



HAL
open science

Étude de la contribution de la végétation et de la géométrie urbaine à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg : mesures, modélisation et préconisations

Nathalia Philipps

► To cite this version:

Nathalia Philipps. Étude de la contribution de la végétation et de la géométrie urbaine à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg : mesures, modélisation et préconisations. Géographie. Université de Strasbourg, 2023. Français. NNT : 2023STRAD066 . tel-04614543

HAL Id: tel-04614543

<https://theses.hal.science/tel-04614543v1>

Submitted on 17 Jun 2024

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.

ÉCOLE DOCTORALE n°269 : Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur (MSII)

ICube – TRIO – UMR 7357

THÈSE présentée par :

Nathalia PHILIPPS

soutenue le : **13 novembre 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline / Spécialité : **Géographie / Climatologie**

**Étude de la contribution de la
végétation et de la géométrie urbaine à
l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain
à Strasbourg.**

Mesures, modélisation et préconisations.

THÈSE dirigée par :

M. NAJJAR Georges

Maître de conférences, Université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

M. MASSON Valéry

Directeur de recherche, CNRM, Toulouse

M. RICHARD Yves

Professeur des Universités, Université de Bourgogne, Dijon

EXAMINATEURS :

M. CLAPPIER Alain

Professeur des Universités, Université de Strasbourg

M. KASTENDEUCH Pierre

Maître de conférences, Université de Strasbourg (Co-encadrant)

Mme HECTOR Adine

Responsable département ÉCOTER, Eurométropole de Strasbourg

INVITÉE :

Mme LANDES Tania

Professeur des Universités, INSA de Strasbourg (Co-encadrante)

Résumé

Les particularités du milieu urbain conduisent à la mise en place d'un climat propre aux villes, dont une des caractéristiques les plus visibles est l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). Ce phénomène nocturne se traduit par des températures de l'air plus élevées en ville qu'à la campagne. Lutter contre l'ICU représente donc un véritable enjeu sanitaire pour les villes, qui cherchent à en limiter les conséquences négatives sur le confort thermique par le biais de solutions d'atténuation comme la végétalisation, les actions sur la géométrie urbaine, ou encore l'augmentation du pouvoir réfléchissant des matériaux.

De telles solutions s'avèrent toutefois souvent complexes à mettre en œuvre. D'une part, très peu de scénarios d'aménagement testés dans la littérature tiennent compte des contraintes de la zone sur laquelle ils sont éprouvés : ces cas d'étude restent de ce fait essentiellement théoriques et se révèlent pour la plupart inapplicables. D'autre part, les villes sont confrontées à de nombreux enjeux, dont certains peuvent s'opposer à l'atténuation de l'ICU : dès lors, trouver un compromis entre ces enjeux et la lutte contre l'ICU et le stress thermique s'avère indispensable. En outre, les caractéristiques de l'ICU varient en fonction des spécificités de chaque ville : mettre en place des solutions d'atténuation optimales implique donc de tenir compte de ce contexte. Enfin, l'effet d'une action de remédiation à la chaleur ne sera pas le même selon l'échelle spatiale : par conséquent, il est nécessaire d'analyser à différentes échelles les impacts d'une solution d'atténuation sur l'ICU et le stress thermique.

C'est donc dans ce contexte que s'inscrit cette thèse, dont l'objectif majeur est d'évaluer la contribution de plusieurs facteurs, en particulier la végétation et la géométrie urbaine, à l'atténuation de l'ICU strasbourgeois, et ceci afin d'établir des préconisations à destination des urbanistes et aménageurs. Dans un premier temps, un état des lieux de l'ICU est dressé à partir de données de terrain. Il commence par une évaluation temporelle du phénomène à plusieurs pas de temps : les dynamiques journalière et saisonnière de l'ICU sont donc exposées, ainsi que son comportement sous différents types de temps et lors de successions de belles journées. L'analyse de la structure spatiale de l'ICU s'effectue quant à elle via les Local Climate Zones (LCZ). Après une classification LCZ de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), chaque site d'étude est relié à un type de LCZ afin d'étudier la variabilité de l'ICU selon les différentes classes LCZ. Enfin, une tentative de cartographie de l'ICU maximal moyen de l'EMS est réalisée. Dans un second temps, l'ambiance climatique d'une zone urbaine est modélisée à plusieurs échelles spatiales. Pour cela, une tentative de couplage entre modèles de méso et micro-échelles est effectuée, à l'aide du système méso-climatique Méso-NH/SURFEX et des modèles microclimatiques LASER/F et ENVI-Met. Ces derniers sont d'abord contrôlés et validés à l'aide des données du jardin du Palais Universitaire : les comparaisons sont effectuées aussi bien pour des variables climatiques que pour des composantes du bilan d'énergie et des indices de confort. La faisabilité du couplage entre méso et micro-échelles est ensuite éprouvée via la comparaison des résultats de Méso-NH/SURFEX avec ceux de LASER/F et d'ENVI-Met sur le quartier Malraux. Pour finir, sa pertinence est évaluée à travers la confrontation de ses sorties avec des données issues d'une campagne de mesures menée sur la zone Malraux au cours de la thèse. La dernière partie traite de la contribution de différents facteurs influençant le confort thermique en milieu urbain. Elle réutilise le couplage entre méso et micro-échelles sur le quartier Malraux pour d'abord estimer le potentiel d'atténuation de trois scénarios s'appuyant sur la végétation et l'augmentation du pouvoir réfléchissant des matériaux de construction. Ensuite, les conséquences de trois scénarios de surélévation sur l'ambiance climatique de la zone Malraux sont déterminées dans l'objectif d'estimer dans quelle mesure il est possible de densifier une zone urbaine sans pour autant aggraver le stress thermique. Enfin, l'impact d'un projet urbain strasbourgeois en cours de conception sur l'ambiance climatique est évalué afin de constituer le premier exemple d'une démarche applicable à tous les futurs projets d'aménagement.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, confort thermique, modèles climatiques, végétation, géométrie urbaine, Local Climate Zone, échelle spatiale.

Abstract

Because of urban characteristics, the climate in cities differs from that in neighbouring rural areas. One of the most noticeable aspects of urban climate is the Urban Heat Island (UHI) effect. This nocturnal phenomenon results in higher air temperatures in the city than in the countryside. Therefore, UHI represents a real health challenge for urban areas. Consequently, cities are implementing mitigation strategies to reduce its negative consequences on thermal comfort, through vegetation, urban design, and cool materials.

However, such solutions are often difficult to implement. On the one hand, most of the evaluated mitigation scenarios do not take into account the constraints of the area in which they are tested: hence, these case studies remain essentially theoretical and unrealistic. On the other hand, cities are faced with many other challenges: some of which may oppose the mitigation of UHI. Therefore, finding a compromise between these challenges and the fight against UHI and heat stress seems to be essential. In addition, the characteristics of the UHI vary according to the specificities of each city: as a consequence, this context has to be considered in implementing optimal mitigation solutions. Finally, the effect of a solution will not be the same relative to the spatial scale: it is thus necessary to analyse the impacts of a mitigation strategy on the ICU and heat stress at different scales.

This thesis takes place within this context. It aims to evaluate the contribution of several factors, in particular vegetation and urban geometry, to the ICU mitigation in Strasbourg city. It will thus permit the establishment of recommendations for urban planners and designers. First, a study of the ICU of Strasbourg is performed based on field data. It begins with a temporal evaluation of the phenomenon at several time steps: the daily and seasonal dynamics of the ICU are thus exposed, as well as its behavior under different weather conditions, and during successions of calm and clear days. Then, the analysis of the spatial structure of the ICU is carried out by using the Local Climate Zones (LCZ). After an LCZ classification from the Eurométropole of Strasbourg (EMS), each study site is linked to an LCZ type to study the variability of the ICU according to the different LCZ classes. Finally, an attempt to map the average maximum ICU of the EMS is carried out. Secondly, the ambient environment of an urban area is modelled at several spatial scales. A coupling approach of meso and micro-scale models is applied: the Meso-NH/SURFEX meso-climatic system and the LASER/F and ENVI-Met microclimatic models are thus used for this purpose. First, these models are checked and validated by using data from the Palais Universitaire's garden: comparisons are made for climatic variables, energy balance components, and comfort indices. The feasibility of coupling of meso and micro-scales is then examined by comparing the results of Meso-NH/SURFEX with those of LASER/F and ENVI-Met in the Malraux district. Finally, its relevance is evaluated through the confrontation of its outputs with field data from a experimentation carried out in the Malraux area during the thesis. The last part deals with the contribution of different factors influencing thermal comfort in urban areas. It reuses the coupling of meso and micro models in the Malraux district. First, three potential mitigation scenarios based on greening and cool materials are assessed. Then, the consequences of three elevation scenarios on the outdoor thermal comfort of the Malraux area are determined. It aims to determine to what extent it is possible to densify an urban area without aggravating thermal stress. Finally, the impact of an urban project in Strasbourg being designed on the outdoor thermal comfort is estimated in order to constitute the first example of an approach that could be applicable to all future urban projects.

Keywords: urban heat island, thermal comfort, climate models, vegetation, urban geometry, Local Climate Zone, spatial scale.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Table des matières	iii
Liste des acronymes	vi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Analyse temporelle et répartition spatiale de l'ICU à Strasbourg	5
1.1. Les expérimentations de terrain et la base de données	6
1.1.1. Les projets PRIMEQUAL et RECLUS et leurs limites.....	6
1.1.2. La campagne de mesures INTERREG IV.....	7
1.2. Évolution temporelle	9
1.2.1. Dynamique journalière.....	10
1.2.2. Dynamique saisonnière	14
1.2.3. Ilot de chaleur urbain et types de temps	20
1.2.3.1. Rôle des variables météorologiques sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain	20
1.2.3.2. Cas particulier des successions de journées de beau temps.....	25
1.3. Structure spatiale	30
1.3.1. L'apport spécifique des Local Climate Zones	30
1.3.1.1. Méthodologie de classification LCZ appliquée à l'EMS	31
1.3.1.2. Rôle des facteurs liés à la géométrie urbaine et l'occupation du sol.....	33
1.3.1.3. Comportement thermique des LCZ.....	35
1.3.2. Cartographie de l'îlot de chaleur urbain	39
1.3.2.1. Application de la méthodologie de Unger.....	40
1.3.2.2. Analyse de la qualité du modèle et limites de la méthode	41
1.4. Conclusion du chapitre 1	43
Chapitre 2 : Modélisation numérique à différentes échelles	44
2.1. Validation des modèles	45
2.1.1. Présentation des modèles.....	45
2.1.1.1. Méso-NH/SURFEX.....	45
2.1.1.2. LASER/F.....	47
2.1.1.3. ENVI-Met	48
2.1.2. Zone d'étude, période de simulation et données associées.....	49
2.1.3. LASER/F.....	51
2.1.3.1. Validation des flux de chaleur	51
2.1.3.2. Évaluation de la TMRT et des indices de confort	53

