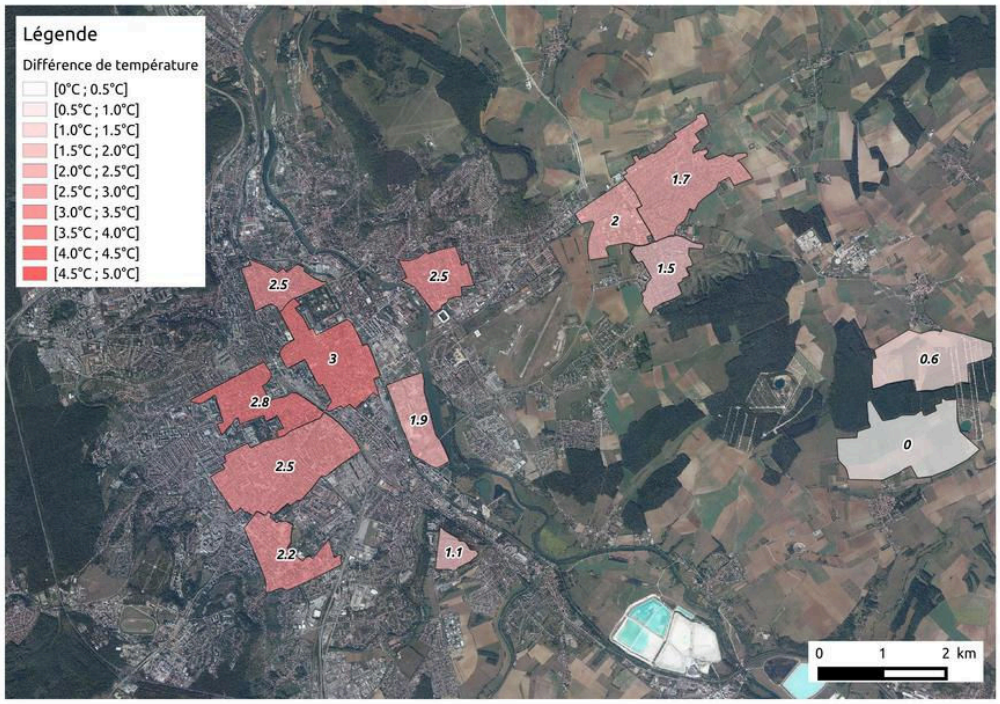


(a)

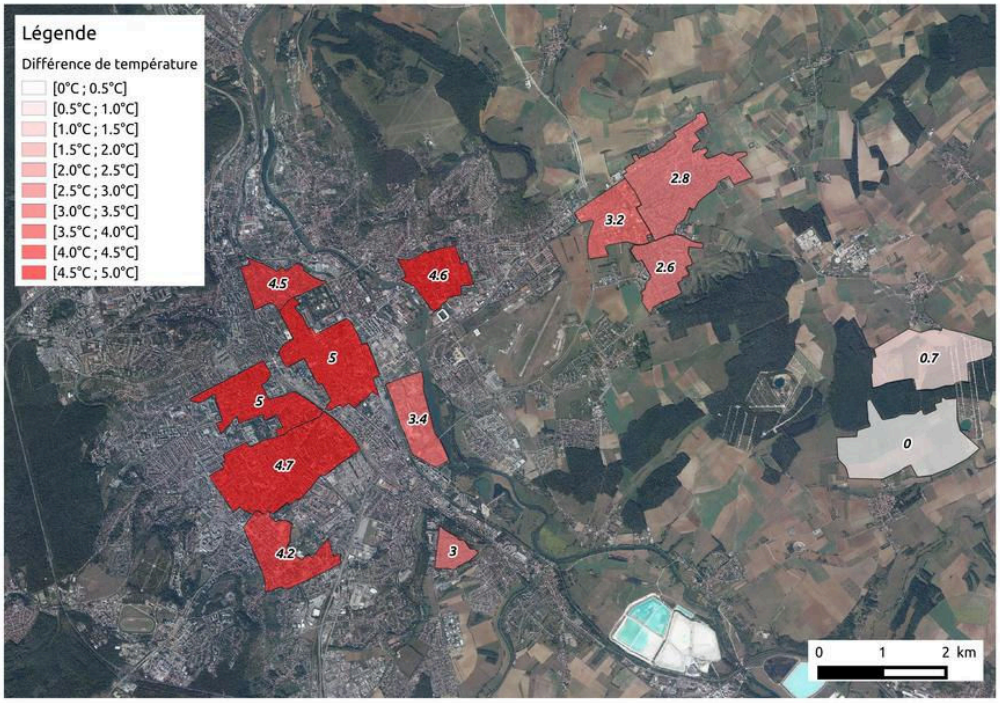


(b)

Figure 4.13 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la nébulosité en période diurne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Nébulosité forte (7 octas, Vitesse moyenne du vent = 3,6 m.s^{-1}, 17 juillet, 9 août et 22 août). (b) Nébulosité faible (0 octas, Vitesse moyenne du vent = 2,8 m.s^{-1}, 1 août, 4 septembre et 5 septembre).*



(a)



(b)

Figure 4.14 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de la nébulosité en période nocturne. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Nébulosité forte (4 octas, Vitesse moyenne du vent = 1,2 m.s^{-1}, 18 juillet, 23 août et 31 août). (b) Nébulosité faible (0 octas, Vitesse moyenne du vent = 1,4 m.s^{-1}, 9 juillet, 2 août et 15 août).*

ce cas, les types de LCZ possédant une morphologie propice à un flux radiatif GLO ascendant important sont ceux dont le refroidissement nocturne est le plus restreint. Dans le cas des mesures réalisées, le refroidissement des LCZ Low plants est modéré par la nébulosité, entraînant la réduction des différences de température observées entre ce type de LCZ et les autres LCZ de l'agglomération.

4.6 Discussion

Il est nécessaire de mettre en perspective les différences de température entre les LCZ, les amplitudes de température relevées dans les LCZ et les incertitudes relatives à l'instrumentation. Ces dernières sont considérées comme étant égales à l'incertitude de mesure de l'élément sensible (± 0,2°C).

Les moyennes des différences de température d'air entre les LCZ peuvent être du même ordre de grandeur que l'amplitude de température dans les LCZ. En effet, la moyenne de l'amplitude de température est de 1,7°C en période nocturne pour les LCZ urbanisées, tandis que la valeur moyenne de $\Delta T_{air,LCZ\ 2-6/9}$ est de 1.8°C. Ce constat met en évidence l'importance des anomalies de température à l'échelle microclimatique (intra-LCZ), celles-ci pouvant être du même ordre de grandeur que les écarts de température d'air inter-LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$. La classification LCZ est une méthode de discrimination des espaces urbains permettant d'étudier ce type d'anomalies, notamment via l'analyse des singularités thermiques présentée au chapitre précédent.

En outre, certaines valeurs de $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ enregistrées en période diurne entre les LCZ urbanisées se situent dans l'intervalle correspondant à l'incertitude de mesure. Dans ce cas, il est difficile d'établir une hiérarchie entre ces LCZ en période diurne, du fait du très faible écart de température existant entre celles-ci.

4.7 Conclusion

Les deux chapitres précédents ont mis en évidence la possibilité d'utiliser la classification LCZ comme approche méthodologique dans un contexte de diagnostic de l'îlot de chaleur urbain. En se plaçant dans cette perspective, l'ensemble de ce chapitre

expose des éléments qui permettent de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Nancy.

La classification LCZ a tout d'abord permis de comparer des différences de température d'air entre quartiers sur la base des mesures mobiles effectuées, aussi bien en période diurne qu'en période nocturne. En période diurne, les différences de température d'air entre LCZ sont réduites, à savoir majoritairement inférieures à 1°C. Ce constat confirme les observations présentes dans la littérature, qui font référence à une amplitude de l'îlot de chaleur urbain limitée en journée.

En période nocturne, le comportement thermique des LCZ permet de regrouper celles-ci selon trois groupes :

- Un premier groupe plus chaud (Midrise) composé des LCZ de type Compact midrise et Open midrise
- Un second groupe intermédiaire (Lowrise) incluant les LCZ de type Large lowrise et Open lowrise/Sparsely built
- Un troisième groupe (Plants) uniquement constitué des deux LCZ Low plants

Le groupe Midrise se distingue du groupe Lowrise du point de vue de leurs indicateurs morphologiques. En revanche, les fractions d'occupation du sol ne permettent pas de distinguer formellement les LCZ du groupe Midrise et des LCZ du groupe Lowrise. Les moyennes des différences de température entre LCZ observées à Nancy sont mises en relation avec celles provenant d'autres études utilisant les LCZ. Celles-ci sont comparables aux valeurs provenant des autres agglomérations sélectionnées. Cependant, elles sont inférieures aux ordres de grandeurs proposés par Stewart. L'hypothèse formulée pour expliquer ce constat est que la taille de l'agglomération influe sur les valeurs de $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$.

Une étude de l'évolution dynamique de la température d'air dans les LCZ a ensuite été menée. La température d'air semble être similaire dans toutes les LCZ entre le début de matinée et la fin d'après midi, avant de diverger selon le type de LCZ peu avant le coucher du soleil. Dans le cas des mesures effectuées, l'écart de température entre les LCZ augmente à partir cet instant, atteint un maximum environ 3 h après le coucher du soleil, puis se stabilise.

Sur la base des mesures mobiles effectuées, une cartographie thermique de l'agglomération de Nancy a pu être dressée. Cette étape a permis d'analyser l'influence de la position relative des LCZ dans l'agglomération sur la température d'air mesurée.

Il s'avère que le paramètre de distance au centre de l'agglomération ne semble pas expliquer la distribution de température d'air à l'échelle de l'agglomération. Cependant, en considérant chaque type de LCZ un à un, les LCZ se situant à proximité du centre de la ville sont légèrement plus chaudes que les LCZ de même type localisée à la périphérie. Cette cartographie thermique a été extrapolée à l'ensemble de l'agglomération de Nancy, sur la base d'une cartographie préliminaire des LCZ. Ce processus a mis en évidence la présence d'une zone plus chaude d'environ 15 km^2 au centre de l'agglomération, correspondant aux LCZ de type Compact midrise et Open midrise.

L'influence des conditions météorologiques de mesure sur les différences de température entre LCZ a également été abordée. Il apparaît que la direction du vent ne semble pas influer pas sur la distribution spatiale de température d'air. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les vitesses de vent observées lors des sessions de mesure sont faibles. Par ailleurs, la vitesse du vent influence les relevés de température d'air, principalement en période nocturne. Durant cette période, une légère élévation de la vitesse (+2 $m.s^{-1}$ dans le cas étudié) peut faire évoluer significativement les différences de température entre LCZ. Enfin, une nébulosité élevée agit sur les relevés de température uniquement en période nocturne, en faisant baisser les valeurs de $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ entre 1,4°C et 2°C.

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre attestent de la pertinence de l'utilisation combinée de la classification LCZ et des mesures mobiles dans le contexte de la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain d'une ville telle que Nancy. L'approche développée fournit de nombreuses informations quantitatives sur les distributions spatiale et temporelle de température d'air, et rend possible le diagnostic du climat urbain en évitant les imprécisions induites par les termes "urbain" et "rural" utilisés auparavant. La connaissance acquise par le biais de cette étude aboutit dans le chapitre suivant à un cadre de travail concernant la modélisation de certains aspects du comportement climatique des LCZ identifiées à Nancy.

5

Processus de rafraîchissement des LCZ et indicateurs urbains : vers une modélisation

5.1 Introduction

La pertinence de l'association de la classification LCZ et de mesures mobiles de température d'air pour caractériser l'îlot de chaleur urbain a précédemment été démontrée. Il s'agit dorénavant d'examiner la façon dont les écarts de température entre les LCZ s'établissent et aboutissent au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Ainsi, ce chapitre examine les tendances systématiques en matière de rafraîchissement des LCZ. Afin de mener cette analyse, un indicateur climatique caractérisant ce rafraîchissement est proposé. Par la suite, cet indicateur climatique est mis en relation avec les indicateurs urbains calculés via la réalisation de régressions linéaires.

5.2 Indicateur climatique de rafraîchissement

5.2.1 Définition du taux de rafraîchissement

La dynamique de rafraîchissement des LCZ conditionne les écarts de température observés entre celles-ci en période nocturne. Afin d'analyser l'évolution temporelle de la température d'air pendant la période correspondant à l'établissement du phénomène d'îlot de chaleur urbain, Holmer fait appel à la notion de taux de rafraîchissement, qui

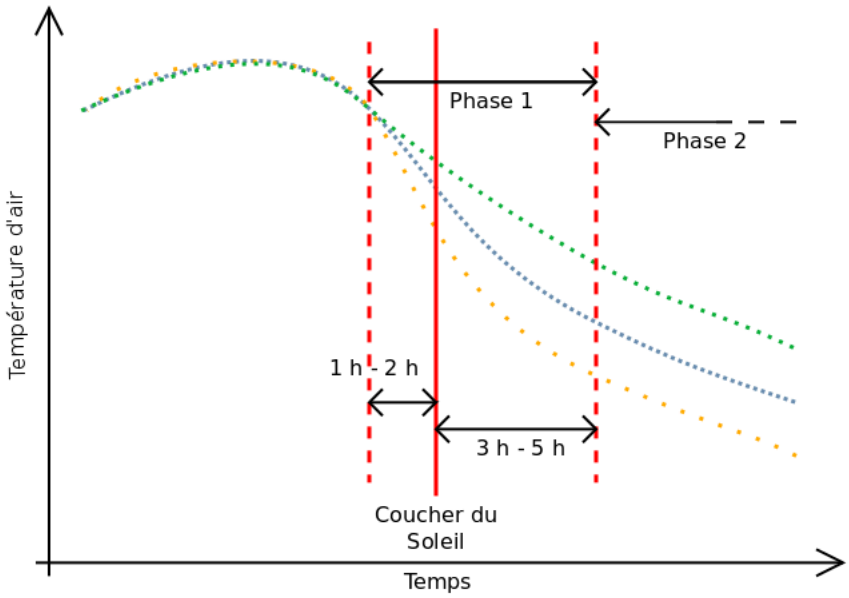


Figure 5.1 : *Schématisation du rafraîchissement nocturne en deux phases par type de LCZ.*

se définit de la façon suivante [Holmer *et al.*, 2007] :

$$\chi = \frac{\theta T_{air}}{\theta t} \tag{5.1}$$

Selon lui, l'analyse de ce taux permet de mettre en évidence le fait que le rafraîchissement urbain nocturne s'organise autour de deux phases distinctes (figure 5.1) :

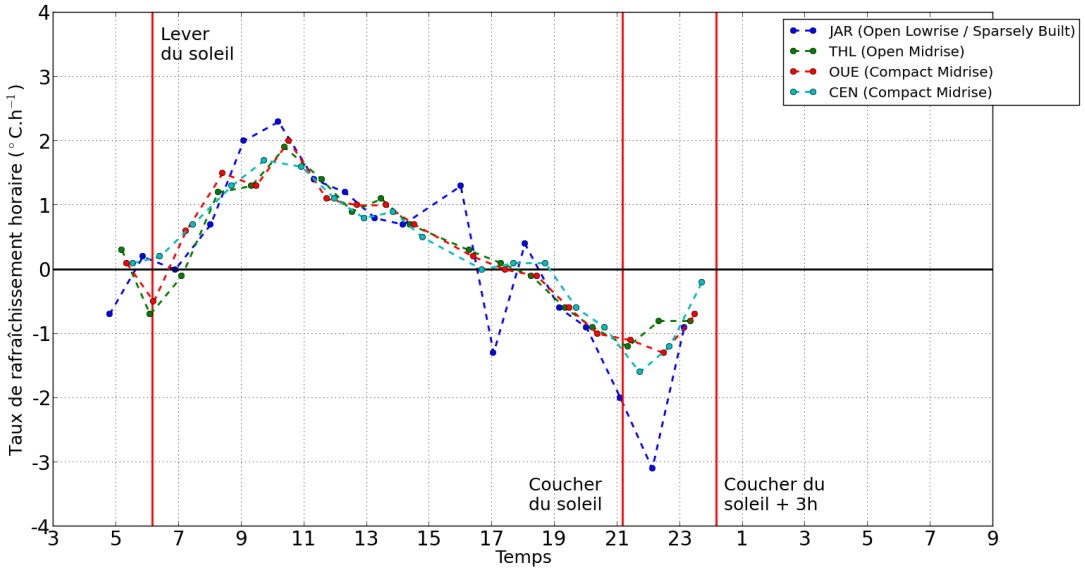
1. Une première phase entre 1 h à 3 h avant le coucher du soleil et 3 h à 5 h après le coucher du soleil, où les taux de rafraîchissement et la température d'air diffèrent selon les LCZ.
2. Une seconde phase de 3 h à 5 h après le coucher du soleil jusqu'au lever du soleil, où les taux de rafraîchissement sont proches pour toutes les LCZ et où les écarts de température entre LCZ restent stables.

Holmer propose un cadre théorique expliquant cette évolution des températures en deux phases. Selon lui, le changement de la structure verticale de la CLU environ 3 h après le coucher du soleil est en grande partie responsable du rafraîchissement nocturne en deux phases. Lors de la phase 1, le rafraîchissement des différentes zones urbaines est déterminé par leurs caractéristiques individuelles à l'échelle microclimatique voire locale. Les zones présentant un horizon dégagé et dépourvues d'éléments de rugosité

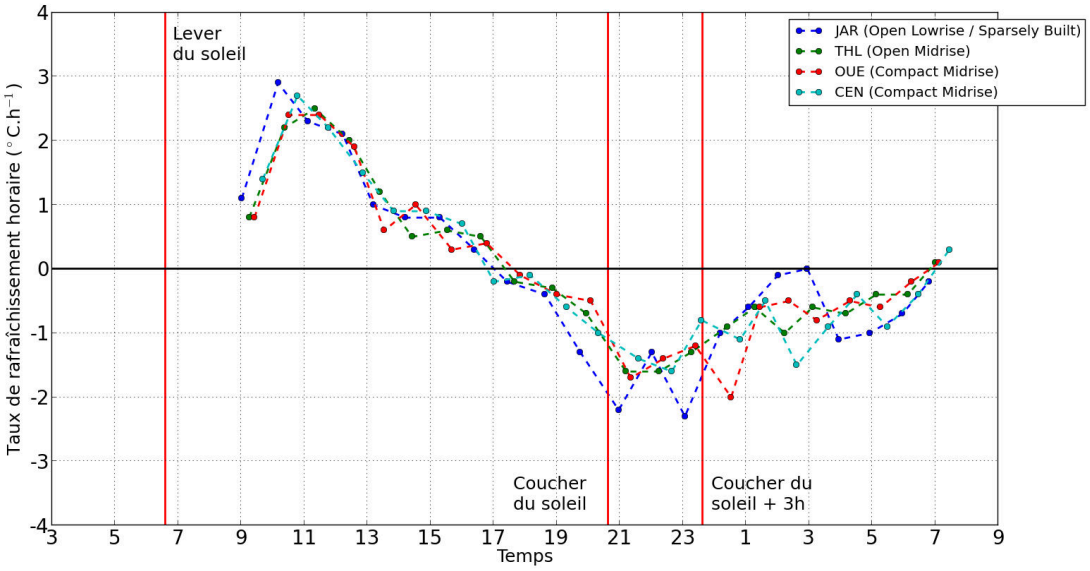
vont présenter un flux radiatif GLO ascendant ainsi qu'un flux de chaleur sensible ascendant important. En effet, les valeurs élevées de SVF favorisent le flux radiatif GLO ascendant et l'absence d'élément de rugosité entraîne un flux de chaleur sensible ascendant important. De plus, dans le cas où ces zones sont perméables et sèches, l'émissivité des matériaux sera probablement plus faible que celle des matériaux urbains. À l'inverse, les zones densément bâties présentant des rues canyon démontrent un flux radiatif GLO ascendant plus faible – du fait notamment de leur faible SVF – et un faible flux de chaleur sensible ascendant – du fait de la présence d'éléments de rugosité. En outre, les matériaux présents dans ces zones restituent une grande quantité de chaleur du fait de leur forte émissivité. Vers la fin de la première phase, les zones dégagées ont restitué plus de chaleur que les zones densément bâties, causant ainsi des écarts de température entre les zones.

Lors de la phase 2, le rafraîchissement de l'ensemble des zones est indépendant des caractéristiques urbaines de celles-ci. Durant cette phase et en présence de vitesses de vent faibles, la CLA est très stable et un phénomène d'inversion de température se développe. Dans ce cas, la structure verticale de la CLA contrôle le rafraîchissement de l'ensemble des zones. Ce sont les propriétés radiatives des masses d'air situées au dessus de la canopée urbaine qui déterminent le rafraîchissement de la couche limite de canopée urbaine. En effet, la présence de masses d'air relativement chaudes en partie supérieure de la CLA limite à la fois les mouvements d'air ascendant en provenance de la surface et les échanges thermiques sous forme de flux radiatifs GLO. Dans cette configuration, la morphologie urbaine et les matériaux urbains jouent des rôles mineurs. Les zones se rafraîchissent au même rythme et les différences de température entre zones qui se sont développées pendant la phase 1 sont stables.

À partir de relevés expérimentaux effectués à Göteborg, Holmer calcule des taux de rafraîchissement pour plusieurs sites localisés au sein d'un périmètre restreint de 300 m, et associe les valeurs des taux de rafraîchissement aux caractéristiques du site de mesure à l'échelle microclimatique. L'approche adoptée pour la présente étude est similaire, mais est mise en pratique à une échelle spatiale supérieure. Les taux de rafraîchissement sont calculés à Nancy à partir des températures d'air $\overline{T_{air}}$ de chaque LCZ.