2.1.4. ENVI-Met	57
2.1.4.1. Contrôle des variables climatiques.....	57
2.1.4.2. Vérification de la TMRT et des indices de confort	61
2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés	64
2.2.1. Principe et intérêt d'un couplage entre méso et micro-échelle	64
2.2.2. Application sur une zone à l'échelle du quartier.....	65
2.2.2.1. Présentation du site d'études	66
2.2.2.2. Résultats comparatifs entre Méso-NH/SURFEX et les modèles microclimatiques	67
2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel	75
2.3.1. Présentation de la campagne de mesures 2021	75
2.3.2. Comparaison des sorties des modèles microclimatiques avec les données de terrain	78
2.3.2.1. Les variables climatiques	78
2.3.2.2. L'indice de confort UTCI	86
2.4. Conclusion du chapitre 2	93
Chapitre 3 : Étude de la contribution de facteurs influençant le confort thermique urbain	94
3.1. Contexte urbanistique et réglementaire autour de l'enjeu climatique	95
3.1.1. Politiques publiques à l'échelle nationale.....	95
3.1.2. Déclinaison à l'échelle de l'Eurométropole de Strasbourg	96
3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles	97
3.2.1. Contexte de la zone d'étude et scénarios d'adaptation proposés.....	97
3.2.1.1. Présentation des différents secteurs composant la zone d'étude.....	98
3.2.1.2. Description des scénarios.....	100
3.2.2. Application des scénarios à méso et micro-échelles.....	101
3.2.3. Impact des scénarios sur la variabilité spatiale du confort thermique à micro-échelle ...	107
3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique	113
3.3.1. Présentation des scénarios et de leur contexte	113
3.3.2. Impact des scénarios	115
3.3.2.1. Effet de la densification verticale sur la température de l'air	115
3.3.2.2. Conséquences sur le confort thermique	118
3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier	126
3.4.1. État des lieux de la zone d'étude et description du projet d'aménagement.....	126
3.4.1.1. Présentation du projet d'aménagement Deux Rives et de la zone d'étude	127
3.4.1.2. Description des scénarios appliqués	128
3.4.2. Impact des différents scénarios sur l'ambiance climatique de la zone d'étude	129
3.5. Conclusion du chapitre 3	138
Conclusion générale	140

Bilan	140
Perspectives	144
Contributions	149
Publications	149
Publications dans des journaux.....	149
Publications dans des congrès internationaux.....	149
Posters.....	149
Encadrements	150
Références bibliographiques	151
Liste des figures	166
Annexes	173
Annexe A.1 : principales stations météorologiques de la campagne de mesures 2013-2016...	173
Annexe A.2 : principales stations météorologiques de la campagne de mesures 2021.....	181
Annexe B : distribution des fréquences d'apparition saisonnières des écarts de températures diurnes et nocturnes pour le couple Botanique-Entzheim.....	185
Annexe C : Fréquence des types de temps favorables à l'ICU sur la période 2009-2019 (adapté d'après Cantat (2004)).....	186
Annexe D : Taux de refroidissement/réchauffement cumulés des stations lors des successions de belles journées de fin août 2016 et 2019.....	187
Annexe E : Méthodologie de cartographie de l'îlot de chaleur urbain à partir du logiciel SAGA GIS (d'après Unger (2006)).....	188
Annexe F : formules des grandeurs statistiques utilisées.....	191
Annexe G : Paramétrage et forçage de LASER/F (d'après https://sites.google.com/view/laserf).....	192
Annexe H : Paramétrage et forçage d'ENVI-Met (d'après www.envi-met.info).....	199
Annexe I : Données météorologiques utilisées pour la conception des fichiers de forçage.....	207
Annexe J : Comparaison du flux de chaleur sensible et latente issus du site Schiltigheim Mairie avec ceux du Jardin du Palais Universitaire.....	217
Annexe K : formules d'obtention de la température moyenne radiante (TMRT) (d'après Thorsson et al. (2007)).....	219
Annexe L : Échelles de sensation de l'Universal Thermal Comfort Index (UTCI) et du Physiological Equivalent Temperature (PET) (d'après Höppe (1999) et Blazejczyk et al. (2010)).....	220
Annexe M : Adaptation des propriétés thermo-physiques de LASER/F et d'ENVI-Met à celles de Méso-NH/SURFEX.....	221
Annexe N : Graphiques complémentaires issus de la partie consacrée à l'utilisation combinée de modèles emboîtés.....	224
Annexe O : Graphiques complémentaires concernant les résultats de la campagne de mesures Malraux (le 20 juillet 2021).....	227

Liste des acronymes

Δ Tur	Différence entre température de l'air urbaine et température de l'air rurale
ANOVA	Analyse de la Variance
ATPU	Aménagement du Territoire et Projets Urbains
BSF	Fraction de surface bâtie (<i>Building Surface Fraction</i> en anglais)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIFRE	Convention Industrielle de Formation par la Recherche
DUT	Direction de l'Urbanisme et des Territoires
ECOTER	Écologie du Territoire
EMS	Eurométropole de Strasbourg
FLe	Flux de chaleur latente
G	Flux de chaleur dans le sol
H	Flux de chaleur sensible
HR	Humidité relative
ICU	Îlot de chaleur urbain
IFU	Îlot de fraîcheur urbain
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (<i>International Panel on Climate Change</i> en anglais)
ISF	Fraction de surface imperméable (<i>Impervious Surface Fraction</i> en anglais)
LAD	Densité foliaire (<i>Leaf Area Density</i> en anglais)
LASER/F	Latent Sensible Radiation Fluxes
MAE	Erreur moyenne absolue (<i>Mean Absolute Error</i> en anglais)
MBE	Erreur moyenne (<i>Mean Bias Error</i> en anglais)
MLR	Régression linéaire multiple (<i>Multiple Linear Regression</i> en anglais)
LCZ	Local Climate Zone
PCAET	Plan Climat Air Énergie Territorial
PET	Physiological Equivalent Temperature
PLU(i)	Plan Local d'Urbanisme (intercommunal)
R ²	Coefficient de détermination de Pearson
RN	Rayonnement Net
RMSE	Erreur quadratique moyenne (<i>Root Mean Square Error</i> en anglais)
SIG	Système d'Information Géographique
SRADDET	Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires
SVF	Sky View Factor
TMRT	Température moyenne radiante (<i>Mean Radiant Temperature</i> en anglais)
TRIO	Téledétection, Radiométrie et Imagerie Optique
TU	Temps Universel (<i>Universal Coordinated Time</i> en anglais)
UTCI	Universal Thermal Comfort Index
VgSF	Fraction de surface végétale (<i>Vegetated Surface Fraction</i> en anglais)

Introduction générale

Selon le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), la température à la surface du globe a déjà augmenté de 1,1°C par rapport à la période 1850-1900 (IPCC, 2021). Par ailleurs, les cinq années les plus chaudes jamais relevées à l'échelle mondiale ont toutes été enregistrées depuis 2015. Loin d'être épargnée, l'Europe fait même partie des régions se réchauffant plus vite que la moyenne mondiale : la hausse de la température en France s'élève ainsi déjà à +1,7°C depuis 1900, et pourrait atteindre des valeurs comprises entre +2,1 et +3,9°C d'ici la fin du siècle (Soubeyroux et al., 2020). Parmi les diverses conséquences résultant du réchauffement climatique, l'augmentation des vagues de chaleur, aussi bien en termes de fréquence que de durée et d'intensité, fait partie des plus visibles et des plus préoccupantes (Santé Publique France, 2019). En France, quel que soit le scénario envisagé, la fréquence de tels événements devrait doubler d'ici le milieu du siècle (Ouzeau et al., 2014 ; Météo France, 2022). Les températures relevées lors de la canicule de 2003 constitueraient alors la nouvelle norme estivale dès 2050 (De Munck et al., 2013).

Bien que les effets du changement climatique concernent l'ensemble des milieux, les villes en subissent les conséquences de manière exacerbée. Chacune des vagues de chaleur déjà enregistrées s'est en effet traduite par une surmortalité urbaine (Changnon et al., 1996 ; Garcia-Herrera et al., 2010 ; Barriopedro et al., 2011). La sensibilité accrue des villes aux impacts du changement climatique résulte de deux facteurs : d'une part, plus de 55% de la population mondiale vit désormais en zone urbanisée, un chiffre en constante augmentation puisque ce taux d'urbanisation devrait atteindre 70% en 2050 (World Bank, 2021). D'autre part, leurs spécificités génèrent la mise en place d'un climat propre au milieu urbain, dont le **phénomène d'îlot de chaleur urbain** (ICU) constitue une des manifestations les plus notables.

De toutes les anomalies caractérisant le climat urbain, l'ICU est sans contexte la plus connue et la plus étudiée. Mis en évidence dès le XIXème siècle à Londres (Howard, 1819), il correspond à la différence de température positive entre une zone urbaine et le milieu rural environnant et survient essentiellement en période **nocturne par temps clair et peu venteux** (Oke, 1987). Ce phénomène existe indépendamment du réchauffement climatique puisqu'il découle directement des modifications du bilan d'énergie induites par les caractéristiques du milieu urbain. Or bien que l'ICU soit **intrinsèque à la ville**, son intensité varie non seulement en fonction du moment de la journée, de la saison et des conditions météorologiques, mais aussi selon la géométrie urbaine et l'occupation du sol. De plus, le phénomène dépend également de critères pouvant fortement varier d'une ville à l'autre, comme son climat, sa topographie ou son nombre d'habitants (Oke et al., 2017). L'ICU s'avère donc être un phénomène **hétérogène aussi bien du point de vue temporel que spatial**. De ce fait, lutter contre l'ICU d'une agglomération implique avant tout de bien connaître ses principales caractéristiques et facteurs de contrôle, et par conséquent d'en **dresser un état des lieux le plus complet possible** par le biais de données de terrain.

Les expérimentations de terrain ne représentent pas le seul moyen d'analyser le phénomène d'ICU : outil complémentaire à l'approche expérimentale, la **modélisation numérique** permet d'obtenir des informations sur des zones pour lesquelles il n'existe pas de données de terrain, et de simuler le climat urbain à différentes échelles spatiales. À chaque échelle correspond une catégorie précise de modèles climatiques : ceux de **méso-échelle** modélisent l'impact d'une agglomération entière sur l'atmosphère (Lafore et al., 1998 ; Skamarock et al., 2008), tandis que ceux de **micro-échelle** reproduisent les processus se déroulant au sein des quartiers et des rues (Bruse & Fleer, 1998 ; Kastendeuch & Najjar, 2009). La plupart des études reposent sur l'emploi d'une seule catégorie de modèles (Imran et al., 2021), ou les utilisent séparément (Ooka, 2007). Pourtant, les faire fonctionner ensemble permettrait de profiter de leurs avantages respectifs (Kastendeuch & Najjar, 2015) : **la mise en place d'une chaîne de simulation multi-échelle** offrirait en effet la possibilité de modéliser

l'ambiance climatique de n'importe quelle zone urbaine à toutes les résolutions spatiales possibles. Encore faut-il s'assurer que cette technique fournisse des **résultats pertinents, sans perte de cohérence** entre les différentes échelles. Cela induit également de **valider** chaque modèle composant la chaîne de simulation, afin d'estimer dans quelle mesure il est capable de simuler les différentes variables définissant l'ambiance climatique d'une zone urbaine, notamment celles nécessaires à l'obtention d'indices de confort thermique.

Un des principaux atouts de la modélisation numérique est de pouvoir tester des hypothèses et des scénarios, et par conséquent **d'anticiper les conséquences d'un aménagement sur l'ICU et le stress thermique** ou de **déterminer le potentiel de solutions de remédiation à la chaleur urbaine**. L'impact positif de telles solutions a déjà été de nombreuses fois démontré dans la littérature (Oke et al., 2017 ; Tsoka et al., 2018). Parmi elles, la **végétalisation** apparaît comme particulièrement prometteuse : elle exerce un effet d'atténuation sur l'ICU (Sashua-Bar et al., 2011 ; Lee et al., 2016 ; Balany et al., 2020), et de surcroît fournit un nombre conséquent de services écosystémiques supplémentaires, comme la préservation de la biodiversité et l'amélioration de la qualité de l'air (Musy, 2014 ; Frantzeskaki, 2019). Certaines solutions impliquent d'agir sur la **géométrie urbaine**, notamment en favorisant les configurations qui permettent de limiter l'emmagasinement de chaleur (Wang & Akbari, 2014). Par ailleurs, le stockage de chaleur peut également être réduit via **l'augmentation du pouvoir réfléchissant des matériaux de construction** (Santamouris, 2013). Or la mise en place de ces solutions par les villes se révèle souvent plus complexe qu'il n'y paraît : la plupart des scénarios testés sont en effet très difficiles, voire impossibles à mettre en œuvre, car peu d'entre eux tiennent compte des contraintes de la zone sur laquelle ils s'appliquent (Santamouris et al., 2017). Par ailleurs, les agglomérations doivent répondre à de nombreux autres enjeux, dont certains peuvent s'avérer en contradiction avec l'atténuation de l'ICU. C'est notamment le cas du mouvement actuel de densification des villes, nécessaire pour restreindre l'étalement urbain mais exacerbant l'ICU nocturne. Face à ce constat, il semble donc important de chercher à **mettre en place des solutions d'atténuation à la fois les plus efficaces et les plus réalistes possible** du point de vue opérationnel. En outre, il s'agit également de **vérifier dans quelle mesure il est possible de concilier enjeux climatiques et urbanistiques** sans entraîner d'aggravation significative de l'ICU et du stress thermique.

C'est notamment pour répondre à ces problématiques que cette thèse a été réalisée. Elle s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche en climatologie urbaine menés par l'équipe de Télédétection, Radiométrie et Imagerie Optique (TRIO) du laboratoire ICube depuis 1999 à Strasbourg avec le projet PRIMEQUAL. Les nombreux projets qui ont suivi cette première analyse de l'ICU strasbourgeois ont permis à TRIO d'acquérir de solides connaissances et compétences aussi bien en matière d'expérimentations de terrain que de modélisations numériques, dans l'objectif de comprendre le climat urbain de Strasbourg, les processus qui le régissent et ses multiples manifestations.

Les résultats des études effectuées ont toujours eu vocation à servir aux urbanistes et aux aménageurs des collectivités territoriales. De ce fait, il a été décidé de mener conjointement ces travaux avec le département Écologie du Territoire (ECOTER) de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) via une thèse au **format Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE)**. Cette particularité présente de nombreux avantages puisqu'elle offre la possibilité d'intégrer aussi bien les problématiques liées à la recherche que celles plus opérationnelles des services d'urbanisme des collectivités. Les présents travaux de thèse prennent donc place dans un contexte pluridisciplinaire incluant à la fois recherche fondamentale et appliquée, laboratoire et collectivité territoriale, équipes de chercheurs et acteurs opérationnels.

Cette thèse se décline autour de trois objectifs majeurs : dans un premier temps, les travaux visent à fournir **un bilan le plus exhaustif possible sur l'ICU strasbourgeois** à partir de **mesures** issues des expérimentations de terrain menées par l'équipe TRIO. Ces données sont ensuite utilisées pour tester et alimenter des **modélisations** numériques du phénomène à différentes échelles, puis effectuer une tentative de **couplage entre modèles méso et microclimatiques**. Enfin, cette chaîne de simulation est

utilisée pour évaluer la contribution de plusieurs facteurs à l'atténuation de l'ICU et du stress thermique, en particulier celle de la **végétation** et la **géométrie urbaine**. Au final, l'ensemble de ces objectifs permettra d'élaborer des **préconisations** à destination des urbanistes et aménageurs de l'EMS.

Le manuscrit est structuré en **trois chapitres**. Afin d'équilibrer au mieux ces derniers, il a été choisi de ne pas réaliser de chapitre dédié à la réalisation d'un état de l'art. Cependant, chacun des trois chapitres fournira l'état de l'art nécessaire à la compréhension de leur contenu.

Le **premier chapitre** dressera un **état des lieux de l'ICU strasbourgeois**. Il repose sur l'analyse statistique de données de température de l'air provenant d'une base de données alimentée par trois expérimentations de terrain. Dans un premier temps, l'**évolution temporelle** de l'ICU sera étudiée à plusieurs pas de temps, en commençant par un examen de sa variabilité journalière. L'analyse de sa dynamique saisonnière s'effectuera quant à elle au moyen d'une méthode de normalisation originale proposée par [Runnalls & Oke \(2000\)](#). Le lien entre ICU et conditions météorologiques sera également abordé : l'accent sera mis sur les successions de belles journées estivales, amenées à se multiplier dans les décennies à venir. Dans un second temps, le chapitre se consacrera à l'étude de la **distribution spatiale** de l'ICU strasbourgeois. Celle-ci reposera sur l'utilisation des Local Climate Zones (LCZ) : de ce fait, une tentative de classification LCZ de l'EMS sera d'abord effectuée afin de relier chaque site d'étude à un type de LCZ. Cette association permettra alors d'étudier le comportement et l'intensité de l'ICU pour différentes classes LCZ. Enfin, les relations entre ICU et paramètres définissant les LCZ seront utilisées pour réaliser une cartographie de l'ICU strasbourgeois, effectuée à partir d'une méthodologie développée par [Bottván & Unger \(2003\)](#).

Le **second chapitre** portera sur la **modélisation numérique à différentes échelles**, et plus particulièrement sur la réalisation d'un **couplage entre échelles mésoclimatique et microclimatique**. Les modèles employés seront d'une part le système de méso-échelle Méso-NH/SURFEX ([Lafore et al., 1998](#)), et d'autre part les modèles microclimatiques LASER/F ([Kastendeuch & Najjar, 2009](#)) et ENVI-Met ([Bruse & Fleer, 1998](#)). Avant tout, les données de terrain utilisées lors du chapitre précédent serviront à réaliser une **phase de contrôle et de validation des modèles de micro-échelle** : les résultats de LASER/F et d'ENVI-Met seront ainsi comparés à des mesures issues d'un parc urbain, et ceci aussi bien pour des grandeurs climatiques que pour des variables de flux et des indices de confort. Afin de démontrer la **faisabilité du couplage** entre Méso-NH/SURFEX et les modèles microclimatiques, celui-ci sera ensuite appliqué une première fois sur le quartier Malraux de Strasbourg : il s'agira dès lors de vérifier que les résultats restent **cohérents** à l'échelle où se rejoignent les modèles mésoclimatique et microclimatiques. Pour finir, la **pertinence du couplage** entre méso et micro-échelles sera évaluée lors d'une deuxième application de ce dernier : ses résultats seront alors comparés avec les données d'une campagne de mesures réalisée sur le quartier Malraux au cours de la thèse.

Le **troisième chapitre** étudiera la **contribution de différents facteurs influençant le ressenti thermique en milieu urbain**. Il s'appuiera sur la modélisation de scénarios d'aménagement dont l'objectif sera soit d'atténuer l'ICU et le stress thermique, soit de limiter la dégradation de la situation initiale. Le couplage entre échelles mésoclimatique et microclimatique développé au cours du chapitre précédent sera réutilisé à cet effet. La première partie du chapitre exposera tout d'abord les **politiques publiques** nécessitant d'être prises en compte dans l'élaboration de scénarios réalistes du point de vue opérationnel. La deuxième partie évaluera ensuite le **potentiel d'atténuation de scénarios** s'appuyant sur la végétalisation et l'augmentation du pouvoir réfléchissant des matériaux de construction. Ces scénarios seront modélisés à méso et micro-échelles sur le quartier Malraux. La troisième partie cherchera à déterminer l'**impact de scénarios de densification sur l'ambiance climatique** du quartier Malraux. Le but sera d'estimer dans quelle mesure il est possible de densifier une zone urbaine sans aggraver le stress thermique. Enfin, le chapitre se terminera par l'**évaluation de l'impact sur l'ambiance climatique d'un projet urbain** en cours de conception à Strasbourg : cette dernière partie aura pour objectif d'être un premier exemple concret d'une démarche applicable à tous les futurs projets aménagements.

Chapitre 1 : Analyse temporelle et répartition spatiale de l'ICU à Strasbourg

Les analyses qui s'intéressent à l'ICU sont nombreuses et concernent toutes les régions du globe (Erell & Williamson, 2007 ; Sodoudi et al., 2014 ; Wang et al., 2015 ; Quaid et al., 2016 ; Ouyang et al., 2020), notamment les zones urbaines d'Europe (Giannopoulou et al., 2011 ; Fenner et al., 2014 ; Straub et al., 2019) et d'Amérique du Nord (Oke, 1982 ; Middel et al., 2014 ; Schatz & Kucharik., 2015). Elles couvrent tous les aspects du phénomène, relevant aussi bien de sa dynamique temporelle que de sa spatialisation, et ont déjà permis de constituer une documentation solide à son sujet. Cependant, chaque ville s'inscrit dans un contexte climatique, géographique, démographique et urbanistique qui lui est propre. Cette combinaison de facteurs influe sur l'expression de l'ICU et sur ses conséquences (Oke et al., 2017), et c'est pourquoi il est nécessaire d'adapter l'étude pour chaque territoire par le biais de mesures détaillées de terrain (Tzavali et al., 2015). Ces mesures in situ sont essentielles puisqu'elles permettent de mettre en évidence les particularités de l'ICU propres au contexte local, puis d'en déterminer et analyser les facteurs de contrôle.

À Strasbourg, l'étude de l'ICU a démarré il y a une vingtaine d'années et repose sur plusieurs expérimentations de terrain. La première de ces campagnes de mesures, spécialement consacrée à l'analyse de l'ICU, s'est ainsi déroulée durant deux semaines de l'été 1999 dans le cadre du projet PRIMEQUAL (Najjar et al., 2000 ; Fischer, 2001). Elle a conduit à l'obtention d'une première description de l'évolution journalière de l'ICU strasbourgeois et de sa répartition spatiale. Cette expérimentation n'a cependant pas pu appréhender l'ensemble des processus physiques à l'origine du phénomène, justifiant la mise en place d'une seconde campagne de mesures réalisée lors des mois de juillet et d'août 2002 pour le projet RECLUS (Najjar et al., 2004). Dédiée à l'analyse du rôle de la géométrie urbaine dans la mise en place de l'ICU, elle a permis de collecter les paramètres météorologiques nécessaires à l'étude des bilans radiatifs et d'énergie dans un canyon urbain. En outre, l'interprétation de ces paramètres a nécessité de passer par l'approche complémentaire de la modélisation numérique, aboutissant notamment à la création du modèle microclimatique LASER/F (Kastendeuch & Najjar, 2009). Bien que ces expérimentations aient contribué à mettre en évidence les caractéristiques essentielles du phénomène, elles se focalisaient sur des objectifs très précis et ne concernaient que de courtes périodes estivales. De ce fait, elles n'ont pas permis d'aboutir à une analyse exhaustive de l'ICU.

Par conséquent, l'un des objectifs de cette thèse consiste à obtenir un état des lieux aussi complet que possible de l'ICU strasbourgeois. Outre les expérimentations PRIMEQUAL et RECLUS précédemment citées, ces travaux peuvent en effet s'appuyer sur une troisième campagne de mesures qui s'est déroulée sur l'ensemble de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) entre 2013 et 2016 dans le cadre d'INTERREG IV, et dont le principal objectif était d'étudier le rôle de la végétation dans la création d'ambiances microclimatiques en milieu urbain (Najjar et al., 2015). À travers cette campagne de mesures, cette thèse bénéficie d'une série de données bien plus longue que celles utilisées lors des précédents travaux, représentant ainsi une période suffisante pour effectuer une analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'ICU la plus détaillée et la plus complète possible.

Tel est donc l'objectif de ce chapitre, dont la première partie présente brièvement l'ensemble des campagnes de mesures ayant alimenté la base de données qui y sera utilisée, ainsi que leurs objectifs. La deuxième partie traite de l'évolution temporelle de l'ICU, aussi bien en termes de dynamique journalière que saisonnière, et inclut également une étude du phénomène sous différents types de temps. Enfin, la distribution spatiale de l'ICU est étudiée au sein d'une troisième partie qui s'appuie notamment sur la méthodologie de classification des zones climatiques locales (ou « Local Climate Zones » (LCZ) en anglais) proposée par Stewart & Oke (2012).

1.1. Les expérimentations de terrain et la base de données

Au sein de cette partie, les diverses campagnes de mesures qui ont permis d'alimenter directement les travaux de cette thèse sont présentées. Elles ne représentent cependant qu'une partie des expérimentations menées par l'équipe TRIO sur Strasbourg : le lecteur intéressé pourra se référer aux travaux de [Kastendeuch et al. \(2016\)](#) et [Kastendeuch \(2022\)](#) pour disposer d'informations sur ces campagnes de mesures complémentaires.