(a)



(b)

Figure 5.2 : *Taux de rafraîchissement à fréquence horaire dans quatre LCZ. Chaque point de la figure représente un taux de rafraîchissement calculé selon l'équation (5.2). En partant de la gauche, les trois lignes rouges verticales représentent respectivement l'heure de lever du soleil, l'heure du coucher du soleil, et 3 h après le coucher du soleil. (a) 2 août 2013. (b) 21 août 2013.*

Pour les deux sessions de mesure effectuées à fréquence horaire, le taux de rafraîchissement est calculé de la façon suivante :

$$\chi_{1\text{h}} = \frac{T_{air}(t + 1\text{h}) - T_{air}(t)}{1\text{h}} \tag{5.2}$$

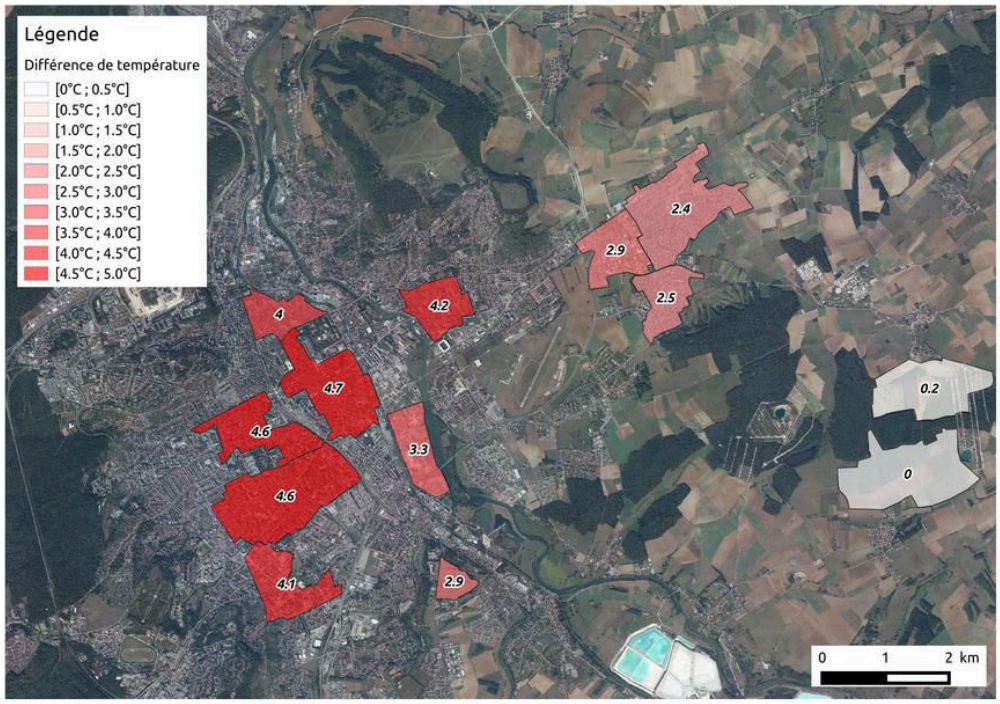
Ainsi, une valeur positive de $\chi_{1\text{h}}$ (resp. négatif) correspond à une hausse (resp. baisse) de la température de la LCZ.

Dans le cas du 2 août, l'augmentation de la température entre 7h et 17h se traduit par un taux de rafraîchissement positif sur cette période (figure 5.2(a)). Hormis deux points aberrants dans la LCZ JAR à 16h et 17h, les taux de rafraîchissement sont proches pour toutes les LCZ. À partir de 20h, le valeurs de $\chi_{1\text{h}}$ ne sont plus identiques. Entre 20h et minuit, le taux de rafraîchissement moyen pour JAR ($-1{,}7$°C.h^{-1}) est plus faible que pour les autres LCZ ($-0{,}9$°C.h^{-1} pour THL, -1°C.h^{-1} pour OUE, -1°C.h^{-1} pour CEN).

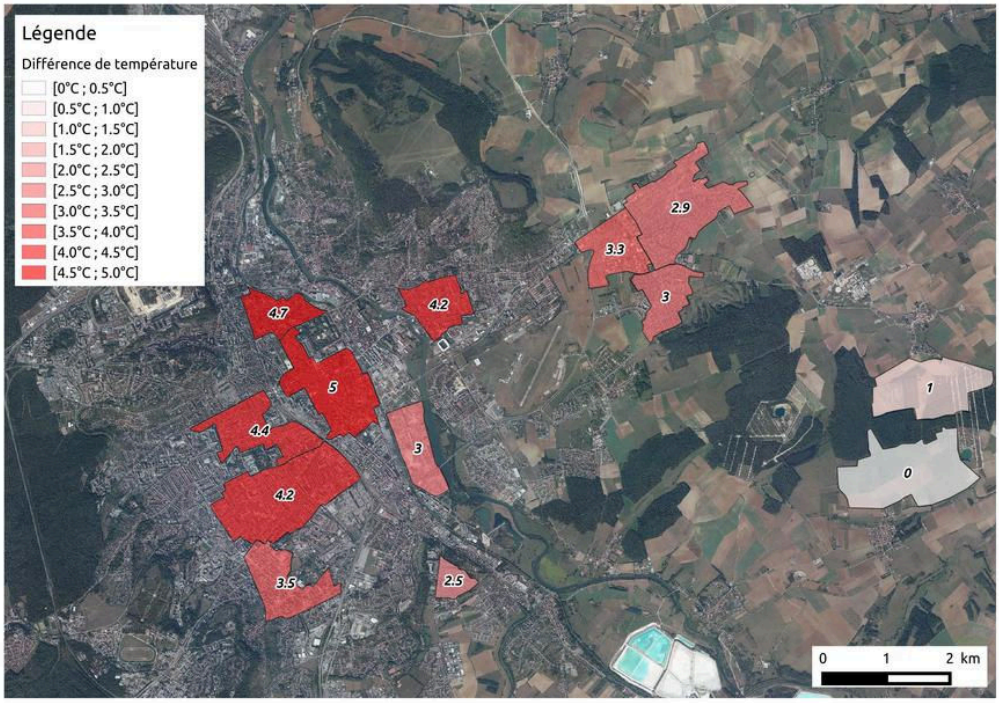
Les observations sont très similaires pour la session de mesure du 21 août (figure 5.2(b)). Tout comme le 2 août, les courbes de $\chi_{1\text{h}}$ sont positives entre 9h et 17h, et similaires pour toutes les LCZ sur cette période. Les taux de rafraîchissement commencent à diverger à partir de 20h. Entre 20h et minuit, le taux de rafraîchissement moyen pour JAR ($-1{,}8$°C.h^{-1}) est une nouvelle fois plus faible que pour les autres LCZ ($-1{,}3$°C.h^{-1} pour THL, $-1{,}2$°C.h^{-1} pour OUE, $-1{,}2$°C.h^{-1} pour CEN). Cette différence de taux de rafraîchissement conduit au maximum de température observé à minuit. Entre minuit et 8h, les valeurs de $\chi_{1\text{h}}$ sont à nouveau quasi similaires entre les différentes LCZ : $-0{,}6$°C.h^{-1} pour JAR, $-0{,}6$°C.h^{-1} pour THL, $-0{,}6$°C.h^{-1} pour OUE et $-0{,}7$°C.h^{-1} pour CEN.

Il s'avère que l'ensemble des observations de Holmer concordent avec celles effectuées à Nancy (table 5.1). Lors des deux phases, les ordres de grandeur des taux de rafraîchissement observées par Holmer sont cohérents avec ceux relevés à Nancy.

En outre, il est possible d'observer le rafraîchissement nocturne durant la phase 2 à partir des relevés effectués dans les treize LCZ. Pour cela, il s'agit de comparer les valeurs de $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ obtenues environ entre 3h30 et 5h30 après le coucher du soleil d'une part (Milieu de nuit), et celles obtenues environ entre 7 h et 9 h après le coucher du soleil d'une part (Fin de nuit), et ce pour des mesures réalisées dans des conditions de vitesse de vent et de nébulosité similaires (figure 5.3). Les résultats indiquent que



(a)



(b)

Figure 5.3 : *Différence de température d'air moyenne entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ en fonction de l'heure de mesure. Les écarts sont exprimés à partir des LCZ de type Low plants $\Delta T_{air,LCZ\ X-D}$. (a) Milieu de nuit (Nébulosité 0 octas, Vitesse moyenne du vent = 1,2 m.s^{-1}, 9 juillet et 15 août). (b) Fin de nuit (Nébulosité 0 octas, Vitesse moyenne du vent = 0,8 m.s^{-1}, 5 septembre et 6 septembre).*

	Phase 1	Phase 2
Esplanade dégagée (Göteborg)	$-1{,}6°C.h^{-1}$	$-0{,}6°C.h^{-1}$
Canyon urbaine (Göteborg)	$-1{,}2°C.h^{-1}$	$-0{,}6°C.h^{-1}$
Open lowrise / Sparsely built (JAR, Nancy)	$-1{,}8°C.h^{-1}$	$-0{,}6°C.h^{-1}$
Compact midrise et Open midrise (CEN, OUE, THL, Nancy)	$-1{,}2°C.h^{-1}$	$-0{,}6°C.h^{-1}$

Table 5.1 : *Taux de rafraîchissement calculés à Göteborg et Nancy. Les données pour Göteborg correspondent aux mois d'août et septembre 1999, et les données pour Nancy correspondent aux 21 août 2013. Pour les deux villes, les valeurs sont calculées entre 1 h avant le coucher du soleil et 2 h après le coucher du soleil pour la phase 1, et entre 3 h après le coucher du soleil et 10 h après le coucher du soleil pour la phase 2.*

pour les deux périodes de mesure considérées, les ordres de grandeur des différences de température entre les LCZ sont conservés. Ainsi, le rafraîchissement des LCZ semble relativement uniforme à partir d'environ 3 h après le coucher du soleil jusqu'à la fin de la nuit, et ce quelque soit le type de LCZ considéré.

5.2.2 Taux de rafraîchissement journalier normalisé

Le cycle journalier des différences de température entre LCZ indique que celles-ci sont très faibles en fin d'après midi tandis qu'elles sont très importantes entre 3 et 5 h après le coucher du soleil. Entre ces deux instants, les LCZ démontrent des taux de rafraîchissement différents, conduisant à des écarts de température entre LCZ.

En se basant sur l'hypothèse énoncée dans le paragraphe précédent, les taux de rafraîchissement de l'ensemble des LCZ étudiées sont calculés pendant la phase 1. L'étude dynamique de la température d'air à fréquence horaire n'ayant été menée que dans quatre LCZ uniquement, les taux de rafraîchissement sont calculés à partir des relevés effectués en période diurne et en période nocturne dans la totalité des treize LCZ.

Afin de calculer ces taux, six couples de sessions de mesure effectuées en 2013 sont identifiés. Il s'agit de sélectionner une session de mesure diurne suivie d'une session de mesure nocturne, toutes les deux démontrant une vitesse de vent faible ainsi qu'une nébulosité inférieure ou égale à 2 octas. La figure 5.4 permet de situer les sessions de mesure diurnes et nocturnes sur le cycle journalier théorique de température. Pour la session diurne, le recalage temporel est effectué en choisissant la température de

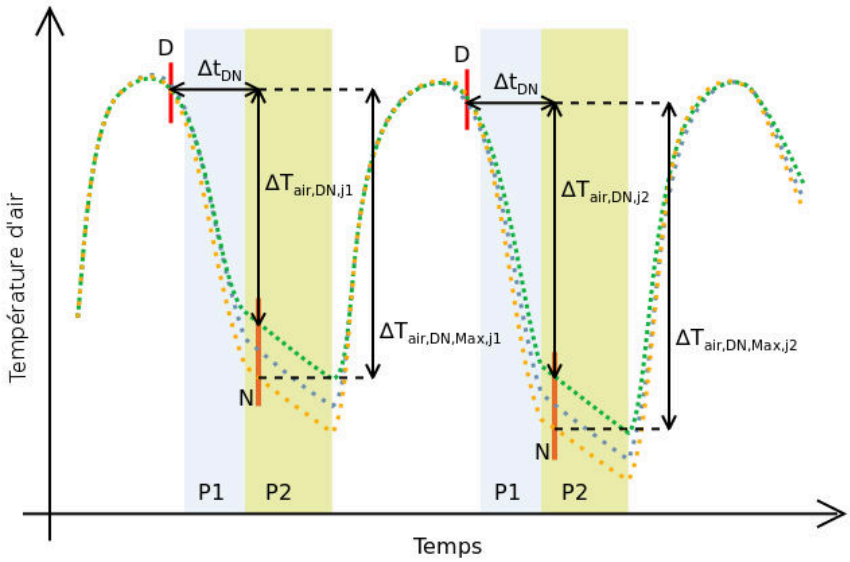


Figure 5.4 : *Illustration du calcul du taux de rafraîchissement normalisé à partir des mesures effectuées dans les treize LCZ en période diurne et nocturne. La lettre D correspond aux mesures diurnes, et la lettre N correspond aux mesures nocturnes. La partie bleue correspond à la durée de la phase 1 (P1), la partie verte correspond à la durée de la phase 2 (P2).*

fin de session comme température de référence. Les valeurs de température d'air $\overline{T_{air}}$ sont donc recalées par rapport à l'heure à laquelle la session de mesure se termine, soit entre 16h et 18h, ce qui correspond à la lettre D sur la figure 5.4. Concernant la session nocturne, c'est la température de début de session qui est choisie comme étant la température de référence. Ainsi, les températures sont recalées par rapport à l'heure de début de session, soit entre 0h et 1h, ce qui correspond à la lettre N sur la figure 5.4.

Les taux de rafraîchissement, notés χ_{DN}, sont ensuite calculés entre les deux sessions de la façon suivante :

$$\chi_{DN} = \frac{\Delta\overline{T_{air,DN}}}{\Delta t_{DN}} \tag{5.3}$$

Avec Δt_{DN} le temps séparant la session de mesure diurne et la session de mesure nocturne, exprimé en heures. Le terme $\Delta\overline{T_{air,DN}}$ est défini comme :

$$\Delta\overline{T_{air,DN}} = \overline{T_{air,D}} - \overline{T_{air,N}} \tag{5.4}$$

Avec $\overline{T_{air,D}}$ (resp. $\overline{T_{air,N}}$) désignant la température d'air d'une LCZ donnée pour une session de mesure diurne (resp. nocturne).

Le taux de rafraîchissement d'une LCZ est une grandeur qui dépend de l'amplitude journalière de température d'air, or celle-ci varie d'un jour à l'autre. La figure 5.4 illustre

ce propos. L'amplitude journalière de température est plus faible pour le premier jour (j1) que pour le second jour (j2), de ce fait $\Delta\overline{T_{air,DN,j1}}$ est inférieur à $\Delta\overline{T_{air,DN,j2}}$ et par conséquent le taux de rafraîchissement des différentes LCZ est plus faible pour le premier jour que pour le second jour.

Pour comparer χ_{DN} sur plusieurs jours, il est impératif de proposer un indicateur qui s'affranchisse de cette dépendance à l'amplitude journalière de température. Ainsi, il est proposé ici de construire un taux de rafraîchissement normalisé, qui corresponde au rapport du taux de rafraîchissement sur l'écart de température $\Delta\overline{T_{air,DN}}$ maximal (noté $\Delta\overline{T_{air,DN,max}}$, figure 5.4). Ce taux de rafraîchissement normalisé, noté χ^n_{DN}, s'exprime de la façon suivante :

$$\chi^n_{DN} = \frac{\chi_{DN}}{\Delta\overline{T_{air,DN,max}}} = \frac{1}{\Delta\overline{T_{air,DN,max}}} \times \frac{\Delta\overline{T_{air,DN}}}{\Delta t_{DN}} \tag{5.5}$$

Afin que l'expression du taux de rafraîchissement normalisé soit valide, il est nécessaire que $\Delta\overline{T_{air,DN,max}}$ soit systématiquement observé pour la même LCZ. Dans le cas présent, cette condition est respectée, la LCZ CE3 de type Low plants présentant le taux de rafraîchissement normalisé le plus fort en valeur absolue pour chacun des six couples de mesure étudié.

Les valeurs absolues de χ^n_{DN} pour les six couples de mesure sélectionnés sont présentées figure 5.5 :

- Les LCZ du groupe Midrise présentent des valeurs de χ^n_{DN} les plus faibles en valeur absolue.
- Les LCZ du groupe Lowrise démontrent des taux de rafraîchissement normalisés légèrement plus élevés en valeur absolue que le groupe précédent.
- Les LCZ du groupe Plants affichent les taux de rafraîchissement normalisés les plus forts en valeur absolue.

En outre, l'organisation des taux de rafraîchissement normalisés est similaire pour les six couples de mesure. Les valeurs des taux de rafraîchissement normalisés augmentent à partir du type Compact midrise vers le type Low plants, excepté les 10-11 juillet et 15-16 août où le taux de rafraîchissement normalisé des LCZ de type Open midrise est plus élevé que celui des LCZ de type Compact midrise.

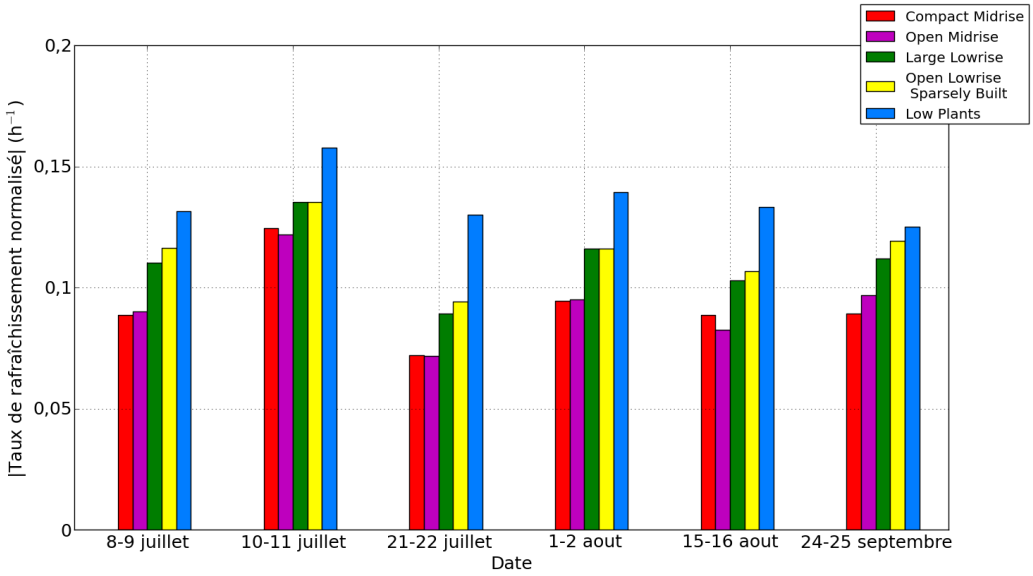


Figure 5.5 : *Valeur absolue des taux de rafraîchissement normalisés $|\chi^n_{DN}|$ des cinq types de LCZ étudiés pour six couples de sessions diurne et nocturne.*

5.3 Corrélation entre taux de rafraîchissement normalisé et indicateurs urbains

5.3.1 Approche statistique

Une étude statistique est effectuée via l'utilisation de régressions linéaires multiples faisant appel à la méthode dite des moindres carrés [Baillargeon, 2002]. Cette approche est mise en œuvre en deux temps. Dans un premier temps, une série de régressions est construite en considérant toutes les LCZ ensemble quelques soient leurs types. Dans ce cas, le taux de rafraîchissement normalisé est associé aux caractéristiques urbaines de l'ensemble des LCZ. Dans un second temps, les régressions sont construites en considérant indépendamment chaque type de LCZ. Ainsi, le taux de rafraîchissement normalisé est lié aux caractéristiques urbaines de chaque type de LCZ. Pour chacun des cinq types de LCZ étudiés, une régression linéaire est effectuée.

Les régressions linéaires sont réalisées sur 75% de l'échantillon de mesure. les 25% restant sont isolés pour valider expérimentalement les régressions obtenues, en comparant les valeurs de χ^n_{DN} issues des régressions et les valeurs de χ^n_{DN} issues de mesures expérimentales.

Méthode de régression statistique

La régression linéaire multiple permet d'exprimer une relation entre une variable dépendante (χ^n_{DN}) et un ensemble de variables indépendantes (les indicateurs urbains et la position relative des LCZ). Le modèle de régression linéaire à k variables s'exprime de la manière suivante [Baillargeon, 2002] :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + ... + \beta_k x_{i,k} + \xi_i \tag{5.6}$$

Avec y_i la variable dont les valeurs dépendent de celles des variables indépendantes $x_{i,1}, x_{i,2}...x_{i,k}$ et de la composante résiduelle ε_i. Cette dernière représente la fluctuation aléatoire attribuable aux facteurs et variables non pris en compte dans la régression linéaire, et les termes $\beta_0, \beta_1, \beta_2...\beta_k$ désignent les $(k+1)$ coefficients de la régression.

L'emploi de la régression linéaire nécessite de postuler que les sept indicateurs urbains calculés sont en mesure d'expliquer l'évolution des valeurs de χ^n_{DN}. Dans le cadre de cette étude statistique, la position relative des LCZ dans l'agglomération est intégrée aux régressions au même titre que les autres indicateurs urbains. Il est par ailleurs important de rappeler que la méthode de régression linéaire ne prouve pas une relation de causalité entre la variable dépendante et les variables indépendantes, mais bien une relation de corrélation.

Les performances globales de la régression linéaire ainsi que l'importance relative de chaque indicateur sur la valeur du taux de rafraîchissement normalisé calculée doivent pouvoir être évaluées par des estimateurs. Pour cette étude, deux estimateurs ont été sélectionnés :

Le critère AIC (Akaike Information Criteria) Il évalue la qualité générale de la régression, et est notamment utilisé pour comparer plusieurs régressions linéaires entre elles. Plus la valeur de AIC est faible, plus la qualité de la régression est élevée [Konishi et Kitagawa, 2008].

Le test de Student Il permet d'évaluer la contribution de chaque variable indépendante de la régression. Si la probabilité $(P > |t|)$ est inférieure au seuil de signification α' pour une variable indépendante donnée, alors cette dernière possède un effet significatif sur les variations de la variable dépendante pour le seuil α' [Baillargeon, 2002].

	β_1	P > | t |	β_0	P > | t |	AIC
SVF	0,1162	< 0,1	0,0228	< 0,1	-314,1
AR	-0,0431	< 0,1	0,1245	< 0,1	-297,3
H	-0,0029	< 0,1	0,1337	< 0,1	-308,9
R	-0,0118	< 0,1	0,1774	< 0,1	-312,6
Bati	-0,0011	< 0,1	0,1343	< 0,1	-300,8
Imper	-0,0006	< 0,1	0,1278	< 0,1	-285,9
Per	0,0005	< 0,1	0,0863	< 0,1	-295,8
Pos	0,0053	< 0,1	0,0866	< 0,1	-305,0

Table 5.2 : *Caractéristiques des régressions linéaires correspondant à la première étape, tous types de LCZ confondus. SVF : Facteur de Vue du Ciel, AR : Rapport d'aspect, H : Hauteur moyenne des bâtiments, R : Classe de rugosité, Bati : Fraction de surface bâtie, Imper : Fraction de surface imperméable, Per : Fraction de surface perméable, Pos : Position relative des LCZ dans l'agglomération.*

Dans le cadre de cette étude, la valeur seuil α' est choisie égale à 0,1. Si une variable indépendante vérifie $((P > |t|) < 0{,}1)$, alors elle est significative à plus de 90%.

L'approche itérative Forward ("en avançant") a été utilisée pour la construction des régressions linéaires multiples [Dattalo, 2013]. Elle s'organise de la façon suivante :

1. Une première série de régressions est d'abord réalisée avec chacune des variables indépendantes.
2. La variable indépendante vérifiant $((P > |t|) < 0{,}1)$ et démontrant la plus faible valeur d'AIC est ajoutée à l'équation.
3. Une seconde série de régressions est effectuée en combinant la variable indépendante sélectionnée précédemment avec chacune des variables indépendantes restantes.
4. La variable indépendante vérifiant $((P > |t|) < 0{,}1)$ et correspondant à la régression minimisant l'AIC est ajouté à l'équation.

Ce processus est répété jusqu'à obtenir la régression qui minimise la valeur de l'AIC, et dont l'ensemble des variables indépendantes vérifient $((P > |t|) < 0{,}1)$.

Les régressions linéaires multiples font appel à des variables indépendantes, c'est-à-dire des variables qui ne sont pas corrélées entre elles. Ainsi, les indicateurs urbains ajoutés à l'étape 3 de la méthodologie doivent être indépendants des autres indicateurs urbains déjà présents dans l'équation de la régression. Il est possible d'estimer les interdépendances entre les indicateurs urbains utilisés :

	β_2	P > |t|	β_1	P > |t|	β_0	P > |t|	AIC
SVF + Bati	0,0002	< 0,1	0,1391	< 0,1	0	-	-313,9
SVF + Imper	-0,0001	0,522	0,1092	< 0,1	0,031	< 0,1	-312,6
SVF + Per	0,0001	0,659	0,1080	< 0,1	0,0264	< 0,1	-312,3
SVF + Pos	0,0012	0,448	0,096	< 0,1	0,0329	< 0,1	-312,7

Table 5.3 : *Caractéristiques des régressions linéaires correspondant à la seconde étape, tous types de LCZ confondus.*

- Du fait de leur mode de calcul, il est probable que les indicateurs morphologiques soient corrélés entre eux.
- Les valeurs de deux indicateurs d'occupation du sol permettent de déduire la valeur du troisième indicateur d'occupation du sol.

En prenant en compte ces possibles dépendances, l'équation de la régression ne pourra intégrer au maximum un indicateur morphologique, et deux indicateurs d'occupation du sol.

5.3.2 Relation multi-LCZ

Les régressions linéaires sont construites en considérant l'ensemble des LCZ étudiées quelque soit leur type. L'objectif de cette partie est de savoir si les indicateurs urbains se suffisent à eux-même pour discriminer les LCZ. Dans ce cas de figure, une seule régression est réalisée pour l'ensemble des treize LCZ.

Pour la construction des régressions lors de la première étape, l'équation suivante est utilisée :

$$\chi^n_{DN} = \beta_0 + \beta_1 IND_1 + \xi_i \tag{5.7}$$

Les résultats de cette première étape indiquent que l'ensemble des coefficients des huit régressions vérifient la condition $((P > |t|) < 0,1)$ (table 5.2). La régression entre le taux de rafraîchissement normalisé et le SVF présente la valeur de l'AIC la plus faible, c'est donc cet indicateur urbain qui est sélectionné pour la seconde étape. Le SVF étant un indicateur morphologique, seuls les indicateurs d'occupation du sol et la position relative des LCZ sont considérés lors de l'étape suivante. Celle-ci consiste à ajouter un second indicateur, afin d'aboutir à une expression de la forme :

$$\chi^n_{DN} = \beta_0 + \beta_1 SVF + \beta_2 IND_2 + \xi_i \tag{5.8}$$

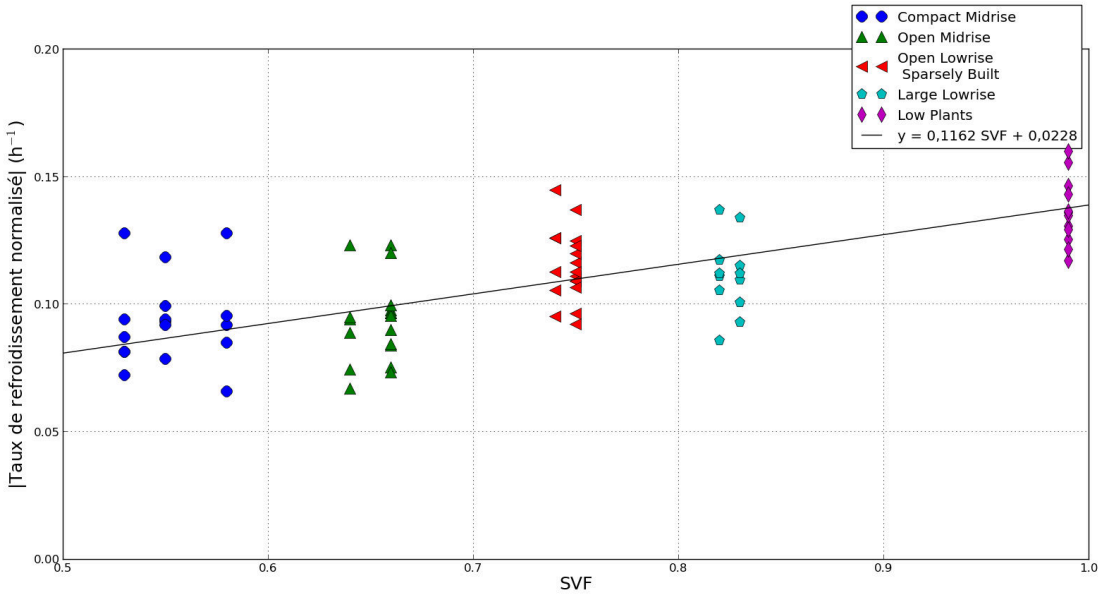


Figure 5.6 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction du SVF.*

Pour cette seconde étape, seules une régression (SVF + Bati) vérifient la condition $((P > |t|) < 0,1)$ (table 5.3). Or cette régression n'abaisse pas la valeur d'AIC par rapport à l'étape précédente. Le processus de construction d'une régression linéaire multiple s'achève, la relation conservée est :

$$\chi_{DN}^{n} = \beta_0 + \beta_1 SVF \tag{5.9}$$

Avec β_0 = 0,0228 et β_1 = 0,1162.

Les taux de rafraîchissement normalisés sont tracés en fonction des huit indicateurs urbains utilisés (figure 5.6 à 5.13). Les droites correspondant aux régressions de la première étape sont présentes sur chacune des figures.

L'ensemble de ces figures indiquent que seul le SVF permet bien de discriminer les types de LCZ entre eux. Pour cet indicateur urbain, les types de LCZ – correspondant à un groupe de points d'une couleur spécifique sur la figure 5.6 – s'avère être clairement distincts les uns des autres.

Par ailleurs, le SVF met en évidence le regroupement des types de LCZ selon trois groupes (figure 5.14) :

– Le groupe Midrise présente des valeurs de SVF inférieures à 0,7. Les LCZ de ce groupe sont également celles qui possèdent un taux de rafraîchissement normalisé le plus bas en valeur absolue (0,09 h^{-1} en moyenne).

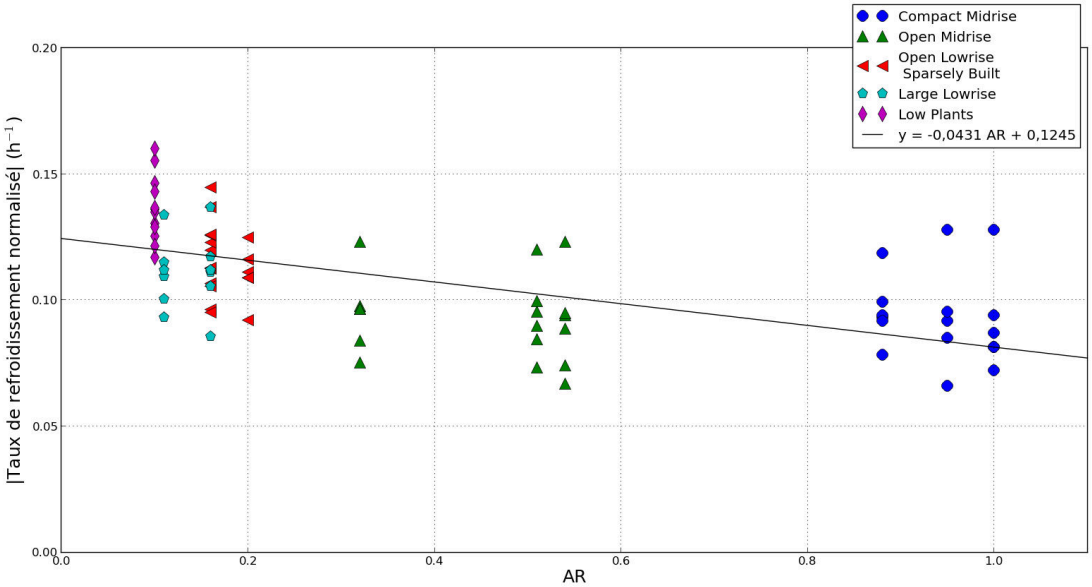


Figure 5.7 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction du rapport d'aspect.*

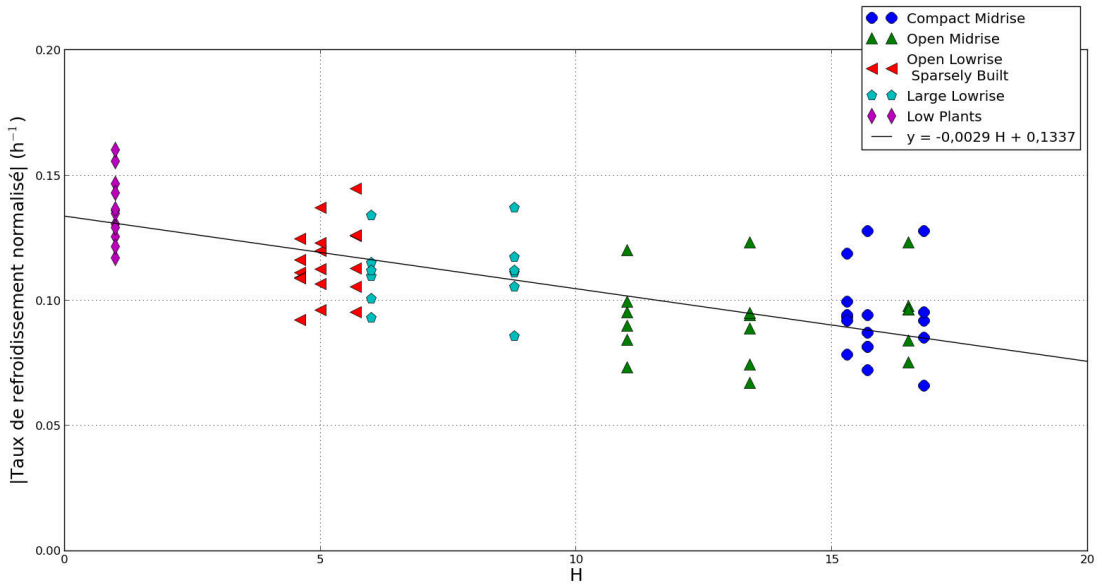


Figure 5.8 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la hauteur moyenne des bâtiments.*

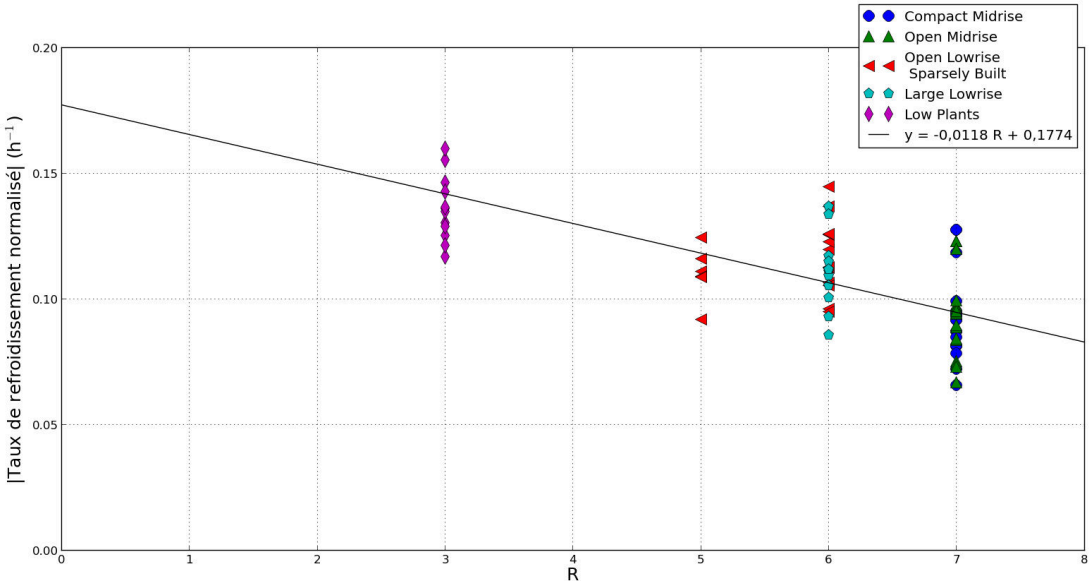


Figure 5.9 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la rugosité.*

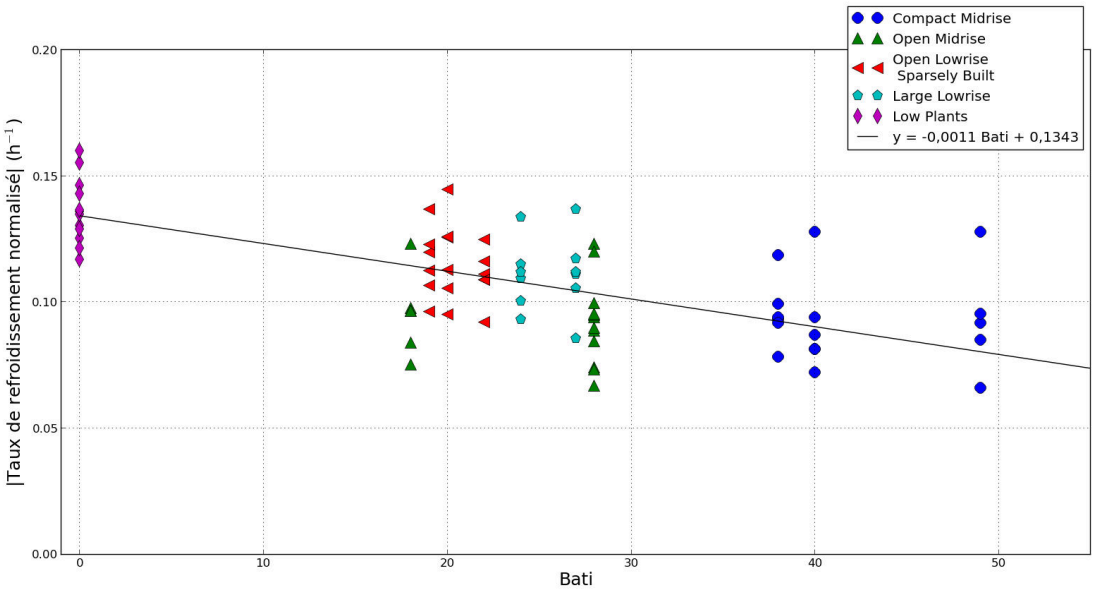


Figure 5.10 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la fraction de surface bâtie.*

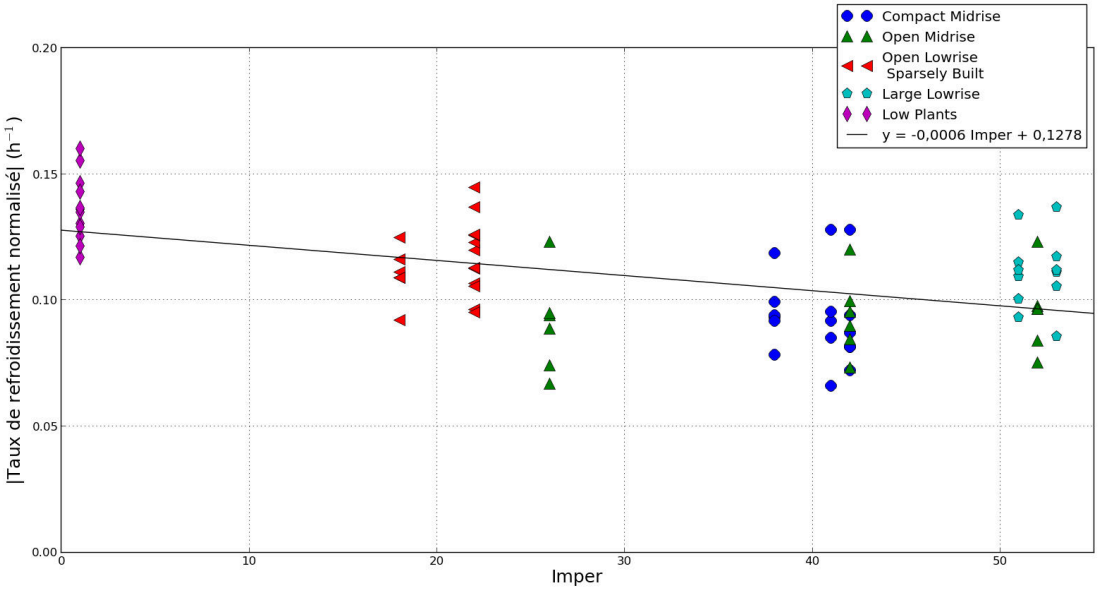


Figure 5.11 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la fraction de surface imperméable.*

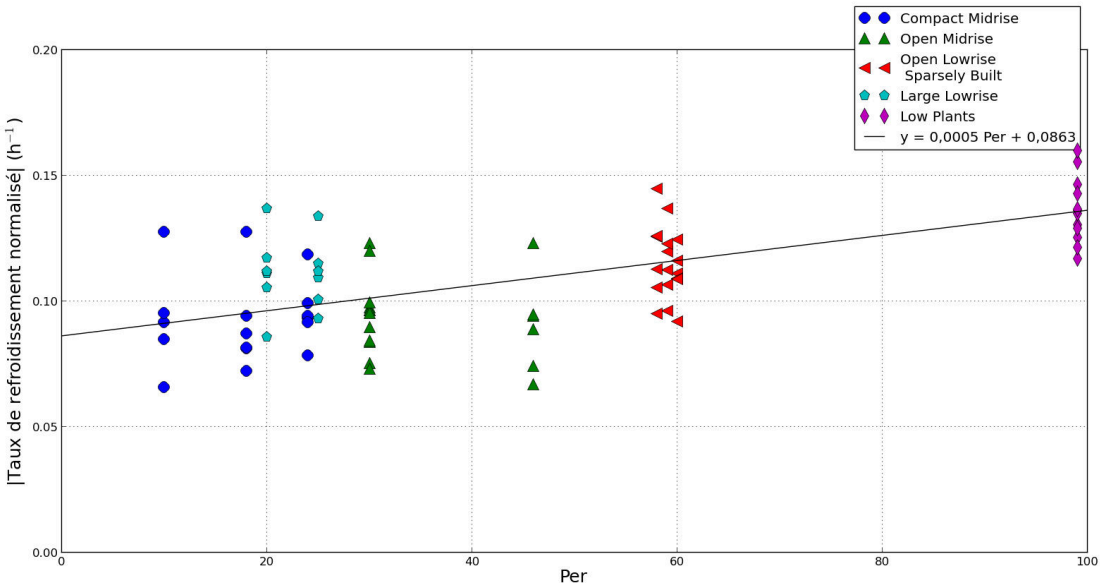


Figure 5.12 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la fraction de surface perméable.*

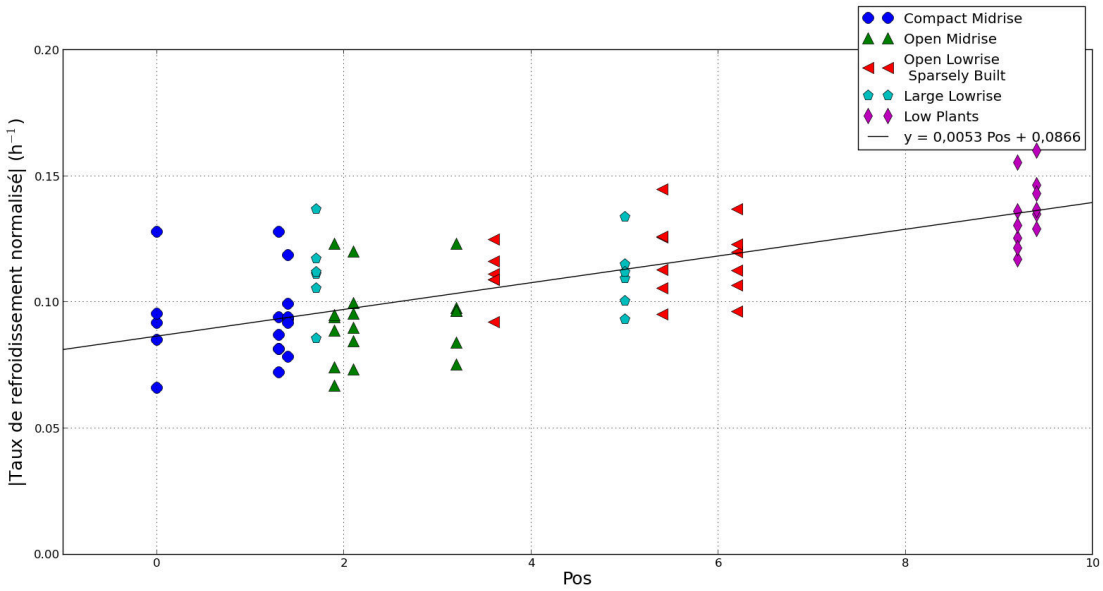


Figure 5.13 : *Représentation des taux de rafraîchissement normalisés observés en fonction de la position relative des LCZ.*

- Le groupe Lowrise affiche des valeurs de SVF compris entre 0,7 et 0,85. Les valeurs de χ^n_{DN} (0,11 h^{-1} en moyenne) sont plus élevées en valeur absolue que pour le groupe Midrise.
- Les taux de rafraîchissement normalisés les plus élevés en valeur absolue sont observés pour les LCZ du groupe Plants (0,14 h^{-1} en moyenne), qui possèdent un SVF proche de 1.