1.1.1. Les projets PRIMEQUAL et RECLUS et leurs limites

Afin d'étudier l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg, une première expérimentation a été réalisée du 20 juillet au 15 août 1999, dans le cadre du projet PRIMEQUAL conduit par l'ASPA ([Najjar et al., 2000](#)). Son principal objectif était de parvenir à une meilleure connaissance de la structure et de l'évolution de l'ICU en fonction des paramètres climatologiques et de l'occupation du sol ([Najjar, 2006](#)). Elle reposait sur un réseau composé de 26 stations météorologiques, réparties sur l'ensemble de l'agglomération et gérées respectivement par l'Université, l'ASPA et Météo France. Parmi ces 26 sites, trois se trouvaient au sein de communes situées en dehors de l'EMS (Erstein, Hegeney et Stattmatten). Toutes les stations mesuraient au moins la température de l'air et l'humidité relative, et certaines relevaient également la vitesse et la direction du vent ([Fischer, 2001](#)). Ces mesures fixes ont été complétées par des mesures mobiles sur deux transects, ainsi que par des mesures de bilan radiatif sur trois sites installés dans des rues. Les résultats obtenus ont permis pour la première fois de mettre en évidence l'ICU au sein de l'agglomération strasbourgeoise : la dynamique journalière du phénomène a été analysée pour des périodes de beau temps et de ciel couvert, et des cartes de température au pas de temps horaire ont pu être établies. Le rôle exercé par la géométrie urbaine dans la détermination de l'intensité et la répartition spatiale de l'ICU, et dans une moindre mesure celui joué par la végétation, ont également été mis en évidence ([Najjar et al., 2000](#) ; [Fischer, 2001](#)). L'ensemble des résultats obtenus aura ainsi permis d'identifier de nouvelles directions de recherche et de bien cibler les objectifs des expérimentations suivantes.

Une deuxième expérimentation a eu lieu en juillet-août 2002 dans le cadre du projet RECLUS. L'objectif principal consistait à étudier les processus physiques à l'origine de l'ICU à travers les bilans radiatifs et d'énergie à plusieurs échelles (rue, quartier, agglomération), et de tester et valider des modèles numériques adaptés aussi bien à l'échelle du canyon urbain qu'à celle du quartier ([Najjar et al., 2004](#)). Elle s'inscrit ainsi dans la démarche de recherche initiée par la campagne précédente, et utilise les acquis de cette dernière afin de mieux cerner le rôle de la géométrie urbaine et des matériaux dans la mise en place de l'ICU. Quatre sites de mesures ont été implantés à Strasbourg :

1. Installé sur un échafaudage de 25 m de hauteur, le site principal était localisé au sein d'une rue et a permis de collecter l'ensemble des paramètres météorologiques nécessaires à l'étude des bilans radiatif et d'énergie au sein d'un canyon urbain (température de l'air, humidité relative, température de surface, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire et infrarouge, flux de chaleur sensible et latente).
2. Le même dispositif a été installé sur deux mâts situés dans deux quartiers proches du site principal afin d'obtenir des bilans radiatif et d'énergie à l'échelle du quartier.
3. Un dernier site a été mis en place sur un toit (bâtiment de l'IPCB) dans le but de mesurer les quatre composantes du rayonnement incident.

En outre, ces mesures micrométéorologiques fixes ont été complétées par des données de télédétection aux différentes échelles choisies. Les résultats obtenus ont permis une meilleure compréhension des processus à l'origine de l'ICU. De ce fait, ils ont contribué à valider et améliorer les

1.1. Les expérimentations de terrain et la base de données

modèles numériques utilisés, dont le schéma de surface TEB (Town Energy Budget) couplé avec le modèle atmosphérique Méso-NH (Masson, 2000), et le modèle microclimatique LASER/F développé au sein de l'équipe TRIO. Ils ont également fourni de nouvelles pistes de réflexion sur les facteurs modulant l'intensité de l'ICU.

Ces deux premières expérimentations ont livré les premiers éléments de compréhension du fonctionnement de l'ICU à Strasbourg, avec toutefois quelques limites : tout d'abord, elles concernaient des séries temporelles très réduites, limitées à la seule saison estivale et ne permettant donc pas d'obtenir une analyse exhaustive de l'ICU strasbourgeois. De plus, ces campagnes n'abordaient que très peu l'étude du rôle exercé par la végétation. Ces limites ont ainsi justifié la mise en place de l'expérimentation menée pour le programme de recherche d'INTERREG IV.

1.1.2. La campagne de mesures INTERREG IV

Troisième campagne de mesures de l'équipe TRIO et première à couvrir plusieurs années successives, l'expérimentation menée entre 2013 et 2016 s'est déroulée dans le cadre du programme INTERREG IV Atmo IDEE piloté par ATMO Grand Est. Elle a par la suite également été intégrée au projet ANR COOLTREES en collaboration avec le laboratoire PIAF (UMR 547 INRA) (Triollet et al., 2021), du fait de leur objectif commun concernant l'étude du rôle de la végétation arborée dans la création d'ambiances climatiques au sein du milieu urbain.

Cette campagne s'est matérialisée par la mise en place d'un réseau d'une vingtaine de stations météorologiques fixes, réparties sur l'ensemble de l'EMS et appartenant à différents organismes contributeurs (Figure 1). Un premier groupe de stations disposait de l'appareillage nécessaire à la mesure de la température de l'air et l'humidité relative. Elles étaient installées au niveau de mâts d'éclairage, à une hauteur de 3 à 4 mètres environ au-dessus du sol. Composé de trois sites majeurs, un second groupe de stations était dédié à la mesure des bilans radiatif et d'énergie. Le premier de ces sites, situé au sein du jardin du Palais Universitaire de Strasbourg, a permis d'obtenir des mesures des différentes composantes du bilan radiatif, ainsi que des données de flux de chaleur turbulents pour un site végétal. Les différents capteurs (pyranomètres, pyrgéomètres, anémomètres soniques...) étaient installés sur un mât de 20 mètres de haut situé au cœur du parc urbain. Le deuxième site était situé sur le toit de la mairie de Schiltigheim, cette dernière se trouvant au sein d'un quartier très urbanisé. Les capteurs étaient installés sur une tour relais à 35 mètres de hauteur. Déjà utilisé lors de l'expérimentation RECLUS, le site de flux radiatifs de l'IPC completait le dispositif. Un nombre limité de stations (Kléber, Jardin Universitaire, CARSAT, RER) étaient également équipées de globes gris et noirs pour le calcul d'indices de confort (Najjar et al., 2015).

La vingtaine de sites fixes recouvre une large gamme de morphologies soulignant l'hétérogénéité propre au milieu urbain : centre-ville, quartier résidentiel, parc urbain, zone péri-urbaine commerciale sont ainsi bien représentés. Les principales stations utilisées au sein de ce chapitre et leurs caractéristiques sont présentées plus en détail en annexe A. Certaines d'entre elles étaient déjà en activité lors du projet PRIMEQUAL, notamment les sites Météo France (Fischer, 2001). Le dispositif a été entièrement démonté après 2016, et il ne reste désormais plus que quelques stations ATMO Grand Est et Météo France en activité. La réalisation d'études ultérieures à cette thèse nécessitera donc l'installation d'un nouveau réseau de stations météorologiques.

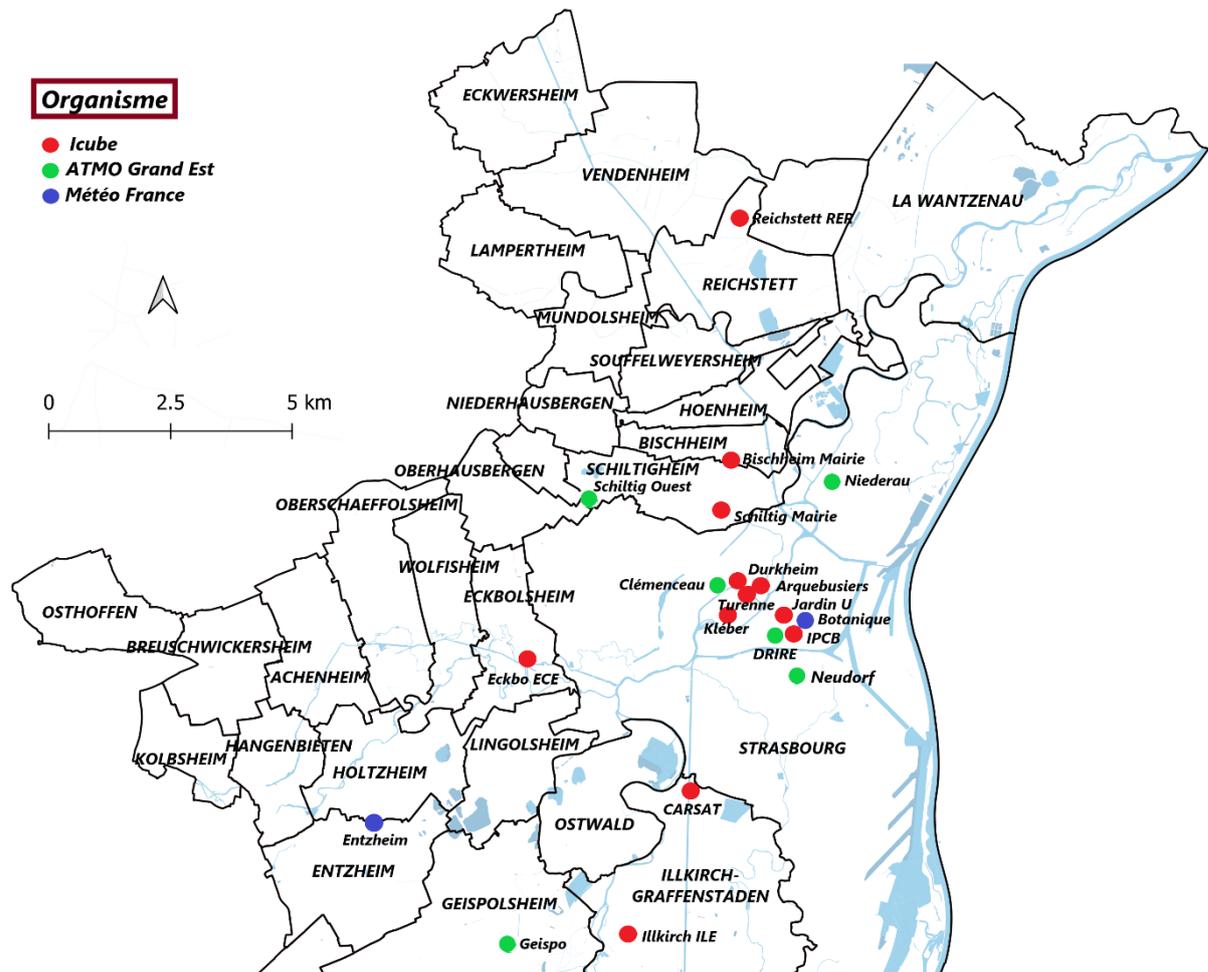


Figure 1 – Localisation des stations météorologiques mises en place lors de la campagne de mesures 2013-2016 à l'échelle du territoire de l'EMS par le laboratoire Icube, en plus des stations d'ATMO Grand Est et de Météo France.

La mise en place du réseau de stations avait pour objectif d'atteindre une représentativité spatiale la plus fidèle possible. Cette représentativité est essentielle non seulement pour cartographier l'ICU à l'échelle de l'agglomération, mais aussi pour définir les sites ruraux nécessaires à l'étude du phénomène. La question de la référence rurale constitue un aspect crucial en climatologie urbaine : un choix non réfléchi de station rurale de référence peut en effet entraîner d'importants biais dans l'analyse de l'ICU (Lowry, 1977 ; Runnalls & Oke, 2000 ; Martilli et al., 2020). Les investigations menées dans le cadre des travaux de Fischer (2001) n'avaient d'ailleurs pas permis de définir une référence rurale absolue : certains sites étudiés présentaient en effet une ou plusieurs particularités ne répondant pas totalement aux critères de ruralité (proximité d'une station d'épuration, présence d'un cours d'eau...). De plus, selon les conditions météorologiques synoptiques, tous les sites risquent de se situer à un moment sous l'influence du panache urbain provenant de l'agglomération strasbourgeoise. C'est le cas par exemple de la station d'Entzheim par vent de nord-est (Najjar, 2006).