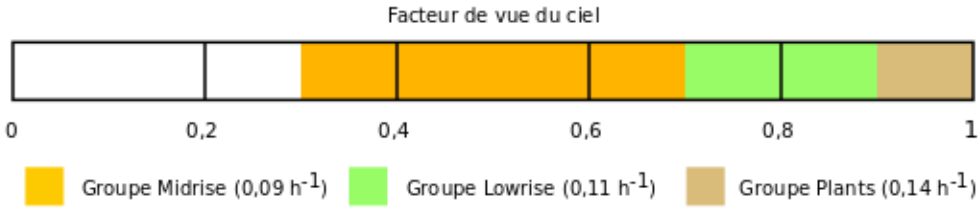


Figure 5.14 : *Intervalles de valeurs de SVF associés aux groupes Midrise, Lowrise et Plants. Les valeurs moyennes de χ^n_{DN} pour chaque groupe sont indiquées entre parenthèses.*

En règle générale, les tendances observées concernant la relation entre le taux de rafraîchissement normalisé d'une part, et chacun des huit indicateurs étudiés d'autre part, sont vraisemblables. La table 5.4 présente les variations que les indicateurs urbains doivent connaître afin d'obtenir une augmentation de χ^n_{DN} de 0,01 h^{-1}. À titre d'exemple, pour obtenir ce gain en matière de rafraîchissement, la hauteur

	SVF (-)	AR (-)	H (m)	R (-)	Bati (%)	Imper (%)	Per (%)	Pos (km)
Variation	+0,09	−0,23	−3,4	−1	−9	−17	+20	+1,9

Table 5.4 : *Variation de la valeur des indicateurs urbains aboutissant à une augmentation du taux de rafraîchissement normalisé de 0,01 h^{-1}.*

moyenne des bâtiments doit diminuer d'un peu plus de trois mètres, ce qui correspond approximativement à la hauteur d'un étage pour un immeuble.

Parmi l'ensemble des indicateurs étudiés, le cas de la rugosité est singulier (figure 5.9). En effet, toutes les LCZ du groupe Midrise ont une classe de rugosité de 7, toutes les LCZ du groupe Lowrise ont une classe de rugosité de 6 (hormis JAR qui possède une classe de rugosité de 5) et les LCZ du groupe Plants ont une rugosité de 3.

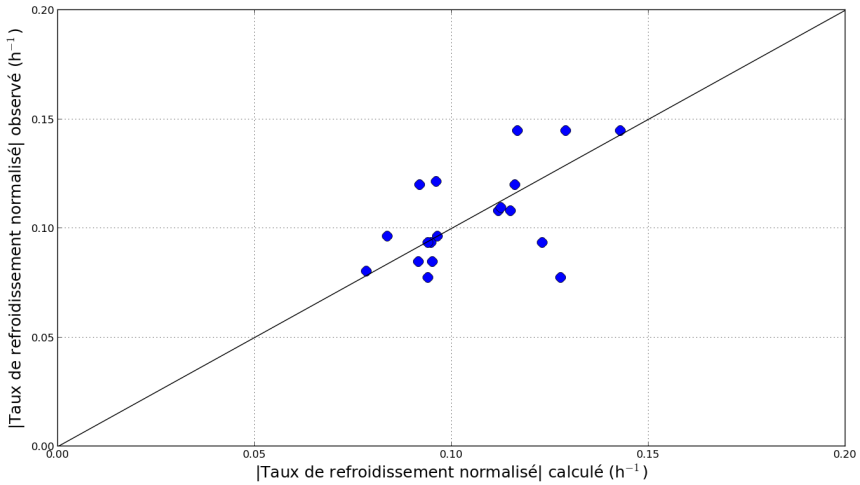


Figure 5.15 : *Taux de rafraîchissement normalisés mesurés en fonction des taux de rafraîchissement normalisés calculés.*

La figure 5.15 compare les valeurs de taux de rafraîchissement normalisé calculées via l'équation 5.9 et les valeurs de taux de rafraîchissement normalisé issus des mesures expérimentales. Une partie des points représentés sont éloignés de la première bissectrice, ce qui signifie que la régression linéaire ne représente pas fidèlement tous les cas de taux de rafraîchissement normalisé. L'erreur quadratique moyenne (notée RMSE) entre les valeurs modélisées d'une part, et les valeurs observées d'autre part, est de 0,019.

Les résultats présentés dépendent de la nature de l'échantillon de 75% à partir duquel les régressions sont réalisées. En choisissant aléatoirement un autre échantillon, la nature des régressions sera changée ainsi que leur performances. A titre d'exemple,

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
AIC	-314,1	-310,6	-301,4	-310,3	-306,9	-304,4	-300,5	-307,9	-309,7
RMSE	0,019	0,018	0,014	0,018	0,016	0,015	0,013	0,017	0,018

Table 5.5 : *Comparaison du AIC et du RMSE pour les régressions obtenues à partir de huit autres échantillons aléatoires.*

la table 5.5 présente les valeurs de l'AIC et du RMSE pour huit autres échantillons aléatoires. L'AIC (resp. le RMSE) varie entre -300,5 et -314,1 (resp. entre 0,013 et 0,019). Ainsi, les performances de la régression obtenue semblent relativement répétables quelque soit l'échantillon de 75% sélectionné pour leur construction.

5.3.3 Relation par type de LCZ

Les régressions linéaires ont été effectuées en considérant chaque type de LCZ de façon individuelle, afin de savoir si le fait de considérer le type des LCZ permet d'aboutir à de meilleurs résultats que l'approche tous types de LCZ confondus. Cette méthode doit aboutir sur un ensemble de cinq équations exprimant χ^n en fonction d'une combinaison linéaire d'indicateurs.

La première étape de cette approche consiste à réaliser cinq régressions linéaires pour chacun des huit indicateurs urbains étudiés. L'équation correspondant à ces régressions s'exprime de la manière suivante :

$$\chi^n_{DN} = \beta_0 + \beta_1 IND_1 + \xi_i \tag{5.10}$$

Avec β_0 et β_1 les coefficients de corrélation et IND_1 l'indicateur considéré.

La table 5.6 présente les résultats issus de cette première étape. Aucune régression ne réalise la condition $((P > |t|) < 0{,}1)$ à la fois pour β_0 ou β_1. Ainsi, du fait de la valeur seuil sélectionné pour le test de Student dans le cadre de cette étude, aucune régression ne peut être construite en considérant les LCZ types par types.

5.4 Discussion

L'ensemble des régressions se basent sur les mesures mobiles réalisées pendant les périodes diurnes et nocturnes. Seuls six couples de mesure ont été sélectionnés, représentant au total 77 taux de rafraîchissement normalisés. Or la construction des régressions repose sur seulement 75% de cet échantillon, soit 58 valeurs de taux de

	type de LCZ	β_1	P > |t|	β_0	P > |t|	AIC
SVF	Compact midrise	-0,1737	0,459	0,1885	0,160	-67,36
	Open midrise	0,5568	0,3	-0,2732	0,434	-74,59
	Large lowrise	0,5020	0,67	-0,3068	0,752	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	-0,2677	0,756	0,3146	0,625	-80,82
	Low plants	0	-	0,1398	< 0,1	-52,45
AR	Compact midrise	-0,0768	0,432	0,1655	< 0,1	-67,45
	Open midrise	-0,0296	0,523	0,1053	< 0,1	-73,78
	Large lowrise	-0,1004	0,67	0,1209	< 0,1	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	-0,1661	0,435	0,1437	< 0,1	-81,43
	Low plants	0	-	1,3845	< 0,1	-52,45
H	Compact midrise	-0,0103	0,183	0,2561	< 0,1	-68,88
	Open midrise	0,0003	0,865	0,0877	< 0,1	-73,31
	Large lowrise	-0,0018	0,67	0,1206	< 0,1	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	0,0049	0,583	0,0901	< 0,1	-81,06
	Low plants	0	-	0,1385	< 0,1	-52,45
R	Compact midrise	0	-	0,0132	< 0,1	-68,69
	Open midrise	0	-	0,0131	< 0,1	-75,28
	Large lowrise	0	-	0,0179	< 0,1	-43,63
	Open lowrise Sparsely built	0,0066	0,435	0,0773	0,124	-81,43
	Low plants	0	-	0,0462	< 0,1	-52,45
Bati	Compact midrise	-0,0013	0,2	0,1479	< 0,1	-68,72
	Open midrise	-0,0005	0,591	0,1043	< 0,1	-73,63
	Large lowrise	-0,0017	0,67	0,15	0,168	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	-0,0025	0,444	0,1650	< 0,1	-81,41
	Low plants	-	-	-	-	
Imper	Compact midrise	-0,0028	0,326	0,2057	< 0,1	-67,88
	Open midrise	0,0005	0,323	0,0726	< 0,1	-74,47
	Large lowrise	-0,0025	0,67	0,2378	0,446	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	0,0017	0,435	0,0806	< 0,1	-81,43
	Low plants	0	-	0,1385	< 0,1	-52,45
Per	Compact midrise	0,0012	0,163	0,072	< 0,1	-69,09
	Open midrise	-0,0007	0,3	0,1152	< 0,1	-74,59
	Large lowrise	0,001	0,67	0,0847	0,147	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	-0,0031	0,529	0,2982	0,312	-81,18
	Low plants	0	-	0,0014	< 0,1	-52,45
Pos	Compact midrise	0,0092	0,228	0,0841	< 0,1	-68,49
	Open midrise	0,0052	0,514	0,0793	< 0,1	-73,8
	Large lowrise	0,0015	0,67	0,1022	< 0,1	-41,89
	Open lowrise Sparsely built	0,0028	0,441	0,1005	< 0,1	-81,41
	Low plants	0,0244	0,595	-0,0884	0,834	-50,84

Table 5.6 : *Caractéristiques des régressions linéaires correspondant à la première étape. Les types de LCZ sont considérés individuellement.*

rafraîchissement normalisé. Cet échantillon restreint est une limite importante à l'étude menée dans ce chapitre. En outre, il est possible qu'un échantillon plus large permettent de construire une régression linéaire multiple incluant plusieurs indicateurs urbains.

Il est indispensable de rappeler que les mesures mobiles sont réalisées uniquement dans les rues et sur les routes de LCZ. Or, la température de la rue n'est peut être pas représentative de la température globale de canopée urbaine de la LCZ étudiée. Du fait de cette méthode de mesure, il est possible de questionner les méthodes de calcul de certains indicateurs urbains. À titre d'exemple, le SVF est calculé dans cette étude sur toute la surface d'une LCZ. Cette méthode prend notamment en compte les cœurs d'îlot, auxquels le véhicule n'a pas accès. Le calcul du SVF uniquement sur le segment de route parcouru par le véhicule pourrait être en mesure d'aboutir à de meilleures régressions, du fait que la température d'air est mesurée dans la rue.

5.5 Conclusion

Les précédents chapitres ont établi la possibilité d'étudier en détail le comportement thermique des LCZ sur la base de mesures embarquées. Ce chapitre s'intéresse au rafraîchissement se produisant entre le milieu d'après midi et la fin de nuit, car cette période correspond à la formation et à l'établissement de l'îlot de chaleur urbain.

L'analyse du cycle journalier de température d'air dans les LCZ a été approfondie via l'étude du taux de rafraîchissement. Les valeurs obtenues à Nancy ont été comparée avec celles correspondant à la ville de Göteborg. Cette comparaison a permis d'introduire l'hypothèse d'un refroidissement urbain en deux phases successives. Pendant une première phase correspondant à une période comprise entre environ 2 h avant le coucher du soleil et 3 h après le coucher du soleil, les taux de refroidissement sont variables selon les LCZ, et dépendent des caractéristiques urbaines de celles-ci. Puis pendant une seconde phase, les taux de refroidissement sont quasi identiques pour toutes les LCZ, quelque soit leur type. L'apparition de la seconde phase – environ 3 à 5 h après le coucher du soleil – serait causée par une modification de la structure verticale de la CLA au dessus de l'agglomération.

La suite de l'étude s'est concentrée sur la première phase, qui correspond à la période d'établissement des écarts de température entre LCZ. Un indicateur climatique spécifique à cette phase – la taux de rafraîchissement normalisé – a été proposé. Celui-ci

a été construit afin de permettre la comparaison sur plusieurs jours du rafraîchissement des différentes LCZ. Il a notamment pour but de fournir une information sur la dynamique de formation de l'îlot de chaleur urbain qui soit intelligible par les aménageurs.

Par la suite, la relation entre taux de rafraîchissement normalisé et indicateurs est étudié sous l'angle statistique via la réalisation de régressions linéaires. Une première série de régressions a été effectuée en considérant l'ensemble des LCZ indépendamment de leur type. La régression incluant le SVF comme unique variable indépendante est celle qui obtient les meilleurs résultats selon les critères choisis pour cette étude. Les régressions linéaires obtenues présentent les tendances générales du lien existant entre le taux de rafraîchissement normalisé d'une part, et chacun des huit indicateurs étudiés d'autre part. Par ailleurs, le fait de considérer chaque type de LCZ indépendamment les uns des autres pour la réalisation de régressions linéaires ne permet pas d'aboutir à de meilleurs résultats.

Conclusion générale

Synthèse

La prise en compte des phénomènes climatiques est aujourd'hui nécessaire dans le contexte de conception durable de l'espace urbain. Ce travail de thèse s'intéresse à la caractérisation de l'îlot de chaleur urbain dans la perspective de proposer des outils et méthodes utilisables par les aménageurs. La méthodologie principale développée dans le cadre de cette recherche consiste à associer une méthode de zonage climatique – la classification climatique Local Climate Zone – à des mesures mobiles pour analyser l'espace urbain à différentes échelles de façon structurée.

L'étude a débuté par l'utilisation de la classification LCZ dans l'agglomération de Nancy. Une méthodologie de construction des LCZ a été élaborée sur la base des recommandations formulées par Oke et Stewart. À partir de données urbaines relatives à cette zone, une cartographie préliminaire des Local Climate Zone a été réalisée sur la majorité de l'agglomération, aboutissant à la construction de 82 LCZ urbanisées réparties en onze types différents. Treize LCZ ont été identifiées pour l'étude. Pour l'ensemble de ces zones, sept des dix indicateurs urbains de la classification LCZ ont ensuite été calculés. Le calcul des indicateurs urbains a permis de trouver les meilleures concordances possibles entre les fragments urbains étudiés et les types de LCZ. Dans chaque LCZ, deux sites de contrôle ont pu être déterminés. Les indicateurs urbains calculés à proximité de ces sites indiquent que ceux-ci sont représentatifs de leur LCZ respective du point de vue de leur morphologie urbaine et de leur occupation du sol.

Après avoir construit les LCZ à l'aide de leurs caractéristiques urbaines, l'étape suivante a consisté à analyser le comportement thermique de chaque LCZ individuellement. Durant cette phase, l'objectif était de vérifier si une zone homogène du point

de vue des caractéristiques urbaines à l'échelle locale montrait aussi un comportement thermique spatialement homogène. Dans cet optique, trois critères ont été étudiés :

L'amplitude de température Cette grandeur permet d'avoir un aperçu de la distribution spatiale de la température d'air dans une LCZ. À l'issue de cette analyse, les LCZ ont été considérées comme étant homogènes en période nocturne.

Les singularités thermiques des LCZ Leur observation a mis en évidence la présence de points chauds et froids systématiques dans la majorité des LCZ. Les causes de ces singularités sont nombreuses, et diffèrent selon la période concernée.

La température d'air des sites de contrôle Elle indique que si un site est choisi comme étant représentatif de la LCZ en termes d'indicateurs, il sera probablement représentatif du point de vue de la température d'air.

L'étude montre que les LCZ sont des zones relativement homogènes du point de vue thermique, ayant un comportement climatique propre, particulièrement en période nocturne. À partir de cette observation, il est possible de considérer que :

- La moyenne spatiale des relevés de température d'air dans une LCZ est représentative du comportement thermique de l'ensemble de cette LCZ
- Les comportements thermiques des LCZ peuvent être comparés entre eux

Cette association du découpage LCZ et des mesures mobiles a ensuite été utilisée afin de caractériser l'îlot de chaleur urbain à Nancy. Les moyennes spatiales de température d'air de treize LCZ ont d'abord été analysées, notamment dans le but de comparer les comportements thermiques des LCZ entre eux. Si les différences de température d'air entre LCZ sont réduites en période diurne, elles sont significatives en période nocturne. Sur les cinq types de LCZ étudiés, trois groupes se distinguent du point de vue thermique. Une étude dynamique de la température d'air dans un nombre réduit de LCZ a également été menée. Si les températures d'air des LCZ sont proches durant la matinée et la majeure partie de l'après midi, elles divergent peu avant le coucher du soleil. Les résultats obtenus démontrent le fort potentiel de la classification LCZ couplée aux mesures mobiles dans le contexte de diagnostic climatique du milieu urbain, de l'échelle de l'agglomération à l'échelle de la rue.

Enfin, la réflexion autour de la dynamique nocturne des LCZ a été poursuivie sur la base des relevés expérimentaux effectués dans les treize LCZ. Ceux-ci indiquent que

le profil temporel de température d'air des LCZ connaît un refroidissement nocturne en deux phases. C'est durant la première phase que les LCZ se refroidissent à des rythmes différents, que les écarts de température s'amplifient et que l'îlot de chaleur urbain se forme. Un indicateur climatique – le taux de rafraîchissement normalisé – a été proposé pour discriminer les types de LCZ entre eux d'un point de vue objectif. Ce point a été approfondi par la réalisation de régressions linéaires entre ce taux de rafraîchissement normalisé et les indicateurs urbains. Cette étape correspond à un cadre méthodologique pour réaliser un modèle empirique entre indicateur climatique et urbains. Ce type d'approche "simplifiée" peut servir de base à un outil opérationnel permet d'éviter le recours à une physique complexe ainsi qu'à des moyens de calcul numérique importants.

Réflexions et perspectives

Détermination des indicateurs urbains

Dans le processus de construction des LCZ, les indicateurs urbains jouent un rôle central. De ce fait, la disponibilité de ceux-ci doit être questionnée. Dans le cas de Nancy, seules les informations concernant la hauteur des bâtiments et la fraction de surface bâtie étaient accessibles. Si les indicateurs urbains ne sont pas disponibles tels quels, il faut pouvoir avoir les moyens de la calculer ou de les estimer. Pour cela, il est nécessaire de s'interroger sur deux points :

- Les données nécessaires à la réalisation de ces calculs sont-elles disponibles ? À titre d'exemple, le calcul du SVF à Nancy a été facilité grâce à la mise à disposition du MNE de l'agglomération du Grand Nancy.
- Quelles méthodes sont à privilégier pour le calcul des indicateurs urbains ? Pour ce point, l'existence d'algorithmes dédiés facilite grandement la détermination des indicateurs urbains (cas du SVF).

Ces deux questions sont fondamentales, car les résultats présentés dans cette thèse – notamment l'étude des relations entre rafraîchissement et indicateurs urbains – dépendent des valeurs des indicateurs urbains, et donc de la précision et de l'incertitude associées à leur méthodologie de calcul.

Dans cette thèse, trois indicateurs urbains sur les dix que compte la classification LCZ n'ont pas été calculés. L'une des perspectives de ce travail est le calcul de

l'ensemble des dix indicateurs urbains sur tout le territoire de Nancy, notamment afin de d'analyser leur lien vis-à-vis du comportement thermique des LCZ. En outre, il est également possible d'améliorer les méthodes utilisées dans cette recherche. À titre d'exemple, les indicateurs d'occupation du sol doivent pouvoir être déterminées précisément et rapidement via un traitement informatique sur différentes images aériennes dans le domaine du visible et dans le domaine de l'infrarouge proche.

Méthode de construction des LCZ

En parallèle de la problématique de la disponibilité des indicateurs urbains, la question de la méthode de cartographie des LCZ se pose. Dans cette thèse, l'estimation des contours des LCZ s'est faite visuellement sans utiliser d'algorithme. Or, il serait possible de déterminer les LCZ automatiquement via l'utilisation d'algorithmes SIG, comme le suggère certains auteurs ([Bechtel et Daneke, 2012]). La détermination automatique des LCZ semble nécessaire, et complémentaire au travail de détermination des indicateurs urbains, notamment dans l'optique de la généralisation de l'application des LCZ à de nombreuses autres agglomérations. Une perspective de cette thèse serait de construire complètement toutes les LCZ de l'agglomération de Nancy, en calculant tous les indicateurs urbains. Il serait également pertinent de comparer les résultats de cette approche à ceux obtenus via l'utilisation d'un algorithme construisant les LCZ de manière automatique.

L'approche de détermination des contours des LCZ employée dans ce travail de thèse pose des questions méthodologiques. En effet, s'il est relativement simple de dessiner les contours d'une LCZ présentant une forme ronde ou ovale, le découpage est moins évident lorsque la LCZ a une forme plus complexe. À titre d'exemple, dans le cas d'une LCZ très longue et très étroite qui s'étendrait du centre de la ville vers la périphérie de l'agglomération, des différences de comportement thermique pourraient être observées entre l'une et l'autre des deux extrémités de la LCZ. Dans ce cas de figure, il convient de s'interroger sur la possibilité de sectionner cette longue LCZ en plusieurs LCZ de tailles réduites. De manière générale, Stewart indique une taille minimale pour les LCZ (400 m), mais ne propose pas de taille maximale. Dans le cas de LCZ très étendues, des différences de comportement thermique pourraient être observées entre les différentes extrémités de la LCZ, ce qui pourrait nécessiter de la subdiviser en LCZ plus petites.

Analyse critique du concept LCZ

Ce travail de thèse permet également de questionner la classification LCZ en tant que telle. En effet, certains quartiers présentent des caractéristiques urbaines se situant à la limite de deux types de LCZ (par exemple Open midrise et Sparsely built), au point que le processus d'identification du type de LCZ échoue à déterminer le type le plus adéquat. Cet exemple démontre que les intervalles des indicateurs urbains – dans ce cas les indicateurs d'occupation du sol – ne sont peut être pas adaptés à certaines configurations urbaines rencontrées dans les agglomérations européennes.

Cependant, certains cas de figure démontrent des résultats très satisfaisants de la classification LCZ en matière de correspondance entre valeurs d'indicateurs urbains et comportement thermique, comme par exemple le cas des LCZ de type Open midrise. En effet, NAT et THL sont toutes les deux identifiées comme des LCZ de type Open midrise, cependant les photographies des sites de contrôle indiquent qu'il ne s'agit clairement pas de la même typologie de quartier. La LCZ NAT est un quartier de grands ensembles tandis que la LCZ THL présente des d'îlots urbains anciens dont le centre est végétalisé. En outre, ces deux LCZ sont très différentes du point de vue de l'occupation du sol. Néanmoins, du point de vue de leur comportement thermique respectif, ces deux LCZ sont semblables.

Nombre de sessions de mesure et généralisation des phénomènes climatiques

Si les mesures mobiles permettent d'étudier en détail la distribution spatiale de la température d'air dans les LCZ, elles ne permettent pas d'avoir le même suivi temporel que les mesures fixes. Les mesures mobiles sont effectuées lorsque les conditions météorologiques sont favorables, mais également lorsque les équipes techniques sont disponibles. Du fait de ces deux contraintes, le nombre de sessions de mesure estivale dans les 13 LCZ est relativement réduit. Au final, 65 sessions ont été réalisées sur deux périodes estivales. Par ailleurs, seules deux sessions de mesure à fréquence horaire ont pu être réalisées. Cependant, les résultats illustrent la répétabilité satisfaisante en matière de différences de température entre LCZ. Les valeurs des écarts type observés pour $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$ sont faibles, comprises entre 0,2°C et 0,5°C en période diurne, (en moyenne 0,4°C), et entre 0,2°C et 1,1°C en période nocturne (en moyenne 0,6°C).

Une des perspectives de ce travail est de poursuivre les sessions de mesures mobiles dans l'agglomération de Nancy. Il est question de maintenir l'itinéraire élaboré en 2013 afin d'augmenter le nombre de sessions de mesures sur le même parcours. En complément, un voire deux autres itinéraires peuvent être tracés. Il s'agit dans ce cas d'analyser d'autres types de LCZ, et également des LCZ de même type que celles étudiées dans cette thèse, mais présentant d'autres valeurs d'indicateurs et étant situées différemment dans l'agglomération. Enfin, il s'agit de réaliser de nouvelles études dynamique de température d'air dans d'autres LCZ, notamment dans des types de LCZ qui n'ont pas été étudiés via cette méthode jusqu'à présent, comme par exemple les LCZ Low plants.

Mesures fixes et mesures mobiles

Un nouvel emploi des sites de contrôle est également proposé. Dans cette thèse, ces sites de contrôle visent à tester si un fragment urbain représentatif du reste de la LCZ en matière d'indicateurs urbains démontre un comportement thermique semblable à celui observé à l'échelle de la LCZ.

Dans un contexte de déploiement d'un réseau de stations fixes, la détermination de sites de contrôle représentatifs d'une LCZ entière peut être une information essentielle. En effet, en règle générale, les stations fixes ne sont représentatives que de leur zone source ou footprint. Grâce à l'utilisation de la classification LCZ associée aux mesures mobiles, une méthodologie de déploiement d'un réseau de stations fixes peut être proposée. Dans un premier temps, il s'agit de construire l'ensemble des LCZ sur le territoire de l'agglomération étudiée, puis de déterminer des emplacements candidats pour les sites de contrôle. Dans un second temps, une série de mesures mobiles peut être conduite afin de sélectionner les sites de contrôle les plus représentatifs de leur LCZ du point de vue de la température d'air. Enfin, des stations météorologiques fixes seront placées au niveau des sites de contrôle. De ce fait, il sera possible d'émettre l'hypothèse que les relevés météorologiques provenant de ces stations fixes ne seront pas représentatifs uniquement de leur zone source, mais de l'ensemble de la LCZ.

Le placement de stations fixes dans les LCZ permet de venir compléter les sessions de mesure réalisées par mesures mobiles. En effet, si ces dernières concernent en priorité la distribution spatiale de la température d'air, les stations fixes ont la possibilité d'effectuer des relevés en continue sur une longue période temporelle, et donc d'étudier

la distribution temporelle de température. A l'avenir, l'une des perspectives de ce travail de thèse réside dans le déploiement de stations fixes dans les LCZ d'ores et déjà construites à Nancy. La construction de ce réseau ouvrirait de nombreuses possibilités en matière d'étude du climat urbain :

- Étude de l'évolution de la température d'air dans les LCZ sur plusieurs jours d'affilé
- Comparaison des relevés expérimentaux provenant de stations fixes avec les profils de température d'air issus de l'étude dynamique réalisée dans cette thèse
- Validation de l'hypothèse du refroidissement nocturne en deux phases
- Étude de l'influence des variabilités saisonnières sur le comportement thermique des LCZ

Distribution spatiale de la température d'air intra-LCZ

L'un des atouts majeurs de la mesure embarquée est la possibilité d'étudier les singularités thermiques présentes dans les LCZ à l'échelle microclimatique. En effet, le fait de répéter plusieurs fois le même itinéraire permet de localiser la présence de points chauds et de points froids systématiques. Cette possibilité offerte par la mesure embarquée ouvre de très intéressantes perspectives en termes opérationnels, car elle permet de pouvoir quantifier les anomalies thermiques dans une LCZ donnée relativement à la moyenne de température de la LCZ. Cette identification des zones problématiques à petite échelle peut être un jalon pertinent lors du diagnostic de vulnérabilité d'une agglomération vis-à-vis d'un aléa climatique de type canicule. Par ailleurs, il est essentiel de déterminer les causes de ces anomalies thermiques afin d'être en mesure de proposer un nouvel aménagement si les décideurs estiment qu'il est nécessaire d'intervenir.

Documentation généralisée de l'îlot de chaleur urbain

La classification LCZ permet de spatialiser une information urbaine sur les types de quartier ainsi qu'une information climatique, et ce à une résolution spatiale de fragments urbains hectométriques. Ces cartographies permettent de représenter les différences de température entre LCZ $\Delta T_{air,LCZ\ X-Y}$, et donc de décrire l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération, en pointant la position des zones plus chaudes ou plus froides. L'intérêt pédagogique de ce type de carte est indéniable, car ce type de

représentation est parlant pour un décideur ou un aménageur n'ayant pas d'expertise en climatologie urbaine. En outre, la construction de ces cartographies thermiques peut être appropriée dans le cadre de l'établissement d'une stratégie d'adaptation au changement climatique à l'échelle de l'agglomération.

Par ailleurs, le taux de rafraîchissement normalisé est un indicateur climatique qui a été construit dans le but d'être intelligible par les aménageurs. D'un point de vue physique, il permet de reproduire le comportement thermique de chacune des LCZ pour les conditions météorologiques étudiées (vent et nébulosité faibles). De plus, ce concept peut être mis en œuvre dans des situations opérationnelles. À titre d'exemple, il serait possible de fixer un objectif en termes de taux de rafraîchissement normalisé lors d'une opération d'urbanisme pour un quartier donné. Un plan d'action pourrait être établi dans le cadre de l'élaboration de l'opération d'urbanisme afin de faire évoluer le taux de rafraîchissement normalisé du quartier étudié vers une valeur cible. Afin d'atteindre cet objectif, le plan d'action viserait notamment à agir sur les caractéristiques urbaines du quartier, en agissant notamment sur les valeurs des indicateurs urbains.

Vers le développement d'un modèle climatique de diagnostic

Le dernier chapitre de cette thèse permet d'ouvrir sur les perspectives de modélisation du comportement thermique des LCZ. L'approche de modélisation envisagée à moyen terme ne cherche pas à se substituer à la prévision météorologique. Elle ambitionne de mettre à disposition des aménageurs un outil permettant la prise en compte du climat urbain dans le processus de planification urbaine. Il s'agirait d'un modèle simple tant dans sa conception que dans son utilisation, se focalisant sur l'îlot de chaleur urbain dans la canopée urbaine, et tourné vers les besoins opérationnels des aménageurs, à savoir l'évaluation quantitative des scénarii d'aménagement. Cet outil aurait pour objectif d'être multi-échelle, c'est à dire de fournir une information de l'échelle de la rue à l'échelle de l'agglomération. Par ailleurs, il pourrait intégrer des indicateurs liés au confort thermique en complément des indicateurs relatifs à la température d'air.

L'architecture de ce modèle reste à préciser. Les régressions linéaires ont illustré qu'il existe des relations entre indicateurs urbains et taux de rafraîchissement normalisé. Cependant, il parait nécessaire d'approfondir cette méthode, notamment en utilisant un

échantillon de mesure plus important, afin de dégager de nouvelles pistes concernant l'architecture générale du modèle souhaité.

Bibliographie

Alcoforado, M. et Andrade, H. (2006). Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal) : main features and modeling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, 84:151–159.

Arnfield, A. (2003). Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23:1–26.

Auer, A. (1978). Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *Journal of Applied Meteorology*, 17:636–643.

Bagga, I. (2012). *Mesure et analyse des flux thermo-hydriques en zone urbaine hétérogène*. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

Baillargeon, G. (2002). *Probabilités et statistique avec applications en technologie et ingénierie*. Les Editions SMG.

Baklanov, A., Grimmond, C., Mahura, A. et Athanassiadou, M. (2009). *Meteorological and air quality models for urban areas*. Springer.

Balázs, B., Unger, J., Gál, T., Sümeghy, Z., Geiger, J. et Szegedi, S. (2009). Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters : empirical modelling, verification and extension. *Meteorological Applications*, 16:275–287.

Bechtel, B. et Daneke, C. (2012). Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5:1191–1202.

Böhner, J., McCloy, K. et Strobl, J. (2006). *SAGA - Analysis and Modeling Applications*. Göttinger Geographische Abhanlungen.

Bottyán, Z. et Unger, J. (2003). A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 75:233–243.

Bouyer, J. (2009). *Modélisation et simulation des microclimats urbains. Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Brandsma, T. et Wolters, D. (2012). Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of Utrecht (the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51:1046–1060.

Bruse, M. (2004). Envi-met 3.0 ; updated model overview. Rapport technique, ENVI-met.

Bruse, M. et Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, 13:373–384.

Buttstädt, M., Sachsen, T., Ketzler, G., Merbitz, H. et Schneider, C. (2010). Urban temperature distribution and detection of influencing factors in urban structure. *In Proceedings of the 17th conference international seminar on urban form*.

Chandler, T. (1965). *The climate of London*. Hutchinson.

Chen, F., Kusaka, H., Tewari, M., Bao, J.-W. et Hirakuchi, H. (2004). Utilizing the coupled WRF-LSM-urban modeling system with detailled urban classification to simulate the urban heat island phenomena over the greater Houston area. *In Proceedings of the Fifth Conference on Urban Environment*. American Meteorology Society.

Chen, L. et Ng, E. (2009). Sky view factor analysis of street canyons and its implication for urban heat island intensity. *In Proceedings of PLEA 2009 26th Conference on passive and low energy architecture*.

Claverie, R., Bouyer, J., Durickovic, I. et Moutton, M. (2011). Caractérisation des Î[ilots de chaleur urbains par mesure dynamique embarquée : premiers résultats sur la ville de Nancy. *In Proccedings of the Colloque scientifique international 2R2CV - Renforcer la Résilience au Changement Climatique des Villes : du diagnostic spatialisé aux mesures d'adaptation*.

Dattalo, P. (2013). *Analysis of multiple dependent variables*. Oxford University Press.

Davenport, A., Grimmond, C., Oke, T. et Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. *In Proceedings of the 12th Conference of Applied Climatology*.

Dupont, S. (2001). *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sol pour SUBMESO*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Dupont, S. et Mestayer, P. (2006). Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45:1744–1765.

Dupont, S., Mestayer, P., Guilloteau, E., Berthier, E. et Andrieu, H. (2006). Parameterization of the urban water budget with the submesoscale soil model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45:624–648.

Dupont, S., Otte, T. et Ching, J. (2004). Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model (MM5). *Boundary-Layer Meteorology*, 113:111–158.

Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street greometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30:379–392.

Eliasson, I. et Svensson, M. (2003). Spatial air temperature variations and urban land use - a statistical approach. *Meteorological Applications*, 10:135–149.

Ellefsen, R. (1990/1991). Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings*, 15-16:1025–1049.

Emmanuel, R. et Krüger, E. (2012). Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city : The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 53:137–149.

Erell, E., Pearlmutter, D. et Williamson, T. (2011). *Urban microclimate : designing the spaces between buildings*. Earthscan.

Estournel, C. (1982). *Étude de l'effet radiatif dans la couche limite : atmosphère urbaine et couche nocturne*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Fenner, D., Meier, F., Scherer, D. et Polse, A. (2014). Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. *Urban Climate*, (DOI : 10.1016/j.uclim.2014.02.004).

Fisher, B., Joffre, S., Kukkonen, J., Piringer, M., Rotach, M. et Schatzmann, M. (2005). Meteorology applied to urban air pollution problems - final report cost action 715. Rapport technique, COST 715.

Fortuniak, K. (2003). *A slab surface energy balance model (SUEB) and its application to the study on the role of roughness length in forming an urban heat island*, pages 368–377. Studia Geograficzne.

Gamba, P., Lisini, G., Liu, P., Du, P. et Lin, H. (2012). Urban climate zone detection and discrimination using object-based analysis of VHR scenes. *In Proceedings of the 4th GEOBIA*.

Gartland, L. (2008). *Heat Island : Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. Earthscan.

Giridharan, R., Lau, S., Ganesan, S. et Givoni, B. (2007). Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, 42:3669–3684.

Goh, K. et Chang, C. (1999). The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22 :00 h for Singapore. *International Journal of Climatology*, 19:1011–1023.

Grimmond, C., Best, M., Barlow, J., Arnfield, A., Baik, J., Baklanov, A., Belcher, S., Bruse, M., Calmet, I., Chen, F., Clark, P., Dandou, A., Erell, E., Fortuniak, K., Hamdi, R., Kanda, M., Kawai, T., Kondo, A., Krayenhoff, E., Lee, S., Limor, S.-B., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Mills, G., Moriwaki, R., Oleson, K., Porson, A., Sievers, U., Tombrou, M., Voogt, J. et Williamson, T. (2009). *Urban surface energy balance models : model characteristics and methodology for a comparison study*, chapitre 11, pages 97–123. Springer.

Grimmond, C., Blackett, M., Best, M., Baik, J.-J., Belcher, S., Beringer, J., Bohnenstengel, S., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y.,

Kondo, H., Krayenhoff, E., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Ooka, R., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Steeneveld, G.-J., Tombrou, M., Voogt, J., Young, D. et Zhang, N. (2011). Initial results from phase 2 of the international energy balance model comparison. *International Journal of Climatology*, 31:244–272.

Grimmond, C., Blackett, M., Best, M., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S., Bohnenstengel, S., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M., Hamdi, R., Hendry, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Shashua-Bar, L., Steeneveld, G.-J., Tombrou, M., Voogt, J., Young, D. et Zhang, N. (2010a). The international urban energy balance models comparison project : first results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49:1268–1292.

Grimmond, C., Cleugh, H. et Oke, T. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment*, 25B:311–326.

Grimmond, C. et Oke, T. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38:1262–1292.

Grimmond, C. et Oke, T. (2002). Turbulent heat fluxes in urbans areas : observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41:792–810.

Grimmond, C., Potter, S., Zutter, H. et Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International Journal of Climatology*, 21:903–913.

Grimmond, C., Roth, M., Oke, T., Au, Y., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L., Liu, C., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D. et Voogt, J. (2010b). Climate and more sustainable cities : climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1:247–274.

Harman, I., Barlow, J. et Belcher, S. (2004a). Scalar fluxes from urban street canyons. part II : model. *Boundary-Layer Meteorology*, 113:387–409.

Harman, I., Best, M. et Belcher, S. (2004b). Radiative exchange in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 110:301–316.

Heusinkveld, B., Steeneveld, G.-J., van Hove, L., Jacobs, C. et Holtslag, A. (2014). Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 119:677–692.

Hidalgo, J., Masson, V., Baklanov, A., Pigeon, G. et Gimeno, L. (2008). Advances in urban climate modeling. *Trends and Directions in Climate Research*, 1146:354–374.

Holmer, B., Postgard, U. et Eriksson, M. (2001). Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology*, 68:33–40.

Holmer, B., Thorsson, S. et Eliasson, I. (2007). Colling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature differences. *Geografiska Annaler Series A - Physical Geography*, 89:237–248.

Houet, T. et Pigeon, G. (2011). Mapping urban climate zone and quantifying climate behaviours - an application on Toulouse urban area (France). *Environmental Pollution*, 159:2180–2192.

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France, . (2014). Îlots morphologiques urbains et influences climatiques, http ://carto.iau-idf.fr/webapps/imu/ [En ligne, accès le 01-10-2014].

Kanda, M., Kawai, T., Kanega, M., Moriwaki, R., Narita, K. et Hagishima, A. (2005a). A simple energy balance model for regular building arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, 116:423–443.

Kanda, M., Kawai, T. et Nakagawa, K. (2005b). A simple theoretical radiation scheme for regular building arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, 114:71–90.

Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. et Schmid, H. (2004). A simple parameterization for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorology*, 112:503–523.

Kljun, N., Rotach, M. et Schmid, H. (2002). A three-dimensional backward lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, 103:205–226.

Klysik, K. et Fortuniak, K. (1999). Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment*, 33:3885–3895.

Kondo, H., Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado, H. et Komiyama, H. (2005). Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city : structure of the urban canopy model and its basic performance. *Boundary-Layer Meteorology*, 116:395–421.

Konishi, K. et Kitagawa, G. (2008). *Information criteria and statistical modeling*. Springer.

Krayenhoff, E. et Voogt, J. (2007). A microscale three dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures. *Boundary-Layer Meteorology*, 123: 433–461.

Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. et Kimura, F. (2001). A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models : comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101:329–358.

Lagouarde, J., Hénon, A., Kurz, B., Moreau, P., Irvine, M., Voogt, J. et Mestayer, P. (2010). Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city centre. *Remote Sensing of Environment*, 114:87–105.

Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R. et Pétrissans, M. (2015). Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment : evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment*, 83:39–49.

Lee, S. et Park, S. (2008). A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, 126:73–102.

Lemonsu, A., Grimmond, C. et Masson, V. (2004). Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean city : Marseille. *Journal of Applied Meteorology*, 43:312–327.

Loridan, T. et Grimmond, C. (2012). Characterisation of energy flux partitioning in urban environments : links with surface seasonal properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51:219–241.

Lowry, W. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate : a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16:129–135.

Malys, L. (2012). *Évaluation des impacts directs et indirectes des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Martilli, A., Clappier, A. et Rotach, M. (2002). An urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteorology*, 104:261–304.

Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94:357–397.

Masson, V. (2006). Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84:35–45.

Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liousse, C., Pont, V., Lagouarde, J., Voogt, J., Salmond, J., Oke, T., Hidalgo, J., Legain, D., Garrouste, O., Lac, C., Connan, O., Briottet, X., Lachérade, S. et Tulet, P. (2008). The canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102:135–157.

Masson, V., Grimmond, C. et Oke, T. (2002). Evaluation of the town energy balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *Journal of Applied Meteorology*, 41:1011–1026.

Merbitz, H., Buttstädt, M., Michael, S., Dott, W. et Schneider, C. (2012). GIS-based identification of spatial variables enhancing heat and poor air quality in urban areas. *Applied Geography*, 33:94–106.