Le choix d'une station rurale à proximité de cultures peut également poser problème du fait des importantes modifications d'occupation du sol au fil des saisons ou des années (Martilli et al., 2020). Par exemple, les champs cultivés situés à proximité du site d'Entzheim sont soumis à une rotation culturale qui entraîne un changement de végétation, et donc de conditions atmosphériques, d'une année à l'autre. La station d'Entzheim présente cependant l'avantage d'être extérieure à l'agglomération tout en étant située à la même altitude que Strasbourg. En outre, il s'agit du seul site mesurant l'ensemble des éléments nécessaires à l'analyse de l'ICU et à la classification des journées en fonction des types de

1.2. Évolution temporelle

temps (précipitations, durée d'insolation, vitesse du vent). Enfin, la station est ancienne et recouvre une série temporelle très longue, dont les données ont été numérisées depuis 1990. Compte tenu de ces avantages, le choix d'Entzheim comme station de référence rurale s'impose dans une étude sur l'ICU strasbourgeois. Dans l'idéal, il faudrait cependant soit disposer d'un site correspondant davantage aux critères de ruralité (par exemple une station éloignée de la ville, au sein d'une prairie à l'abri du panache urbain), soit d'une référence constituée de plusieurs stations rurales moyennées (Najjar, 2006). C'est d'ailleurs cette technique qui est employée lors de modélisations de l'ICU réalisées à l'échelle de l'agglomération, où la température rurale de référence est obtenue en moyennant l'ensemble des températures des mailles considérées comme campagnardes (Lemonsu et al., 2015). La question du choix d'une ou plusieurs stations rurales plus adaptées devra de ce fait être débattue dans le cadre de la mise en place d'un réseau de stations météorologiques permanent sur l'EMS.

Ce sont donc surtout les données issues de la campagne INTERREG IV qui serviront dans ce travail. Celles des expérimentations précédentes viendront étayer et compléter certains résultats obtenus.

1.2. Évolution temporelle

Plusieurs aspects de l'ICU sont communément admis et documentés, comme son caractère nocturne ou son occurrence accrue lors de journées estivales de beau temps (Oke, 1982 ; Arnfield, 2003 ; Deilami et al., 2018). De ce fait, les plus fortes intensités du phénomène surviennent essentiellement lors de belles nuits d'été (Kim & Baik, 2002 ; Oke et al., 2017). Malgré tout, il a déjà été démontré que des intensités prononcées d'ICU peuvent survenir en toutes saisons (Runnalls & Oke, 2000; Kim & Baik, 2005) et même lors de conditions météorologiques pourtant a priori défavorables (Cantat, 2004 ; Szymanowski, 2005). Il apparaît de ce fait nécessaire d'analyser l'ICU aussi bien journalier que saisonnier et sous différentes conditions météorologiques, tout en accordant une attention particulière aux journées de beau temps, celles-ci restant les plus propices au développement d'intensités prononcées d'ICU.

Cette partie a ainsi pour objectif de proposer une approche la plus exhaustive possible de la variabilité temporelle de l'ICU strasbourgeois, afin de cerner au mieux à quel moment de la journée et sous quelles conditions météorologiques des intensités élevées d'ICU peuvent commencer à apparaître. Elle démarre par l'étude de la dynamique journalière du phénomène, avec une focalisation sur les journées estivales de beau temps. L'ICU est ensuite analysé au pas de temps saisonnier, puis sous différents types de temps afin d'étendre l'étude à des cas plus atypiques d'ICU et d'estimer dans quelle mesure l'intensité du phénomène est tributaire des conditions météorologiques.

Au sein de cette partie, les analyses sont effectuées sur trois stations (Clémenceau, DRIRE et Botanique), choisies principalement pour l'étendue importante de leur série de données. Le site de la DRIRE présente la particularité d'être situé sur un toit plat à 20 mètres de hauteur. Cependant, Oke (2004) déconseille l'utilisation de stations météorologiques installées au sommet des bâtiments, notamment du fait que la surexposition des toits au rayonnement solaire entraîne des températures de l'air diurnes potentiellement surestimées. Or la station DRIRE dispose d'une série de données bien plus longue que celles d'autres sites mieux situés mais ayant fonctionné sur une période beaucoup plus restreinte, comme la station Kléber (cf. annexe A). Par précaution, les données du site de la DRIRE ont donc été comparées à celles de la station Kléber afin de s'assurer que leurs comportements respectifs ne divergent pas de manière significative : les résultats montrent une importante similitude entre les deux stations, avec un coefficient de corrélation (r) de 0,99 et une erreur-type de 0,37°C (Kastendeuch et al., 2019). Ces faibles écarts entre les deux stations nous permettent donc de conserver le site de la DRIRE comme station représentative du milieu urbain.

En plus de ces stations urbaines, le site d'Entzheim a été retenu en tant que station rurale de référence pour l'ensemble de l'étude. L'intensité de l'ICU est matérialisée par le ΔT_{ur} , qui représente l'écart de température horaire entre un site urbain (T_u) et la référence rurale (T_r), et est calculé selon la formule $\Delta T_{ur} = (T_u - T_r)$. Dans toutes nos analyses, les heures sont données en temps universel coordonné (UTC).

1.2.1. Dynamique journalière

Afin de mettre en évidence la dynamique journalière de l'ICU sans biais liés aux conditions météorologiques ou aux particularités saisonnières, l'analyse se focalise sur les journées estivales¹ de beau temps. Au sein de cette étude, les jours de beau temps sont définis comme étant des journées dépourvues de précipitations, présentant une fraction d'insolation (FINS) de 80% ou plus et une vitesse moyenne de vent inférieure ou égale à 3 m/s. Une valeur minimale de FINS fixée à 80% permet de garantir que l'échantillon n'est composé que de journées de beau temps. Le seuil de la vitesse du vent a été quant à lui fixé à 3 m/s car cette limite est régulièrement utilisée dans ce type de travaux (Eliasson & Holmer, 1990; Cantat, 2004 ; Chow & Roth, 2006).

L'évolution du ΔT_{ur} moyen horaire journalier sur l'ensemble des belles journées estivales est présentée au sein de la figure 2 (à gauche) pour les stations DRIRE et Clémenceau sur leur période d'observation commune (2013-2019). Loin d'être homogène à l'échelle journalière, le ΔT_{ur} subit d'importantes variations au cours de la journée, avec des comportements diurne et nocturne distincts. Le caractère essentiellement nocturne de l'ICU y ressort de manière explicite pour les deux sites puisqu'ils atteignent leurs $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ moyens respectifs aux alentours de minuit ($\Delta T_{ur \text{ Max}} \text{ moyen (Clémenceau)} = 4,3^\circ\text{C}$ et $\Delta T_{ur \text{ Max}} \text{ moyen (DRIRE)} = 5,2^\circ\text{C}$). De plus, les deux stations affichent un comportement très proche durant la nuit ($R^2 = 0,95$), et ceci malgré le fait que DRIRE se situe sur un toit et Clémenceau au niveau d'une petite place (cf. annexe A). Ce comportement apparaît donc représentatif de la dynamique de l'ICU à proximité du centre-ville strasbourgeois.

Les motifs des deux courbes diffèrent davantage en période diurne. Le fait que la station DRIRE soit située en toiture explique pourquoi les valeurs des ΔT_{ur} diurnes y sont systématiquement positives ($\Delta T_{ur \text{ Min}} \text{ moy (DRIRE)} = 0,4^\circ\text{C}$) et nettement plus élevées que celles relevées à Clémenceau : pleinement exposés au rayonnement solaire dès le matin, les sites de mesure localisés sur les toits se réchauffent plus rapidement que ceux situés au sein d'un canyon, qui restent au frais grâce à l'ombre procurée par les bâtiments (Oke, 2004). Clémenceau présente d'ailleurs sur plusieurs heures consécutives des ΔT_{ur} moyens négatifs ($\Delta T_{ur \text{ Min}} \text{ moy (Clémenceau)} = - 0,8^\circ\text{C}$), mettant en évidence un phénomène d'îlot de fraîcheur urbain (IFU) diurne durant lequel les températures urbaines deviennent donc légèrement plus fraîches que les rurales. Déjà mis en évidence au sein d'autres villes (Yang et al., 2017 ; Goncalves et al., 2018), cette particularité traduit ici un effet de site résultant des caractéristiques de la géométrie urbaine locale (cf. annexe A) : contrairement à la DRIRE qui est exposée au soleil toute la journée, la station Clémenceau reste à l'ombre le matin, du fait des bâtiments situés à l'est de la place qui empêchent le rayonnement solaire direct de pénétrer au fond de la rue. Le ΔT_{ur} du site redevient positif dès l'après-midi, lorsque la place, qui est plus ouverte au sud-ouest, est à nouveau éclairée. Cet effet local illustre ainsi pleinement le rôle exercé par la géométrie urbaine sur la dynamique de l'ICU.

L'examen des courbes obtenues à partir des données de l'ensemble des journées estivales montre un comportement similaire, mais avec des valeurs de ΔT_{ur} nocturnes nettement amoindries (Figure 2, à

¹Ce sont les saisons météorologiques qui sont utilisées au sein de ce chapitre. Elles débutent plus tôt que les saisons astronomiques et correspondent à des périodes d'un trimestre complet. L'hiver est ainsi constitué des mois de décembre, janvier et février ; le printemps de mars, avril et mai ; l'été de juin, juillet et août ; et l'automne de septembre, octobre et novembre.

1.2. Évolution temporelle

droite). La similitude constatée entre les deux échantillons souligne l'influence prépondérante des journées de beau temps sur le comportement moyen de l'ICU.

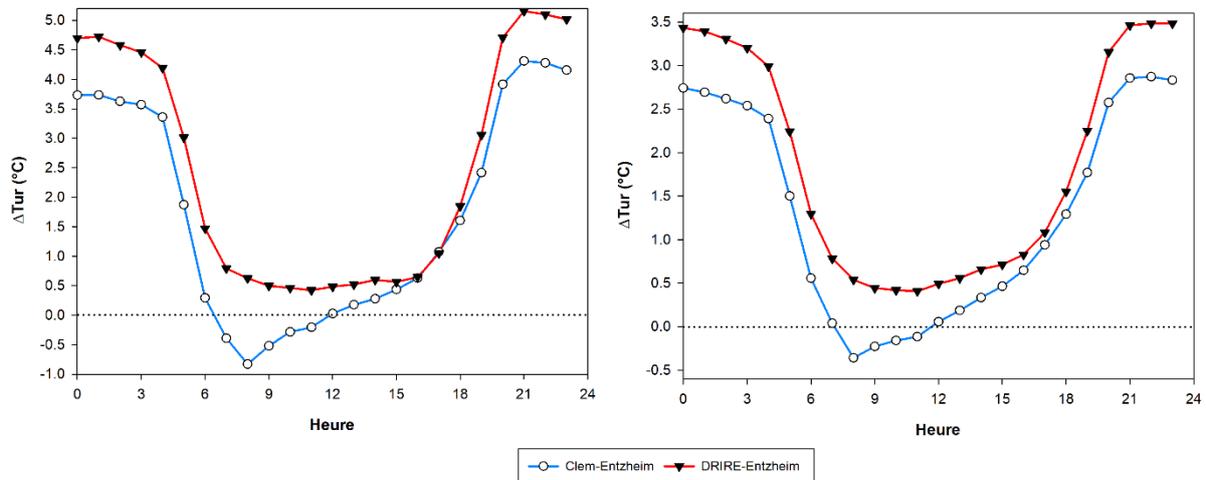


Figure 2 – Évolution du ΔT_{ur} moyen en fonction de l'heure lors des journées estivales de beau temps (à gauche) et sur l'ensemble de l'été (à droite).