Mestayer, P., Durand, P., Augustin, P., Bastin, S., Bonnefond, J., Bénech, B., Campistron, B., Coppalle, A., Delbarre, H., Souddet, B., Drobinski, P., Druilhet, A., Fréjafon, E., Grimmond, C., Groleau, D., Irvine, M., Kergomard, C., Kermadi, S., Lagouarde, J., Lemonsu, A., Lohou, F., Long, N., Masson, V., Moppert, C.,

Noilhan, J., Offerle, B., Oke, T., Pigeon, G., Puygrenier, V., Roberts, S., Rosant, J., Saïd, F., Salmond, J., Talbaut, M. et Voogt, J. (2005). The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE) : set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorology*, 114:315–365.

Montavez, J., Gonzalez-Rouco, J. et Valero, F. (2008). A simple model for estimating the maximum intensity of nocturnal urban heat island. *International Journal of Climatology*, 28:235–242.

Offerle, B., Grimmond, C. et Fortuniak, K. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central european city centre. *International Journal of Climatology*, 25:1405–1419.

Offerle, B., Grimmond, C. et Oke, T. (2003). Parameterization of net all-wave radiation for urban areas. *Journal of Applied Meteorology*, 42:1157–1173.

Oke, T. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4):268–277.

Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climate*. Routledge, seconde édition.

Oke, T. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Rapport technique 81, World Meteorological Organization.

Oke, T. (2006). Toward better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84:179–190.

Oleson, K., Bonan, G., Feddema, J. et Vertenstein, M. (2008a). An urban parameterization for a global climate model. Part II : sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:1061–1076.

Oleson, K., Bonan, G., Feddema, J., Vertenstein, M. et Grimmond, C. (2008b). An urban parameterization for a global climate model. Part I : formulation and evaluation for two cities. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47:1038–1060.

Oliveira, S., Andrade, H. et Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat : a case study in Lisbon. *Building and Environment*, 46:2186–2194.

Peel, M., Finlayson, B. et McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11:1633–1644.

Pigeon, G. (2007). *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine : Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P. et Masson, V. (2007). Anthropogenic heat release in an old european agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27:1969–1981.

Piringer, M., Grimmond, C., Joffre, S., Mestayer, P., Middleton, D., Rotach, M., Baklanov, A., Ridder, K. D., Ferreira, J., Guilloteau, E., Karppinen, A., Martilli, A., Masson, V. et Tombrou, M. (2002). Investigating the surface energy balance in urban areas - recent advances and future needs. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2:1–16.

Plate, E. et Kiefer, H. (2001). Wind loads in urban areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89:1233–1256.

Porson, A., Clark, P., Harman, I., Best, M. et Belcher, S. (2010a). Implementation of a new urban energy budget into MetUM. Part II : Validation against observations and model intercomparison. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136:1530–1542.

Porson, A., Clark, P., Harman, I., Best, M. et Belcher, S. (2010b). Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I : Description and idealized simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136:1514–1529.

Ren, C., Ng, E. et Katzschner, L. (2011). Urban climatic map studies : a review. *International Journal of Climatology*, 31:2213–2233.

Ringenbach, N. (2004). *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I.

Robitu, M. (2005). *Étude de l'intéraction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Robitu, M., Musy, M., Inard, C. et Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80:435–447.

Rotach, M., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y., Ruffieux, D., Salmond, J., Schatzmann, M. et Voogt, J. (2005). Bubble - an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81:231–261.

Saaroni, H., Ben-Dor, E., Bitan, A. et Potchter, O. (2000). Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, 48:1–18.

Sailor, D. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 31:189–199.

Saitoh, T., Shimada, T. et Hoshi, H. (1996). Modeling and simulation of the Tokyo urban heat island. *Atmospheric Environment*, 30:3431–3442.

Salamanca, F., Martilli, A. et Yagüe, C. (2011). A numerical study of the urban heat island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*.

Schmid, H. (2002). Footprint modeling for vegetative atmosphere exchange studies : a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113:159–183.

Schwarz, N., Schlink, U., Frank, U. et Grossmann, K. (2012). Relationship of land surface and air temperature and its implication for quantifying urban heat island indicators - an application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*, 18:693–704.

Shashua-Bar, L. et Hoffman, M. (2002). The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites. *Building and Environment*, 37:1279–1288.

Shashua-Bar, L. et Hoffman, M. (2004). Quantitative evaluation of passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer. Case study : urban streets and courtyards with trees. *Building and Environment*, 39:1087–1099.

Spronken-Smith, R., Oke, T. et Lowry, W. (2000). Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *International Journal of Climatology*, 20:1033–1047.

Steeneveld, G.-J., Koopmans, B., Heusinkveld, B., van Hove, L. et Holtslag, A. (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Nederlands. *Journal of Geophysical Research*, 116.

Stewart, I. (2000). Influence of meteorological conditions on the intensity and form of the urban heat island effect in Regina. *The Canadian Geographer*, 44:271–285.

Stewart, I. (2011). *Redefining the urban heat island*. Thèse de doctorat, The University of British Columbia, Vancouver.

Stewart, I. et Oke, T. (2012). Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of American Meteorology Society*, 93:1879–1900.

Stewart, I., Oke, T. et Krayenhoff, E. (2013). Evaluation of the 'Local Climate Zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, (DOI : 10.1002/joc.3746).

Sundborg, A. (1951). Climatological studies in Uppsala with special regard to the temperature conditions in the urban area. *In Geographica*.

Svensson, M. (2004). Sky view factor analysis - implications for urban air temperature differences. *Meteorological Applications*, 11:201–211.

Svensson, M., Eliasson, I. et Holmer, B. (2002). A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night. *Climate Research*, 22:215–226.

Szymanowski, M. et Netzel, P. (2004). Air temperature field modelling in Wroclaw, Poland using GIS GRASS system. *In Proceedings from the conference on spatial interpolation in climatology and meteorology*. COST 719.

Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 36:59–80.

Unger, J., Savic, S. et Gal, T. (2011). Modeling of the annual mean urban heat island pattern for planning of representative urban climate station network. *Advances in Meteorology*, 2011:1–9.

Unger, J., Sümeghy, Z. et Zoboki, J. (2001). Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research*, 58:117–127.

Unger, J., Sümeghy, Z., Szegedi, S., Kiss, A. et Géczi, R. (2010). Comparison and generalisation of spatial patterns of the urban heat island based on normalized values. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35:107–144.

Vesala, T., Kljun, N., Rannik, U., Rinne, J., Sogachev, A., Markkanen, T., Sabelfeld, K., Foken, T. et Leclerc, M. (2008). Flux and concentration footprint modelling : state of the art. *Environmental Pollution*, 152:653–666.

Vinet, J. (2000). *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Voogt, J. et Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86:370–384.

Weng, Q. (2009). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies : Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64:335–344.

Yu, C. et Hien, W. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 38:105–120.

Annexe A

Description des 17 types de LCZ

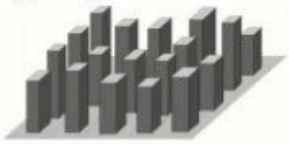
LCZ COMPACT HIGHRISE 1

DEFINITION

Form: Dense mix of tall buildings to tens of stories. Buildings free-standing, closely spaced. Sky view from street level significantly reduced. Buildings of steel, concrete, and glass construction. Land cover mostly paved; few or no trees. High space heating/cooling demand. Heavy traffic flow. ***Function:*** Commercial (office buildings, hotels); residential (apartment towers). ***Location***: Core (downtown, central business district); periphery (highrise subcentre, highrise sprawl). ***Correspondence:*** UCZ1 (Oke 2004); Dc1 and Dc8 (Ellefsen 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle



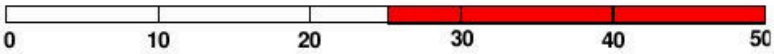
Low level

PROPERTIES

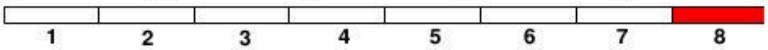
Sky view factor
0.2 – 0.4

Canyon aspect ratio
> 2

Mean building height
> 25 m



Terrain roughness class
8



Building surface fraction
40 – 60 %

Impervious surface fraction
40 – 60 %

Pervious surface fraction
< 10 %

Surface admittance
1,100 – 2,200 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}

Surface albedo
0.10 – 0.20

Anthropogenic heat flux
50 – 300 W m^{-2}

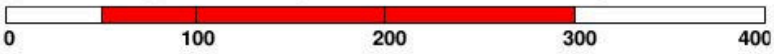


Figure A.1 : *Type de LCZ 1 Compact highrise.*

LCZ COMPACT MIDRISE 2

DEFINITION

Form: Attached or closely spaced buildings 3–9 stories tall. Buildings separated by narrow streets and inner courtyards. Buildings uniform in height. Sky view from street level significantly reduced. Heavy building materials (stone, concrete, brick, tile) and thick roofs and walls. Land cover mostly paved; few or no trees. Moderate space heating/cooling demand. Moderate to heavy traffic flow. ***Function***: Residential (multi-unit housing; multistorey tenements); commercial (office buildings, hotels, retail shops); industrial (warehouses, factories). ***Location***: Core (old city, old town; inner city, central business district); periphery (high-density sprawl). ***Correspondence***: UCZ2 (Oke, 2004); A1, A2, A4, Dc2 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle

Low level

PROPERTIES

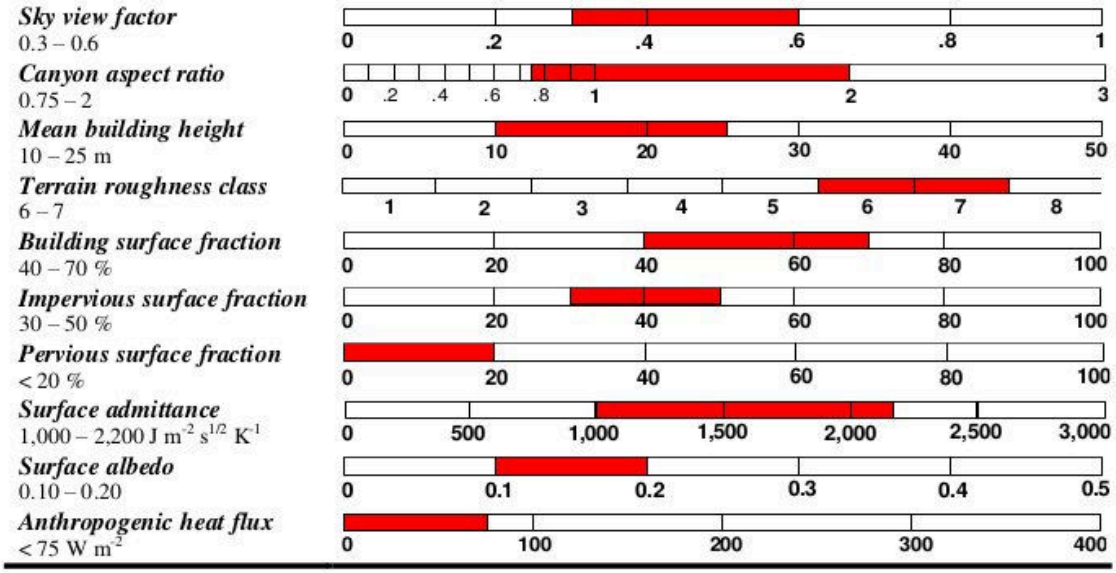


Figure A.2 : *Type de LCZ 2 Compact midrise.*

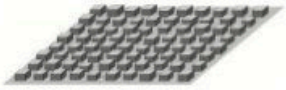
LCZ COMPACT LOWRISE 3

DEFINITION

Form: Attached or closely spaced buildings 1–3 stories tall. Buildings small and tightly packed along narrow streets, often without discernable alignment. Sky view from street level significantly reduced. Heavy building materials (stone, concrete, brick, tile) and thick roofs and walls. Land cover mostly paved; few or no trees. Moderate space heating/cooling demand. Low-moderate traffic flow. ***Function***: Residential (single-unit housing, high-density terrace/row housing); commercial (small retail shops). ***Location***: Old or densely populated cities, towns, villages. Core (central or inner city); periphery (high-density sprawl). ***Correspondence***: UCZ3 (Oke, 2004); Dc3 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle

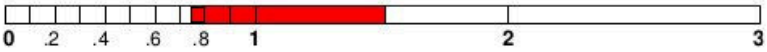


Low level

PROPERTIES

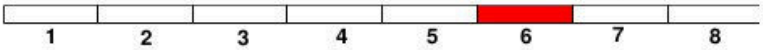
Sky view factor
0.2 – 0.6

Canyon aspect ratio
0.75 – 1.5



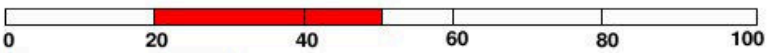
Mean building height
3 – 10 m

Terrain roughness class
6



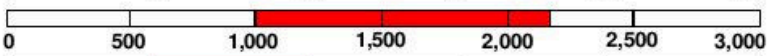
Building surface fraction
40 – 70 %

Impervious surface fraction
20 – 50 %



Pervious surface fraction
< 30 %

Surface admittance
1,000 – 2,200 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.10 – 0.20

Anthropogenic heat flux
< 75 W m^{-2}

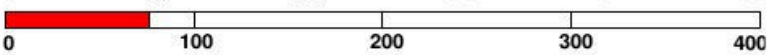


Figure A.3 : *Type de LCZ 3 Compact lowrise.*

LCZ OPEN HIGHRISE 4

DEFINITION

Form: Buildings tens of stories tall, set in open, geometric arrangement. Buildings uniform in height, width, and spacing. Sky view from ground level significantly reduced. Heavy building materials (concrete, steel, stone, glass) and thick roofs and walls. Roofs typically flat. Scattered trees and abundant plant cover. Moderate-low space heating/cooling demand. Moderate traffic flow. ***Function***: Residential (apartment blocks, highrise housing estates, multistorey tenements). ***Location***: Periphery. Densely populated cities. Socialist-style cities. ***Correspondence***: Do2 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle

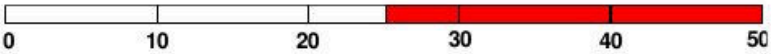
Low level

PROPERTIES

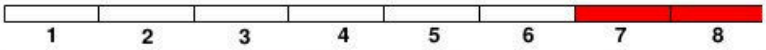
Sky view factor
0.5 – 0.7

Canyon aspect ratio
0.75 – 1.25

Mean building height
> 25 m



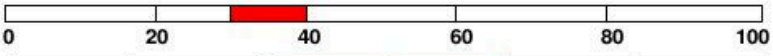
Terrain roughness class
7 – 8



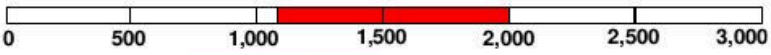
Building surface fraction
20 – 40 %

Impervious surface fraction
30 – 40 %

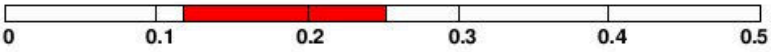
Pervious surface fraction
30 – 40 %



Surface admittance
1,100 – 2,000 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.12 – 0.25



Anthropogenic heat flux
< 50 W m^{-2}

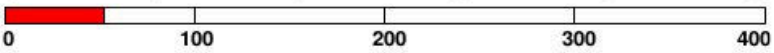


Figure A.4 : *Type de LCZ 4 Open highrise.*

LCZ OPEN MIDRISE 5

DEFINITION

Form: Open arrangement of buildings 3–9 stories tall. Sky view from street level slightly reduced. Heavy building materials (concrete, steel, stone, glass) and thick roofs and walls. Scattered trees and abundant plant cover. Low space heating/cooling demand. Low traffic flow. ***Function***: Residential (multi-unit housing, multistorey tenements, apartment blocks); institutional (research/business parks, campuses); commercial (office buildings, hotels). ***Location***: Periphery. ***Correspondence***: UCZ6 (Oke, 2004); Do6 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle

Low level

PROPERTIES

Sky view factor
0.5 – 0.8

Canyon aspect ratio
0.3 – 0.75

Mean building height
10 – 25 m

Terrain roughness class
5 – 6

Building surface fraction
20 – 40 %

Impervious surface fraction
30 – 50 %

Pervious surface fraction
20 – 40 %

Surface admittance
1,000 – 2,200 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}

Surface albedo
0.12 – 0.25

Anthropogenic heat flux
< 25 W m^{-2}

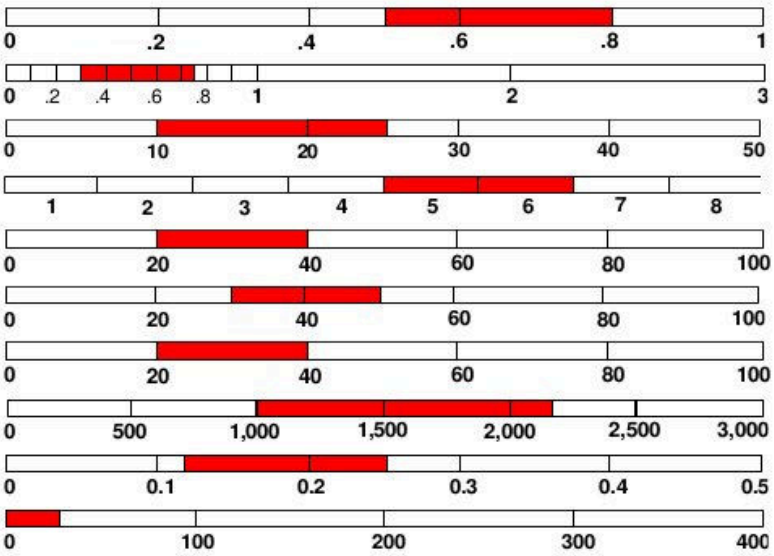


Figure A.5 : *Type de LCZ 5 Compact midrise.*

LCZ OPEN LOWRISE 6

DEFINITION

Form: Small buildings 1–3 stories tall; detached or attached in rows, often in grid pattern. Sky view from street level slightly reduced. Building materials vary (wood, brick, stone, tile). Scattered trees and abundant plant cover. Low space heating/cooling demand. Low traffic flow. ***Function***: Residential (single or multi-unit housing, low density terrace/row housing); commercial (small retail shops). ***Location***: City (medium density); periphery (suburbs). Commuter towns. Rural towns. ***Correspondence***: UCZ5 (Oke 2004); Do3 (Ellefsen 1990/91).

ILLUSTRATION

High angle

Low level

PROPERTIES

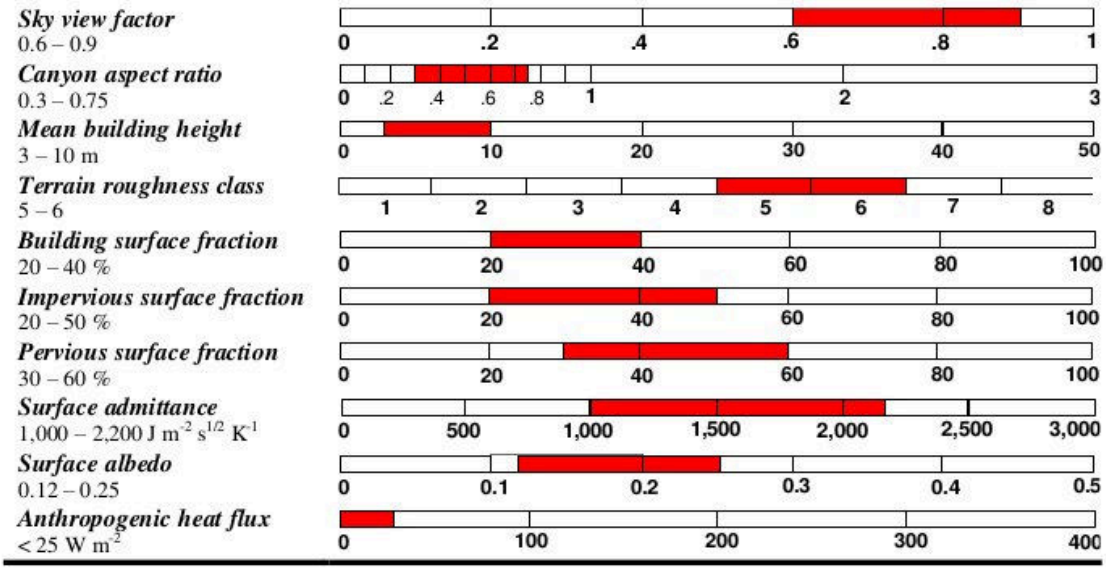


Figure A.6 : *Type de LCZ 6 Compact lowrise.*

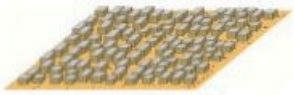
LCZ — LIGHTWEIGHT LOWRISE — 7

DEFINITION

Form: Single-story buildings set in compact (often formless) arrangement, attached or closely spaced. Buildings separated by narrow roads and alleys. Little or no consolidated infrastructure. Sky view from ground level significantly reduced. Lightweight building materials (thatch, wood, bamboo, corrugated metal); thin walls and flat roofs. Few or no trees. Land cover hard packed (bare soil, sand). Population density high. Space heating/cooling demand nil. Low traffic flow. ***Function***: Residential (informal settlements, low-cost housing, shantytowns, squatter settlements, mobile housing); agricultural (small-holder lots). ***Location***: Periphery of large, developing cities. Extended metropolitan regions. Inner city. Rural towns.