Les deux stations analysées soulignent l'existence d'une dynamique journalière opposant une période nocturne associée à des intensités prononcées de l'ICU à une période diurne durant laquelle le phénomène atteint ses valeurs minimales, ce qui est régulièrement exposé dans les diverses études du phénomène (Oke, 1982 ; Jauregui, 1997 ; Memon et al., 2009). Cependant, cette dynamique temporelle globale est influencée par les caractéristiques propres à l'environnement immédiat de chaque station, et notamment celles liées aux moments où le site de mesures se trouve à l'ombre du bâti ou au contraire exposé au rayonnement solaire. Les valeurs et le comportement du ΔT_{ur} moyen horaire illustrent ainsi la forte dépendance entre intensité de l'ICU, emplacement du site de mesures et cycle solaire journalier. Or une telle analyse présente justement d'importantes limites puisqu'elle ne tient pas compte des heures de lever et de coucher du soleil. Elle ne permet donc nullement de s'affranchir des effets des changements saisonniers et mensuels de durées du jour et de la nuit.

Afin d'être exempté de tout biais relevant de la longueur de la période diurne ou nocturne, une normalisation de l'axe temporel est réalisée au sein de la figure 3 à partir des données ayant servi à la réalisation des courbes de la figure 2. Proposée par Runnalls & Oke (2000), cette standardisation consiste à adopter un axe de temps normalisé tout en considérant que les périodes diurne et nocturne ont chacune la même durée. Sur cette échelle temporelle allant de 0 à 1, le jour et la nuit sont délimités par le lever et le coucher du soleil, aux valeurs respectives de 0,25 et 0,75. La valeur 0,5 est associée au midi solaire et les valeurs 0 et 1 représentent les minuits solaires successifs.

La normalisation de l'axe temporel permet de situer précisément le moment de la journée où l'ICU atteint son paroxysme et celui où il présente sa valeur minimale (Figure 3). Le ΔT_{ur} commence à croître autour du midi solaire, en fin de matinée ou début d'après-midi selon la station considérée. Les valeurs maximales sont atteintes un peu avant le minuit solaire pour les deux sites, et l'ICU décroît systématiquement et rapidement à partir du lever du soleil. Le motif de la dynamique temporelle estivale de la DRIRE se rapproche fortement de la forme sinusoïdale décrite par Runnalls & Oke (2000), tandis que celui de Clémenceau s'en distingue nettement en matinée du fait de l'effet de site. Plusieurs études ont obtenu des résultats similaires pour des villes des zones tempérées sans influence topographique particulière (Grimmond & Oke, 1995 ; Fenner et al., 2014, Bernard et al., 2017 ; Yang et al., 2019). Or d'autres travaux mentionnent des ΔT_{ur} max journaliers survenant bien plus tard, notamment au niveau de zones urbaines situées au sein de zones climatiques tropicales (Arifwidodo & Tanaka, 2015 ; Amorim & Dubreuil, 2017). Bien qu'un des principaux intérêts de la normalisation réside dans la comparaison

de dynamiques temporelles d'ICU de villes situées sous différentes latitudes (Oke, 1998), son emploi reste encore très marginal. Ces résultats sont de ce fait malheureusement difficilement comparables aux nôtres. Dans tous les cas, l'utilisation de la normalisation reste un atout dans l'étude de l'ICU puisqu'elle permet également d'établir des comparaisons pour une même ville sous différentes saisons : nous y reviendrons par la suite.

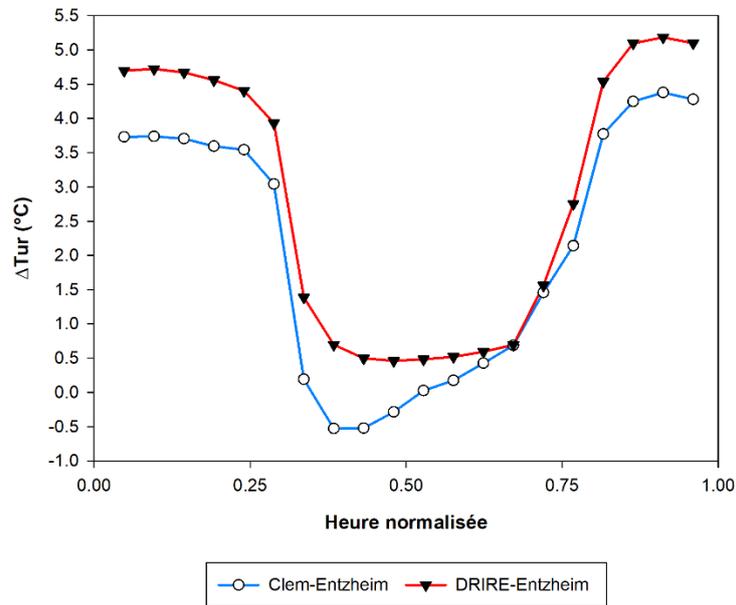


Figure 3 – Évolution du ΔT_{ur} moyen en fonction du temps standardisé lors des journées estivales de beau temps sur la période 2013-2019.

La présence d'un ICU résulte avant tout d'une incapacité du milieu urbain à se refroidir aussi rapidement que les zones rurales environnantes à partir du coucher du soleil (Oke et al., 2017). Le caractère principalement nocturne du phénomène découle ainsi de ces différences de taux de refroidissement entre ville et campagne. L'étude du taux de réchauffement/refroidissement urbain et rural permet d'obtenir une indication précise sur le moment à partir duquel le comportement thermique des surfaces urbaines et rurales se modifie (Najjar, 2006). Ces taux sont calculés comme la variation horaire de la température : $T_{t+1} - T_t$.

La figure 4 présente les taux de réchauffement/refroidissement moyens horaires lors de belles journées estivales pour les stations DRIRE et Entzheim. La normalisation de l'axe temporel a été conservée afin de mettre en évidence le rôle exercé par le cycle solaire journalier. La première étape conduisant à la mise en place d'un ICU se produit ainsi lors du coucher du soleil, moment où les courbes divergent du fait d'un refroidissement nettement plus prononcé en milieu rural. En raison de ces taux différenciés, l'ICU s'accroît progressivement jusqu'aux alentours de minuit, lorsque les courbes finissent par converger. Celles-ci divergent à nouveau à partir du lever du soleil du fait du réchauffement plus rapide des surfaces rurales, avant de se rejoindre aux alentours du midi solaire. Les taux de réchauffement diurne plus faibles en milieu urbain entraînent ainsi l'atténuation progressive de l'ICU en journée. Les écarts-types légèrement plus importants pour les taux d'Entzheim (0,65 °C/h et 0,44°C/h) soulignent le rôle prépondérant joué par le comportement de la zone rurale dans la détermination de l'intensité du phénomène.

1.2. Évolution temporelle

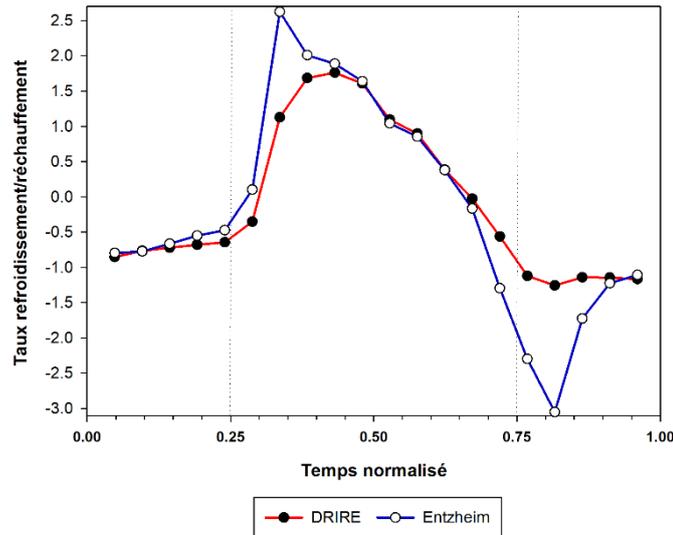


Figure 4 – Évolution des taux de refroidissement/réchauffement moyens en fonction du temps standardisé lors des journées estivales de beau temps. Le lever et le coucher de soleil sont identifiés par les barres verticales.

Une autre manière d’analyser ces taux de réchauffement/refroidissement consiste à les cumuler à partir de 15h, heure vers laquelle le champ de température peut être considéré comme relativement homogène sur l’ensemble de l’agglomération (Figure 5). Cela permet de mettre davantage en évidence les différences de vitesses de refroidissement/réchauffement des surfaces urbaines et rurales. Les courbes des stations DRIRE et Entzheim divergent ainsi rapidement, soulignant le refroidissement plus lent de la zone urbaine par rapport au milieu rural. Les différences maximales surviennent aux alentours du coucher du soleil, peu de temps avant le paroxysme de l’ICU qui est atteint au moment où les courbes évoluent de manière parallèle. La convergence des courbes démarrant après le lever du soleil indique une atténuation progressive du phénomène, la valeur minimale de l’ICU survenant au moment de leur recoupement. Déjà illustrés lors d’une étude plus ancienne (Najjar, 2006), ces résultats montrent bien que le phénomène d’ICU traduit non pas une facilité du milieu urbain à se réchauffer, mais plutôt ses difficultés à se refroidir rapidement.

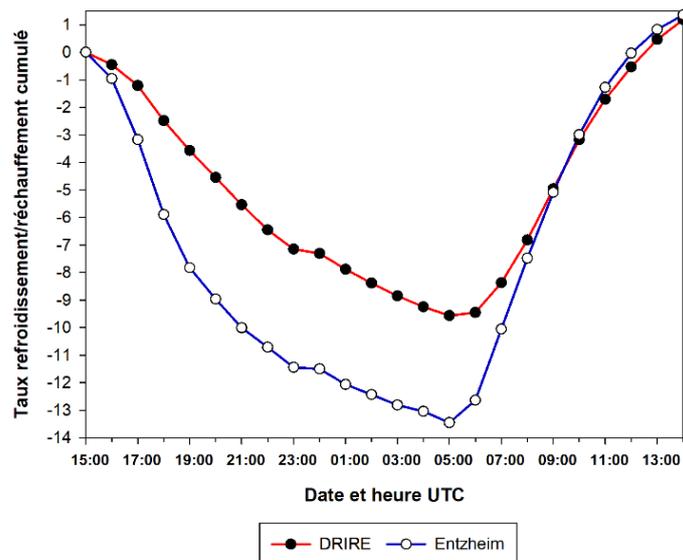


Figure 5 – Évolution des taux de refroidissement/réchauffement moyens cumulés à partir de 15h lors des journées estivales de beau temps.

Les analyses précédentes soulignent toutes la nature nocturne de l'ICU, le phénomène survenant essentiellement après le coucher du soleil. La fréquence d'occurrence du $\Delta T_{ur\ Max}$ des stations DRIRE et Clémenceau confirme cet aspect (Figure 6) : les deux sites présentent des fréquences relativement proches, l'ICU maximum apparaissant ainsi plutôt en première partie de nuit (respectivement 66% et 75% des $\Delta T_{ur\ Max}$), peu de temps avant le minuit solaire. Toutefois, même lors des journées estivales de beau temps, il persiste une certaine variabilité de l'heure d'apparition de l'ICU maximal : une part non négligeable de $\Delta T_{ur\ Max}$ ont en effet lieu en seconde partie de nuit, dont certains quasiment au moment du lever du soleil (environ 4,5% des $\Delta T_{ur\ Max}$ pour les deux stations). Il semble intéressant de noter que les quelques jours concernés par un $\Delta T_{ur\ Max}$ survenant aussi tardivement sont tous précédés par une période de précipitations : les taux de refroidissement/réchauffement d'Entzheim relevés lors de ces journées laissent supposer que la station rurale se refroidit plus lentement du fait d'un sol encore humide, ce qui entraînerait par conséquent une apparition plus tardive du $\Delta T_{ur\ Max}$.

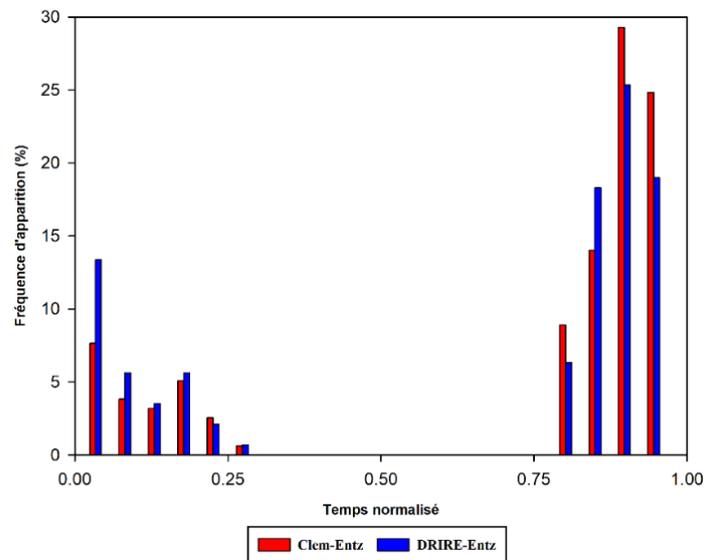


Figure 6 – Fréquence d'apparition du $\Delta T_{ur\ max}$ des stations Clémenceau et DRIRE en fonction de l'heure normalisée lors des journées estivales de beau temps issues de la période 2013-2019.

L'emploi de la normalisation au sein de cette section a contribué à mettre en évidence le rôle exercé par le moment du lever et du coucher du soleil dans la mise en place de l'ICU. Cela implique que la variabilité journalière du phénomène s'accompagne de fluctuations saisonnières, d'autant plus au sein d'une zone tempérée aux saisons caractérisées par des durées variables du jour et de la nuit.

1.2.2. Dynamique saisonnière

Il est communément admis qu'au sein des climats tempérés, les ICU les plus prononcés se produisent essentiellement en été, lorsque la plupart des facteurs exerçant un rôle sur le phénomène présentent leurs conditions optimales (Klysiak & Fortuniak, 1998 ; Imhoff et al., 2010). Or il est courant de retrouver de forts ICU nocturnes lors des saisons d'équinoxe (Runnalls & Oke, 2000), et même en plein hiver (Hinkel et al., 2003, Straub et al., 2019). Il semble donc nécessaire de ne pas restreindre l'étude de l'ICU strasbourgeois aux seules journées estivales de beau temps, et d'analyser dans quelle mesure l'ensemble des saisons exercent une influence sur l'intensité et l'évolution temporelle du phénomène.

Pour l'analyse de la dynamique saisonnière de l'ICU à Strasbourg, il a été choisi d'utiliser les données de la station urbaine de la DRIRE, qui bénéficie d'une plage de données suffisamment longue pour cerner la saisonnalité du phénomène, mais également celles du Jardin Botanique. Le choix de ce

1.2. Évolution temporelle

site particulier, assimilable à un parc urbain, se justifie par la possibilité d'exposer le rôle de la végétation sur l'ICU. Ce sont les journées de beau temps issues des saisons météorologiques qui sont employées au sein de cette section. La série de données utilisée pour les deux stations s'étend de 2009 à 2019.

La figure 7 souligne le fait que l'hétérogénéité saisonnière de l'ICU se manifeste différemment selon les caractéristiques de la station considérée. Le ΔT_{ur} moyen horaire de la station DRIRE varie ainsi relativement peu d'une saison à l'autre (Figure 7, à gauche), l'ICU moyen maximal restant stable tout le long de l'année ($\Delta T_{ur \text{ Max}}$ moyen hivernal = 4,9°C et $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ moyen estival = 5,3°C). Seul l'hiver présente un comportement distinct : du fait des nuits plus longues, les ΔT_{ur} les plus prononcés apparaissent plus tôt et diminuent plus tardivement. En outre, l'ICU se maintient à un certain niveau en journée ($\Delta T_{ur \text{ Min}}$ moyen hivernal = 0,7°C), au contraire des autres saisons durant lesquelles le phénomène demeure négligeable en période diurne ($\Delta T_{ur \text{ Min}}$ moyen < 0,4°C). Cette spécificité hivernale peut éventuellement s'expliquer par une augmentation des émissions de chaleur anthropique occasionnée par la mise en route du chauffage à cette période de l'année.

Quelle que soit la saison, les valeurs du ΔT_{ur} moyen horaire du Jardin Botanique s'avèrent beaucoup plus faibles que celles relevées pour la DRIRE, traduisant l'effet d'atténuation du parc sur l'ICU (Figure 7, à droite). De plus, à l'opposé de la station DRIRE, la dynamique de l'ICU au Jardin Botanique diffère sensiblement d'une saison à l'autre. Les courbes sont ainsi caractérisées par deux minimums en journée, l'un survenant au cours de la matinée et le second vers le milieu de l'après-midi, ainsi que par un ICU diurne apparaissant aux alentours de midi. Ces particularités sont plus ou moins prononcées selon les saisons et illustrent l'influence de la végétation présente au sein du site : la station étant située au sein d'une petite clairière entourée d'arbres à feuilles caduques (cf. annexe A), son éclairage au cours de la journée dépend de l'ombre portée de ces derniers. Toutefois, nous ne disposons pas de tous les éléments pouvant expliquer la survenue d'un ICU diurne aussi marqué, notamment lors de la saison estivale : la résolution de cette question nécessitera de mener des investigations supplémentaires.

Par ailleurs, l'absence de couronne foliaire des arbres lors de la saison hivernale se traduit par un comportement de l'ICU se rapprochant de celui d'une station urbaine : la courbe hivernale présente en effet une allure nettement différente des autres saisons, avec un ICU méridien moins significatif et une absence de second minimum diurne. Une telle proximité avec un site urbain minéralisé comme la DRIRE résulte de la disparition saisonnière de l'effet d'ombrage, couplée à l'absence notable d'évapotranspiration. Cette dynamique très particulière souligne le rôle primordial des arbres sur le fonctionnement du parc urbain en période diurne.

Les $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ moyens plutôt proches entre les différentes saisons ($\Delta T_{ur \text{ Max}}$ moyen hivernal = 2,1°C et $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ moyen estival = 1,8°C) semblent cependant montrer que les arbres du Jardin Botanique n'agissent que modérément sur l'ICU nocturne. Cet aspect est souligné dans plusieurs travaux sur le potentiel de rafraîchissement des parcs urbains (Spronken-Smith & Oke, 1998 ; Potchter et al., 2006 ; Bowler et al., 2010). Certaines études démontrent même que la végétation arborée pourrait contrarier le refroidissement radiatif, en captant et en réémettant le rayonnement infrarouge reçu (Taha et al., 1991 ; Huang et al., 2008). Les ΔT_{ur} moyens nocturnes du Jardin Botanique beaucoup plus atténués que ceux de la DRIRE résulteraient alors également de l'action d'autres éléments propres à un parc urbain, comme l'importante présence de végétation herbacée. En limitant l'emménagement de chaleur en journée et par conséquent le déstockage nocturne, la pelouse assure un meilleur refroidissement radiatif de la surface la nuit. Le parc conserve ainsi une certaine fraîcheur nocturne par rapport aux zones bâties l'environnant.

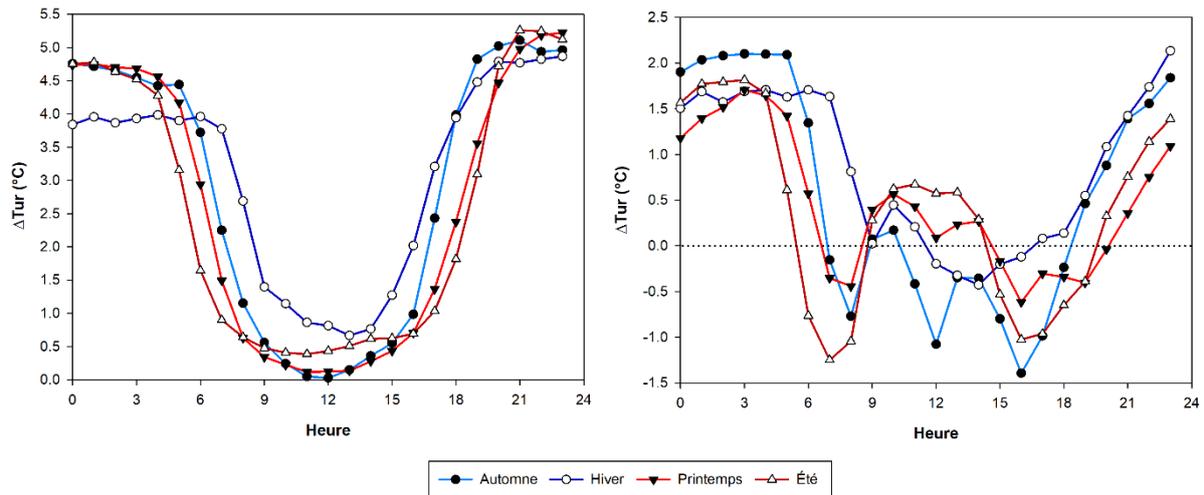


Figure 7 – Évolution des ΔT_{ur} moyens saisonniers pour les jours de beau temps en fonction de l'heure pour DRIRE-Entzheim (à gauche) et Botanique-Entzheim (à droite) pour la période 2009-2019.

L'interprétation de ces résultats reste cependant limitée par les changements de durées des périodes diurnes et nocturnes en fonction des saisons. En permettant de s'affranchir des limites induites par les durées différenciées du jour et de la nuit, la normalisation de l'axe temporel apporte des informations supplémentaires sur le moment exact de survenue de l'ICU (Figure 8). En premier lieu, on peut remarquer que les courbes de la saison DRIRE présentent une allure très similaire d'une saison à l'autre (Figure 8, à gauche). Le lever et le coucher du soleil sont associés respectivement à la disparition et l'apparition progressive de l'ICU, et le phénomène atteint son intensité minimale aux alentours du midi solaire. La courbe sinusoïdale, caractéristique des stations urbaines et minérales, apparaît donc représentative du phénomène pour l'ensemble de l'année.

L'utilisation d'un axe temporel normalisé permet également de mettre davantage en évidence le rôle joué par la végétation au sein du Jardin Botanique (Figure 8, à droite). Certes, quelle que soit la saison, l'ICU apparaît toujours peu de temps après le coucher du soleil et commence à disparaître dès le lever du soleil. On peut néanmoins noter que l'ICU nocturne apparaît un peu plus tardivement au printemps : cela peut potentiellement s'expliquer par le fait qu'à cette saison, les champs de la station rurale d'Entzheim sont recouverts de cultures n'ayant pas encore été récoltées, ce qui atténue alors le contraste avec le Jardin Botanique. Par ailleurs, le ΔT_{ur} moyen diurne présente ses valeurs les plus négatives en automne ($\Delta T_{ur, Min}$ moyen = $-1,4^{\circ}C$). La raison peut également se trouver du côté du comportement de la référence rurale : durant l'automne, les champs autour de la station d'Entzheim sont quasiment dénués de végétation puisque la majorité des récoltes y ont déjà été effectuées. Le sol mis à nu s'échauffe donc plus rapidement et le contraste s'accroît avec le Jardin Botanique, très végétalisé et au sein duquel les arbres n'ont pas encore perdu la totalité de leurs feuilles. Que ce soit au travers de son rôle au sein du parc urbain ou de la station rurale de référence, la végétation apparaît ainsi comme étant un facteur de contrôle majeur de l'ICU saisonnier.