ILLUSTRATION

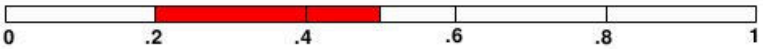
High angle



Low level

PROPERTIES

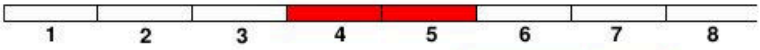
Sky view factor
0.2 – 0.5



Canyon aspect ratio
1 – 2

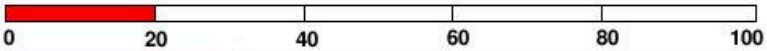
Mean building height
2 – 4 m

Terrain roughness class
4 – 5



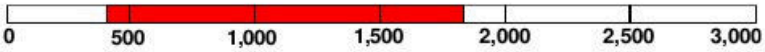
Building surface fraction
60 – 90 %

Impervious surface fraction
< 20 %



Pervious surface fraction
< 30 %

Surface admittance
400 – 1,800 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.15 – 0.35

Anthropogenic heat flux
< 35 W m^{-2}

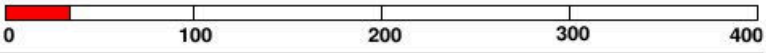


Figure A.7 : *Type de LCZ 7 Lightweight lowrise.*

LCZ LARGE LOWRISE 8

DEFINITION

Form: Large, low buildings 1–3 stories tall, separated by extensive paved surfaces. Buildings extend outward not upward; roofs flat. Sky view from ground level slightly reduced. Building materials vary (steel, concrete, metal). Few or no trees; land cover mostly paved. Moderate-low space heating/cooling demand. Moderate-heavy traffic flow. ***Function***: Light industrial (modern warehousing); commercial (shopping centres, storage facilities); transportation hub (air, rail, truck, ship). ***Location***: Periphery. ***Correspondence***: UCZ4 (Oke, 2004); Do1, Do4 (Ellefsen, 1990/91).

ILLUSTRATION

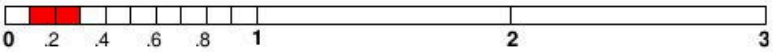
High angle

Low level

PROPERTIES

Sky view factor
> 0.7

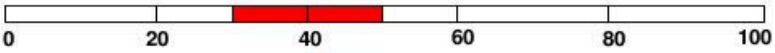
Building aspect ratio
0.1 – 0.3



Mean building height
3 – 10 m

Terrain roughness class
5

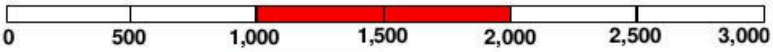
Building surface fraction
30 – 50 %



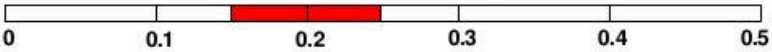
Impervious surface fraction
40 – 50 %

Pervious surface fraction
< 20 %

Surface admittance
1,000 – 2,000 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.15 – 0.25



Anthropogenic heat flux
< 50 W m^{-2}

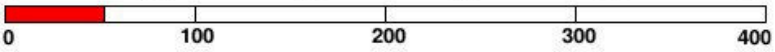


Figure A.8 : *Type de LCZ 8 Large lowrise.*

LCZ SPARSELY BUILT 9

DEFINITION

Form: Small or medium-sized buildings widely spaced across natural landscape. Full sky view from ground level. Building materials vary. Scattered trees and abundant plant cover. Space heating/cooling demand negligible. Low traffic flow. ***Function***: Residential (single or multi-unit housing); commercial (retail shops, office buildings); institutional (research/business parks, campuses); agricultural (farms, country estates). ***Location***: Periphery (low-density suburbs). Extended metropolitan regions. Newly developed urban tracts. Rural towns. Lightly settled countryside. ***Correspondence***: UCZ7 (Oke, 2004).

ILLUSTRATION

High angle

Low level

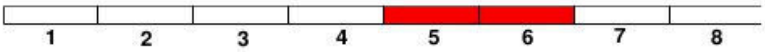
PROPERTIES

Sky view factor
> 0.8

Building aspect ratio
0.1 – 0.25

Mean building height
3 – 10 m

Terrain roughness class
5 – 6

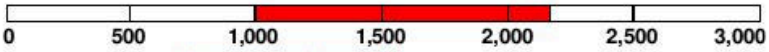


Building surface fraction
10 – 20 %

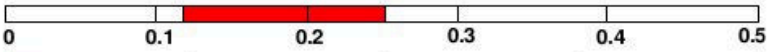
Impervious surface fraction
< 20 %

Pervious surface fraction
60 – 80 %

Surface admittance
1,000 – 2,200 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.12 – 0.25



Anthropogenic heat flux
< 10 W m^{-2}

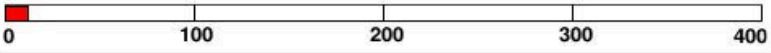


Figure A.9 : *Type de LCZ 9 Sparsely built.*

LCZ HEAVY INDUSTRY 10

DEFINITION

Form: Highly irregular mix of low and midrise industrial structures (tanks, towers, stacks). Structures openly spaced on hard-packed surfaces. Sky view from ground level slightly reduced. Building materials vary (steel, concrete, metal). Few or no trees. High demand for space heating/cooling. Large quantities of waste heat and atmospheric pollutants released from mechanical and chemical processing (smelting, pulping, distilling). Low traffic flow. ***Function***: Industrial (factories, refineries, mills, plants). ***Location***: City or country.

ILLUSTRATION

High angle

Low level

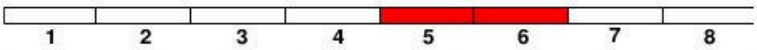
PROPERTIES

Sky view factor
0.6 – 0.9

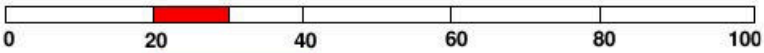
Building aspect ratio
0.2 – 0.5

Mean building height
5 – 15 m

Terrain roughness class
5 – 6



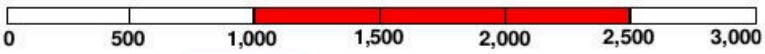
Building surface fraction
20 – 30 %



Impervious surface fraction
20 – 40 %

Pervious surface fraction
40 – 50 %

Surface admittance
1,000 – 2,500 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.12 – 0.20

Anthropogenic heat flux
> 300 W m^{-2}

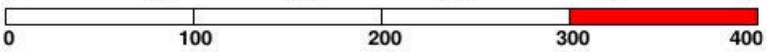


Figure A.10 : *Type de LCZ 10 Heavy industrial.*

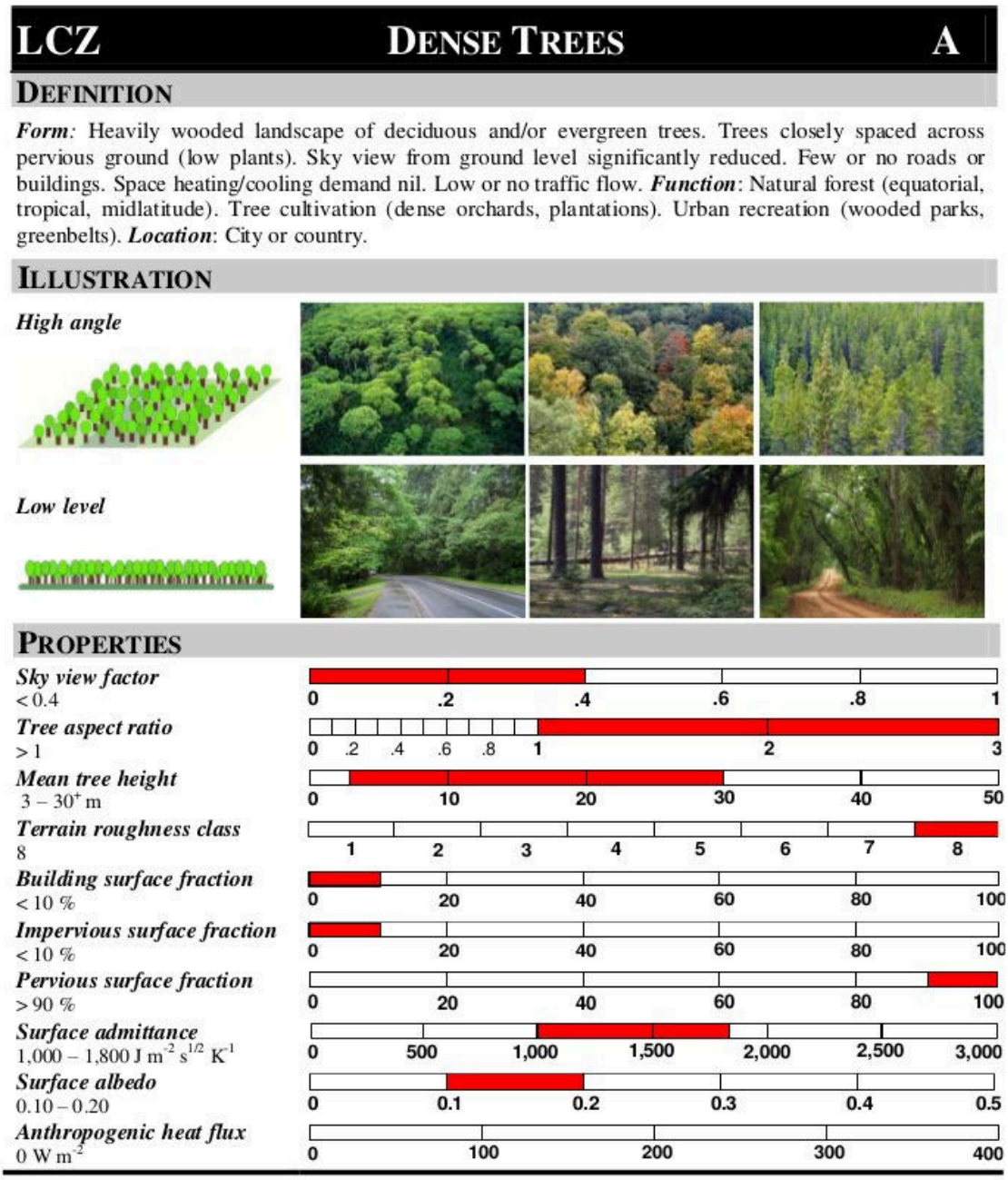
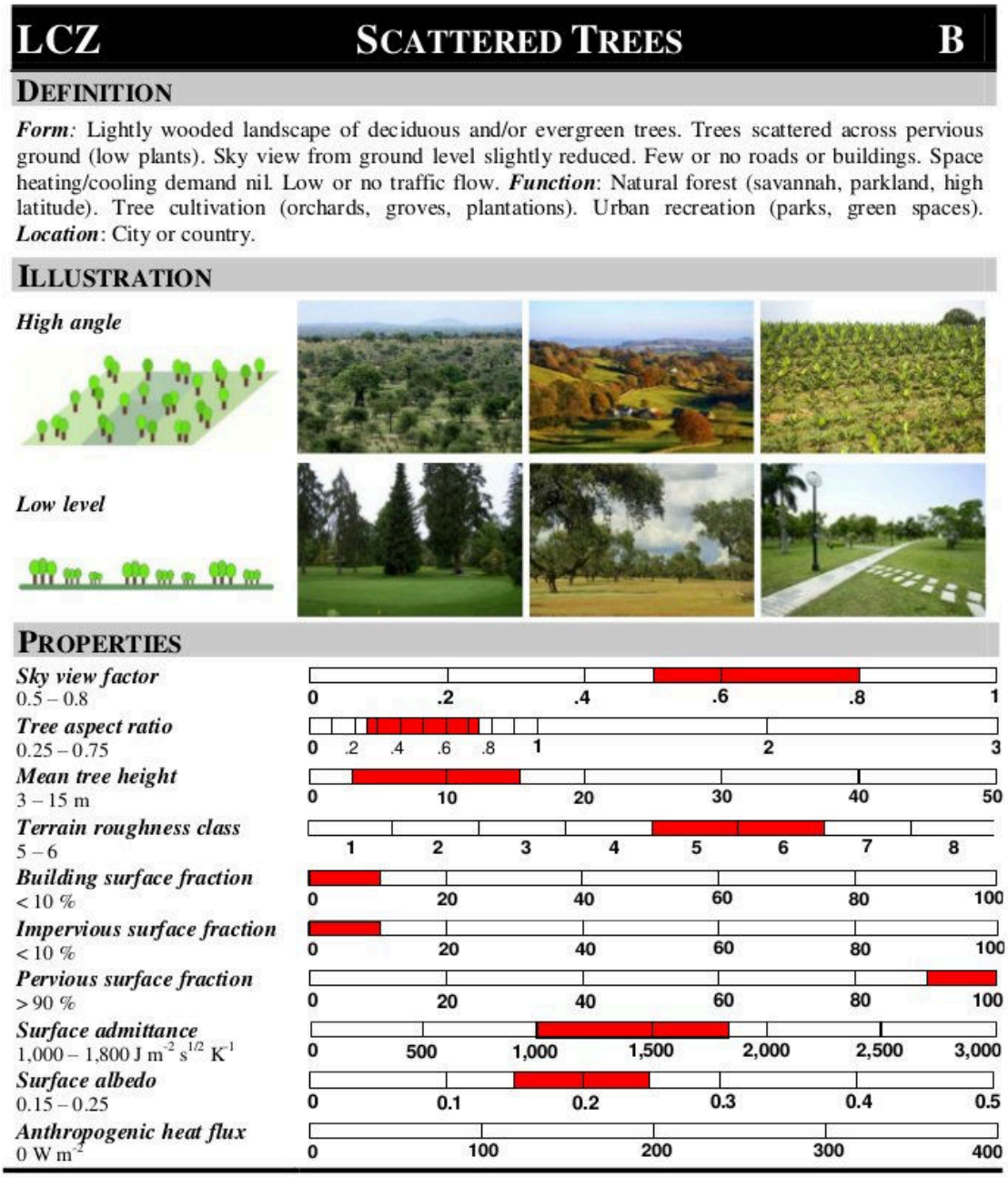


Figure A.11 : *Type de LCZ A Dense trees.*



LCZ **SCATTERED TREES** **B**

DEFINITION

Form: Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Trees scattered across pervious ground (low plants). Sky view from ground level slightly reduced. Few or no roads or buildings. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. ***Function***: Natural forest (savannah, parkland, high latitude). Tree cultivation (orchards, groves, plantations). Urban recreation (parks, green spaces). ***Location***: City or country.

ILLUSTRATION

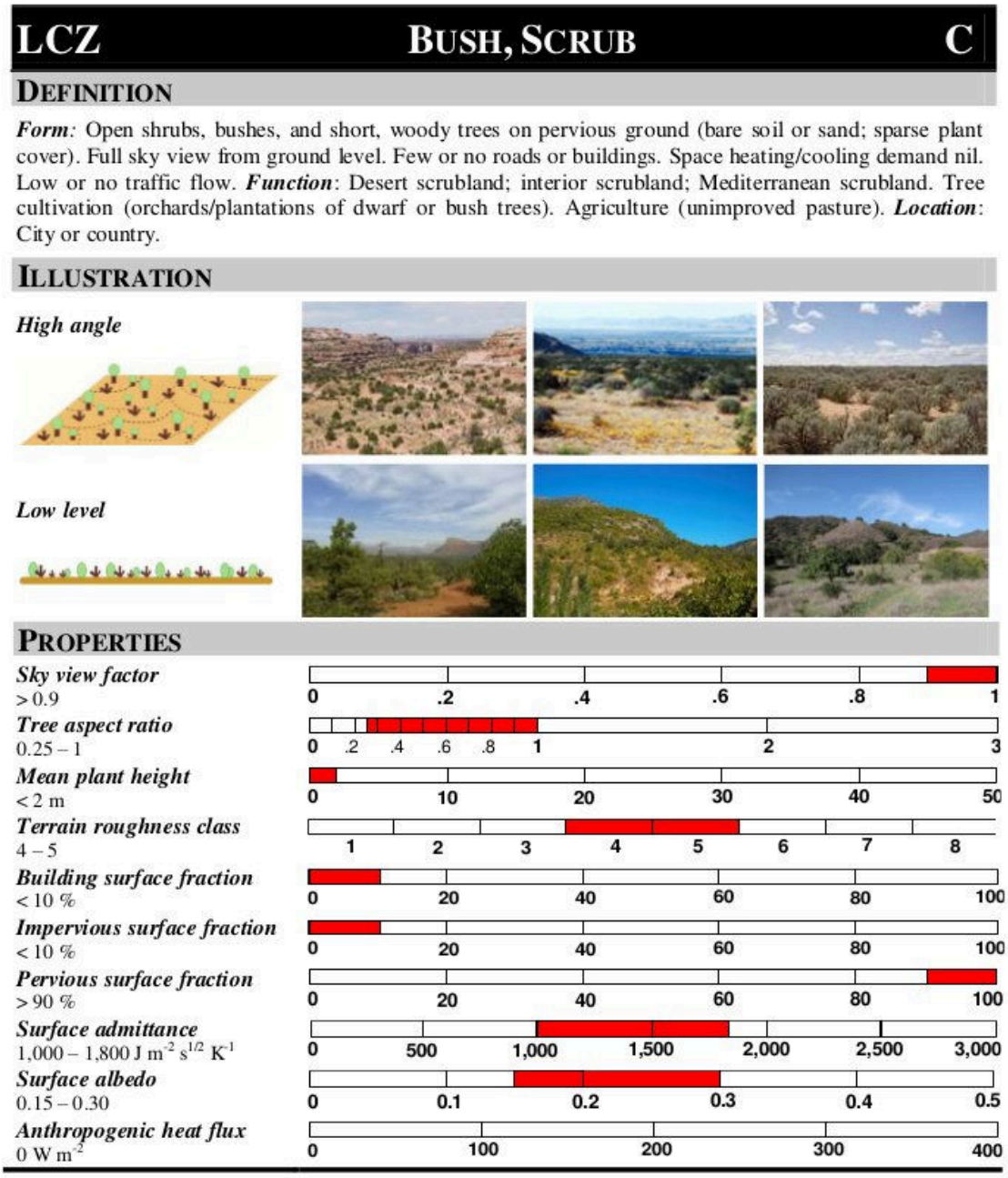
High angle

Low level

PROPERTIES

Sky view factor 0.5 – 0.8	0 .2 .4 .6 .8 1
Tree aspect ratio 0.25 – 0.75	0 .2 .4 .6 .8 1 2 3
Mean tree height 3 – 15 m	0 10 20 30 40 50
Terrain roughness class 5 – 6	1 2 3 4 5 6 7 8
Building surface fraction < 10 %	0 20 40 60 80 100
Impervious surface fraction < 10 %	0 20 40 60 80 100
Pervious surface fraction > 90 %	0 20 40 60 80 100
Surface admittance 1,000 – 1,800 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}	0 500 1,000 1,500 2,000 2,500 3,000
Surface albedo 0.15 – 0.25	0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5
Anthropogenic heat flux 0 W m^{-2}	0 100 200 300 400

Figure A.12 : *Type de LCZ B Scattered trees.*



LCZ BUSH, SCRUB C

DEFINITION

Form: Open shrubs, bushes, and short, woody trees on pervious ground (bare soil or sand; sparse plant cover). Full sky view from ground level. Few or no roads or buildings. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. ***Function***: Desert scrubland; interior scrubland; Mediterranean scrubland. Tree cultivation (orchards/plantations of dwarf or bush trees). Agriculture (unimproved pasture). ***Location***: City or country.

ILLUSTRATION

High angle

Low level

PROPERTIES

Sky view factor	> 0.9
Tree aspect ratio	0.25 – 1
Mean plant height	< 2 m
Terrain roughness class	4 – 5
Building surface fraction	< 10 %
Impervious surface fraction	< 10 %
Pervious surface fraction	> 90 %
Surface admittance	1,000 – 1,800 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}
Surface albedo	0.15 – 0.30
Anthropogenic heat flux	0 W m^{-2}

Figure A.13 : *Type de LCZ C Bush, scrub.*

LCZ — LOW PLANTS — D

DEFINITION

Form: Featureless landscape of pervious ground, predominantly low plant cover. Few or no trees, roads, or buildings. Full sky view from ground level. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. ***Function***: Natural grassland (savannah, steppe). Agriculture (pasture, arable farmland). Urban recreation (grassy parks, green spaces). ***Location***: City or country. ***Correspondence***: UCZ7 (Oke 2004).

ILLUSTRATION

High angle

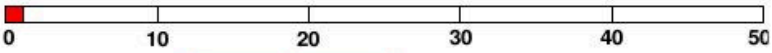
Low level

PROPERTIES

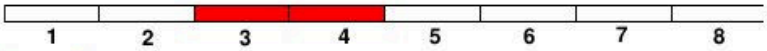
Sky view factor
> 0.9

Tree aspect ratio
< 0.1

Mean plant height
< 1 m



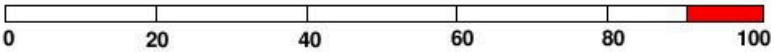
Terrain roughness class
3 – 4



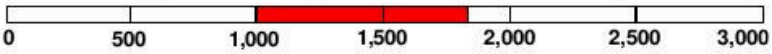
Building surface fraction
< 10 %

Impervious surface fraction
< 10 %

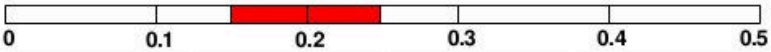
Pervious surface fraction
> 90 %



Surface admittance
1,000 – 1,800 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.15 – 0.25



Anthropogenic heat flux
0 W m^{-2}

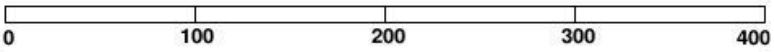


Figure A.14 : *Type de LCZ D Low plants.*

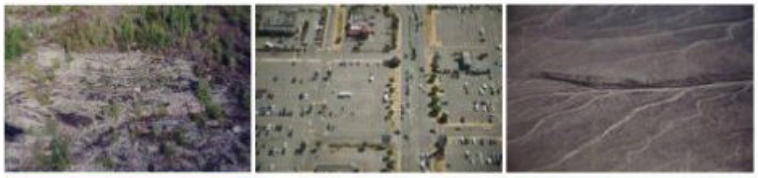
LCZ BARE ROCK OR PAVED E

DEFINITION

Form: Featureless landscape of impervious ground, predominantly rock, paved, or hard packed. Ground cover varies (gravel, laterite, exposed bedrock; asphalt, concrete). Few or no trees, plants, or buildings. Full sky view from ground level. Space heating/cooling demand nil. Low or no traffic flow. ***Function***: Natural desert (cold, rock); geological shield. Transportation (car parks, container ports, freight terminals, airport aprons). ***Location***: City or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level

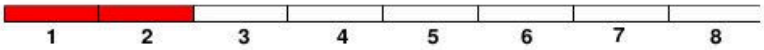
PROPERTIES

Sky view factor
> 0.9

Tree aspect ratio
< 0.1

Mean plant height
< 0.25 m

Terrain roughness class
1 – 2

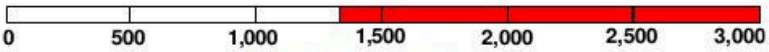


Building surface fraction
< 10 %

Impervious surface fraction
> 90 %

Pervious surface fraction
< 10 %

Surface admittance
1,300 – 3,000 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.15 – 0.30

Anthropogenic heat flux
0 W m^{-2}

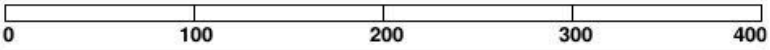


Figure A.15 : *Type de LCZ E Bare rock or paved.*

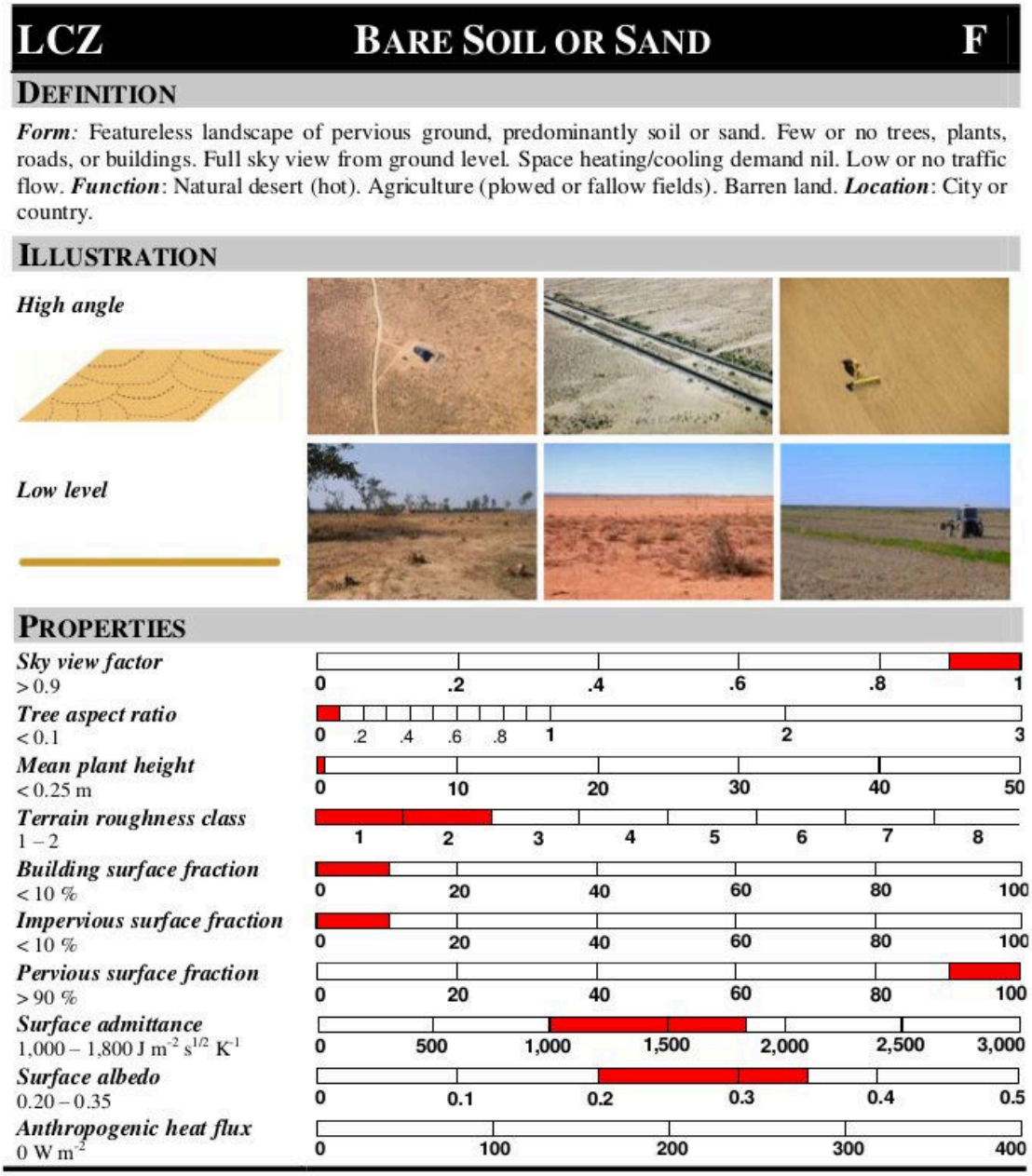


Figure A.16 : *Type de LCZ F Bare soil or sand.*

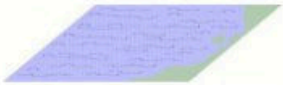
LCZ WATER G

DEFINITION

Form: Large, open water bodies such as seas, lakes, and bays, or smaller bodies like rivers, reservoirs, and lagoons. Few or no roughness features. Full sky view. ***Function***: Natural water systems. Recreation. Transportation. Industry. ***Location***: City (urban lakes, rivers, harbours) or country.

ILLUSTRATION

High angle



Low level

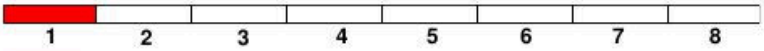
PROPERTIES

Sky view factor
> 0.9

Tree aspect ratio
< 0.1

Mean plant height
< 0.25 m

Terrain roughness class
1

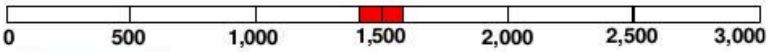


Building surface fraction
< 10 %

Impervious surface fraction
< 10 %

Pervious surface fraction
> 90 %

Surface admittance
1,500 J m^{-2} $s^{1/2}$ K^{-1}



Surface albedo
0.02 – 0.10

Anthropogenic heat flux
0 W m^{-2}

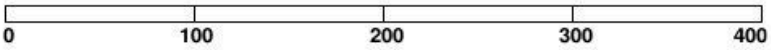


Figure A.17 : *Type de LCZ G Water.*

Annexe B

Relevés effectués à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy et à Coincourt

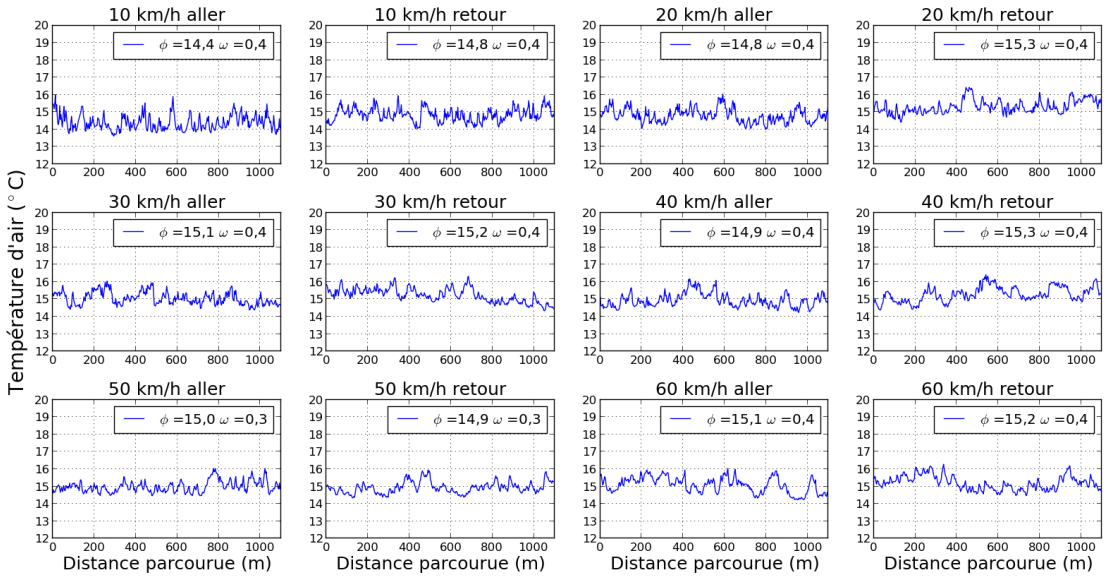


Figure B.1 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 13 mars 2012 en période diurne à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon.*

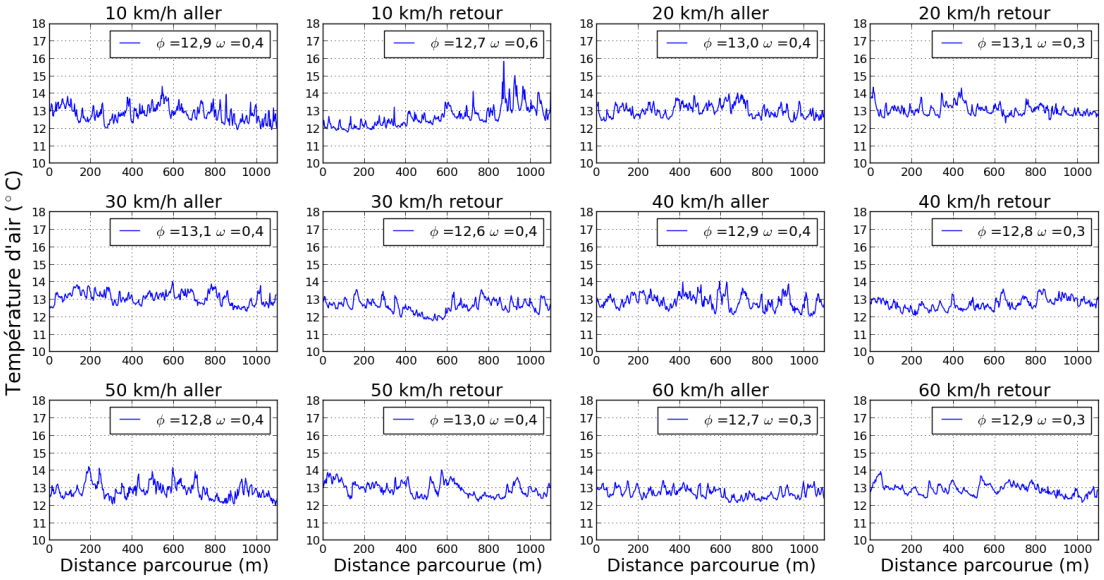


Figure B.2 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 20 mars 2012 en période diurne à l'aérodrome d'Essey-les-Nancy, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon.*

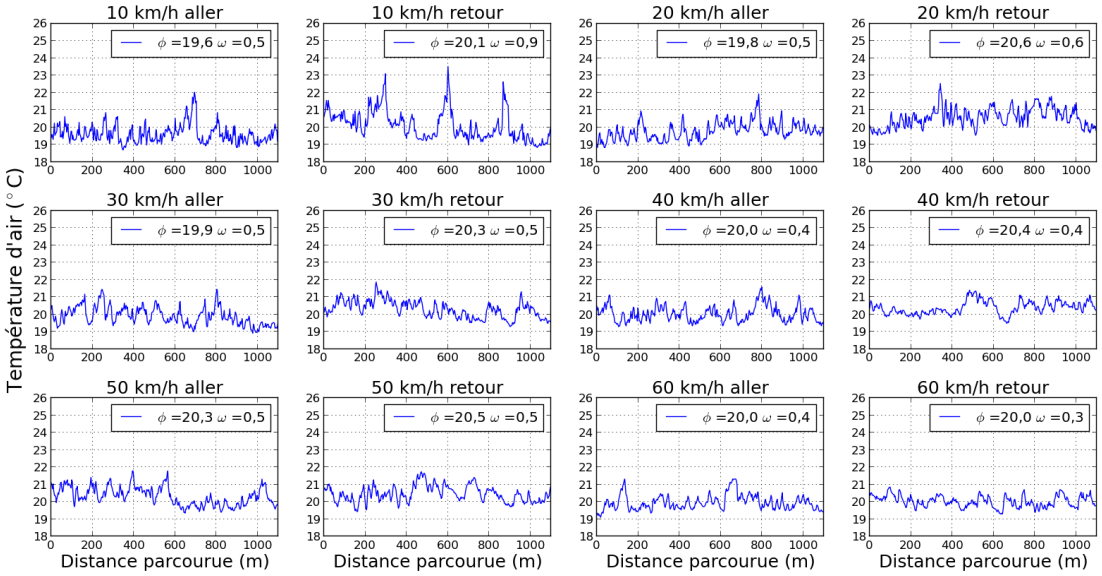


Figure B.3 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 28 mars 2012 en période diurne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt, avec ϕ la moyenne de l'échantillon, et ω l'écart type de l'échantillon.*

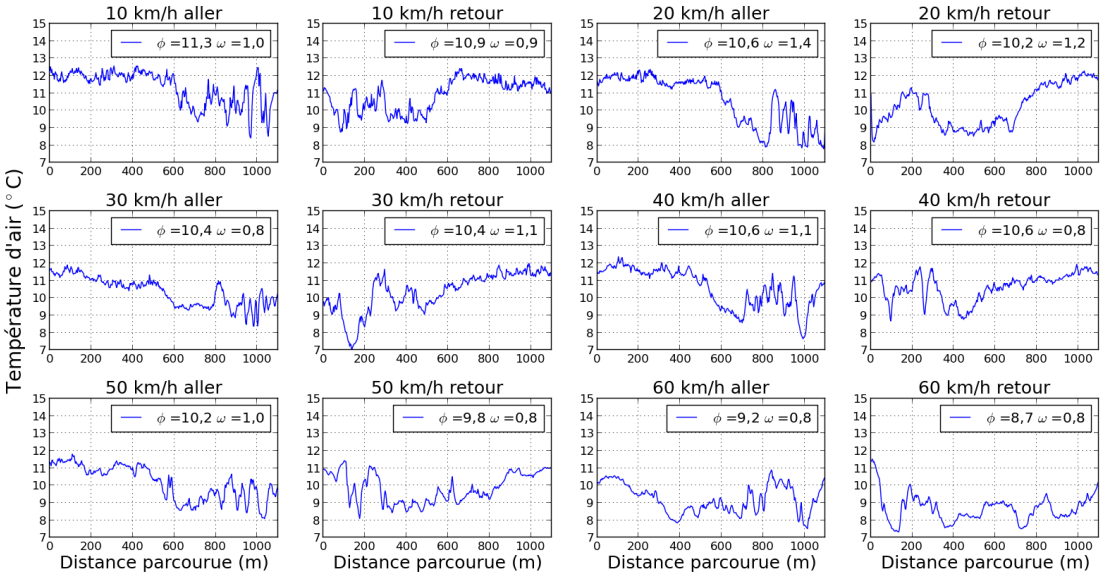


Figure B.4 : *Relevés de température d'air effectués à différentes vitesses le 28 mars 2012 en période nocturne sur la route départementale RD23F à proximité de Coincourt. ϕ correspond à la moyenne de l'échantillon, et ω à son écart type.*

Annexe C

Récapitulatif des sessions de mesure en périodes diurne et nocturne

Les sessions de mesure en gras ont été sélectionnées pour l'analyse de température d'air en condition de vent faible et de nébulosité faible. Les heures sont exprimées en heure locale, soit GMT+2. Les données de vitesse et de direction du vent ont été mises à disposition par Météo France, et les valeurs présentées correspondent à une moyenne sur la durée de la session.

Date	Lever du soleil	Début de session	Fin de session	Nebulosité (octas)	Vitesse du vent ($m.s^{-1}$)	Direction du vent (°)
17-07-2012	5h55	14h15	17h15	6	4.6	280
18-07-2012	5h56	13h55	16h35	4-6	5.2	230
01-08-2012	**6h14**	**13h35**	**16h00**	**0-1**	**2.5**	**100**
08-08-2012	6h23	14h05	16h30	3-5	1.5	variable
10-08-2012	**6h26**	**14h20**	**17h05**	**1-2**	**3.4**	**360**
16-08-2012	6h34	13h35	16h05	4-6	2.5	variable
19-08-2012	**6h38**	**14h00**	**16h30**	**0**	**3.9**	**190**
20-08-2012	6h40	14h30	17h00	7	2.4	variable
21-08-2012	6h41	14h35	17h00	7	3.1	160
22-08-2012	6h43	13h45	16h05	4-5	3.2	320
04-09-2012	7h01	13h45	16h30	2-4	5.4	40
05-09-2012	7h02	7h15	9h45	3-7	1.3	320
06-09-2012	7h03	7h10	10h00	1-2	4.6	30
07-09-2012	7h05	7h10	10h00	2-4	0.3	10
10-09-2012	7h09	14h05	16h20	5	3.5	170

Table C.1 : *Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période diurne entre le 17 juillet 2012 et le 10 septembre 2012.*

Date	Coucher du soleil à J-1	Début de session	Fin de session	Nebulosité (octas)	Vitesse du vent (m.s^{-1})	Direction du vent (°)
18-07-2012	21h26	0h20	2h45	4	0.9	variable
19-07-2012	**21h25**	**0h15**	**3h00**	**2**	**2.8**	**230**
02-08-2012	21h08	0h00	2h20	3-4	2.7	190
09-08-2012	**20h57**	**0h00**	**2h10**	**0**	**0.8**	**80**
11-08-2012	**20h54**	**0h05**	**2h10**	**0**	**4.7**	**30**
17-08-2012	**20h43**	**0h00**	**2h00**	**0**	**1.3**	**variable**
20-08-2012	**20h38**	**0h10**	**2h00**	**0**	**1.5**	**variable**
21-08-2012	**20h36**	**0h00**	**2h15**	**2**	**0.8**	**variable**
23-08-2012	**20h32**	**0h20**	**2h30**	**1**	**1.2**	**110**
05-09-2012	20h06	4h25	6h35	0-1	0.7	320
06-09-2012	20h04	4h40	6h50	2-6	4.6	20
07-09-2012	20h02	4h35	6h50	0-2	1.0	190

Table C.2 : *Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période nocturne entre le 18 juillet 2012 et le 7 septembre 2012.*

Date	Lever du soleil	Début de session	Fin de session	Nebulosité (octas)	Vitesse du vent (m.s^{-1})	Direction du vent (°)
01-07-2013	5h41	15h25	18h00	5	2,3	variable
08-07-2013	**5h46**	**15h10**	**17h50**	**1**	**6,2**	**60**
09-07-2013	5h47	15h10	17h50	4	5,4	60
10-07-2013	**5h48**	**15h10**	**18h05**	**1**	**4,5**	**20**
16-07-2013	**5h54**	**15h50**	**18h25**	**1**	**3,8**	**50**
17-07-2013	5h55	15h30	18h05	7	4,0	70
18-07-2013	5h56	15h15	17h40	6	5,4	60
21-07-2013	**6h00**	**15h05**	**17h20**	**1**	**3,2**	**90**
22-07-2013	6h01	15h20	17h40	3	1,7	variable
01-08-2013	**6h13**	**15h10**	**17h40**	**0**	**3,4**	**190**
05-08-2013	6h19	15h05	17h40	3	4,3	220
09-08-2013	6h24	14h55	17h20	7	2,0	330
14-08-2013	6h31	15h10	17h50	3	3,1	30
15-08-2013	**6h32**	**15h00**	**17h25**	**2**	**1,3**	**110**
16-08-2013	**6h34**	**14h55**	**17h30**	**1**	**2,4**	**200**
22-08-2013	6h42	14h20	16h45	7	4,9	70
30-08-2013	**6h53**	**14h05**	**16h45**	**2**	**2,9**	**320**
04-09-2013	**7h00**	**14h20**	**17h00**	**0**	**2,4**	**100**
05-09-2013	**7h02**	**14h05**	**17h50**	**0**	**2,5**	**180**
24-09-2013	**7h28**	**14h15**	**16h45**	**1**	**1,1**	**variable**

Table C.3 : *Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période diurne entre le 1er juillet 2013 et le 24 septembre 2013.*

Date	Coucher du soleil à J-1	Début de session	Fin de session	Nebulosité (octas)	Vitesse du vent ($m.s^{-1}$)	Direction du vent (°)
02-07-2013	**21h36**	**0h45**	**3h00**	**1**	**1,2**	**130**
09-07-2013	**21h33**	**0h40**	**3h15**	**0**	**1,4**	**50**
10-07-2013	**21h33**	**0h35**	**2h55**	**1**	**1,9**	**60**
11-07-2013	**21h32**	**0h20**	**2h45**	**1**	**3,4**	**50**
18-07-2013	21h27	0h45	3h10	4	2,0	40
19-07-2013	**21h26**	**0h45**	**3h05**	**2**	**2,7**	**60**
22-07-2013	**21h22**	**0h45**	**3h10**	**1**	**1,2**	**140**
23-07-2013	21h21	0h40	3h05	1-3	0,5	150
02-08-2013	**21h08**	**0h40**	**3h10**	**0**	**1,9**	**110**
06-08-2013	21h02	0h30	2h40	1-3	2,0	270
15-08-2013	**20h47**	**0h35**	**2h40**	**0**	**0,9**	**130**
16-08-2013	**20h46**	**0h45**	**2h45**	**1**	**0,6**	**variable**
17-08-2013	20h44	0h40	2h45	2-4	0,9	variable
23-08-2013	20h33	0h45	2h50	4	1,0	50
31-08-2013	20h17	23h15	1h20	4	0,5	150
05-09-2013	20h07	3h05	5h20	0	0,4	130
06-09-2013	20h04	3h00	5h05	0	1,2	90
25-09-2013	**19h24**	**0h30**	**2h40**	**1**	**0,6**	**variable**

Table C.4 : *Récapitulatif des sessions de mesures mobiles réalisées en période nocturne entre le 2 juillet 2013 et le 25 septembre 2013.*