1.2. Évolution temporelle

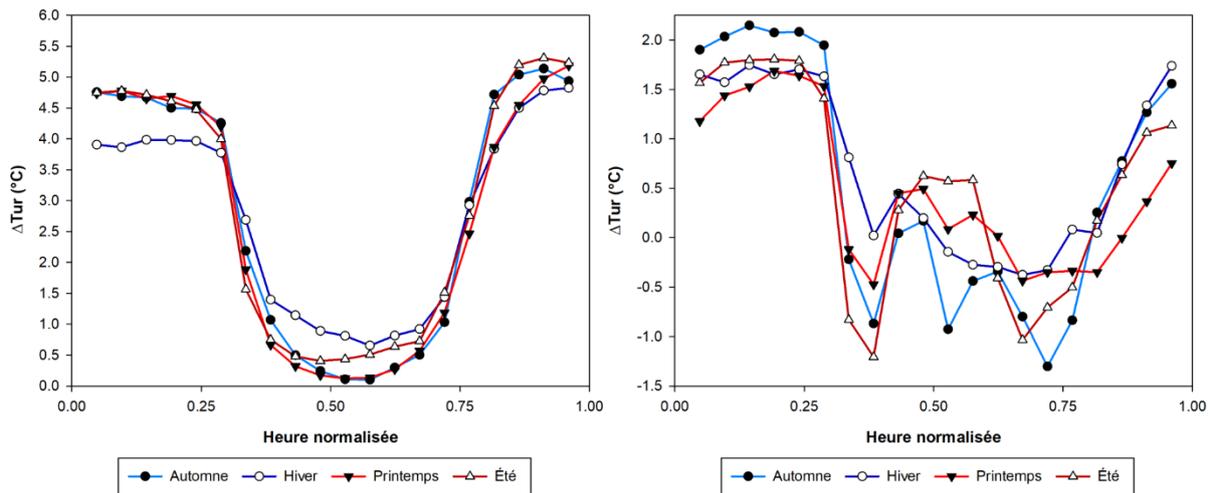


Figure 8 – Évolution des ΔT_{ur} moyens saisonniers pour les jours de beau temps en fonction du temps normalisé pour DRIRE-Entzheim (à gauche) et Botanique-Entzheim (à droite) pour la période 2009-2019.

Le comportement des courbes des taux de refroidissement/réchauffement saisonniers normalisés permet d'expliquer l'évolution journalière de l'ICU des stations DRIRE et Jardin Botanique, ainsi que l'heure d'apparition et de disparition du phénomène (Figure 9). Plusieurs caractéristiques se retrouvent d'une saison à l'autre. En premier lieu, on peut ainsi observer une relative stabilité des taux dans la zone urbaine, opposée à une variation plus importante en zone rurale. En outre, quelle que soit la saison, le refroidissement nocturne s'opère en deux phases : la première concentre les différences les plus marquées entre stations urbaines et rurales et va du coucher du soleil au minuit solaire. Pour toutes les stations et saisons, les vitesses de refroidissement maximales adviennent en effet une à deux heures après le coucher du soleil, la station DRIRE se refroidissant beaucoup plus lentement qu'Entzheim. S'étendant du minuit solaire au lever du soleil, la seconde période est quant à elle caractérisée par un refroidissement plus réduit, dont les valeurs varient moins entre les différentes stations. Les différences importantes survenant lors de la première phase permettent tout de même de maintenir l'ICU jusqu'au lever du soleil. Cette division en deux phases du refroidissement se retrouve dans des zones climatiques variées (Erell & Williamson, 2007 ; Giannopoulou et al., 2010 ; Eastin et al., 2018), et peut résulter de la dynamique des flux radiatifs et turbulents (Holmer et al., 2013).

Les différences saisonnières portent essentiellement sur l'amplitude des taux. Les vitesses de refroidissement maximales ont ainsi lieu en été pour DRIRE ($-2^{\circ}\text{C}/\text{h}$) et Entzheim ($-3^{\circ}\text{C}/\text{h}$), et au printemps pour le Jardin Botanique ($-2,4^{\circ}\text{C}/\text{h}$). Au printemps et en été, le parc urbain se refroidit plus vite comparé aux surfaces minéralisées, du fait de l'évapotranspiration intense et de l'ombre fournie par les arbres entourant le site dès la fin de l'après-midi. En revanche pour ces mêmes saisons, les taux de refroidissement y étant relevés après le minuit solaire sont un peu plus faibles que ceux des autres stations ($-0,5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ en moyenne au printemps, contre $-0,7^{\circ}\text{C}/\text{h}$ pour DRIRE et Entzheim). Là encore, il pourrait s'agir d'un effet de piégeage radiatif exercé par le feuillage des arbres, ce qui expliquerait pourquoi ce refroidissement nocturne amoindri pour le Jardin Botanique n'est pas observé en hiver. Par ailleurs, durant la saison hivernale, les vitesses de refroidissement et de réchauffement des différents sites sont relativement homogènes en raison de la diminution saisonnière de la couverture végétale. En toute logique, il s'agit ainsi de la saison durant laquelle les maxima de refroidissement/réchauffement sont les plus faibles.

Les différences en termes de vitesses de refroidissement/réchauffement illustrent à la fois l'importance de la végétation, qui confère au parc urbain une dynamique particulière de l'ICU, ainsi que le rôle-clé de la station rurale de référence, dont les changements d'occupation du sol influent sur l'intensité de l'ICU saisonnier.

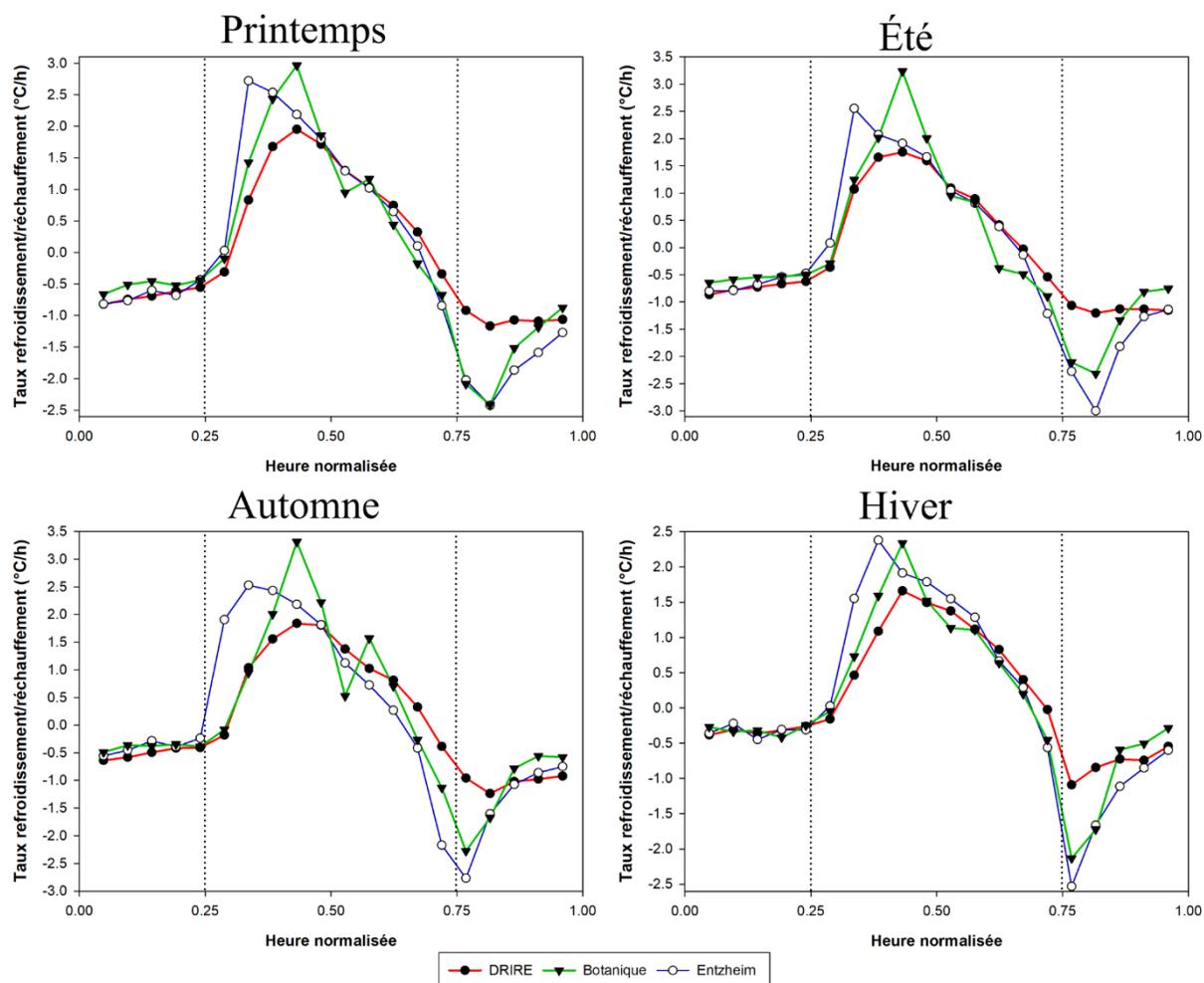


Figure 9 – Évolution saisonnière des taux de refroidissement/réchauffement moyens pour les jours de beau temps de la période 2009-2019, en fonction de l'heure normalisée pour l'ensemble des saisons.

En termes d'intensité, la variabilité saisonnière de l'ICU a déjà été mise en évidence à travers les valeurs des $\Delta T_{ur\ Max}$ moyens (cf. figure 8). Or l'ICU survenant dès le coucher du soleil, des intensités prononcées du phénomène peuvent advenir avant l'apparition du $\Delta T_{ur\ Max}$. De plus, l'occurrence d'un ICU diurne n'est pas à exclure, comme le montrent les moyennes saisonnières de la DRIRE (cf. figure 8). Plutôt que de se restreindre à la fréquence d'apparition du $\Delta T_{ur\ Max}$, il semble donc intéressant d'étendre l'analyse à toutes les valeurs de ΔT_{ur} , afin d'estimer l'occurrence à laquelle se produisent les forts ICU lors des différentes saisons. La figure 10 présente les fréquences d'apparition saisonnières des ΔT_{ur} pour la station DRIRE. À titre informatif, la même figure est fournie en annexe B pour la station Botanique.

Quelle que soit la saison, l'ICU est omniprésent la nuit lors des journées de beau temps : aucune valeur négative de ΔT_{ur} n'est en effet relevée en période nocturne. Cet ICU atteint même au moins 1°C pour la quasi-totalité des cas. Sans surprise, l'été s'avère être la saison la plus propice au phénomène puisque les ICU nocturnes particulièrement élevés ($\Delta T_{ur} \geq 4^{\circ}\text{C}$) représentent plus de 75% des cas. Néanmoins, les autres saisons ne sont pas pour autant épargnées par ces fortes intensités : 53%, 69% et 73% des ΔT_{ur} horaires atteignent ou dépassent les 4°C respectivement lors des belles nuits hivernales, printanières et automnales. En toutes saisons, le centre-ville strasbourgeois subit ainsi des intensités d'ICU particulièrement prononcées durant une grande partie de la nuit, et pas seulement au moment d'apparition du $\Delta T_{ur\ Max}$.

1.2. Évolution temporelle

La période diurne est bien entendu associée à des valeurs de ΔT_{ur} généralement plus faibles, particulièrement au printemps et en été où respectivement 19,5% et 13% des ΔT_{ur} présentent des valeurs négatives. Il arrive toutefois que de fortes intensités d'ICU se produisent en journée (environ 5% des ΔT_{ur} diurnes pour l'ensemble des saisons). Cependant, il est important de rappeler que la station DRIRE n'est pas représentative de ce qui se passe dans la canopée urbaine en journée, puisqu'elle se situe sur un toit. De plus, cette part non négligeable de ΔT_{ur} diurnes intenses survient exclusivement peu de temps avant le coucher ou après le lever du soleil. Enfin, beaucoup de ces journées concernées par des ΔT_{ur} diurnes élevés se situent à la fin d'une longue période de beau temps : certaines de ces fortes intensités précoces d'ICU pourraient de ce fait résulter d'un effet d'accumulation au cours des journées précédentes.

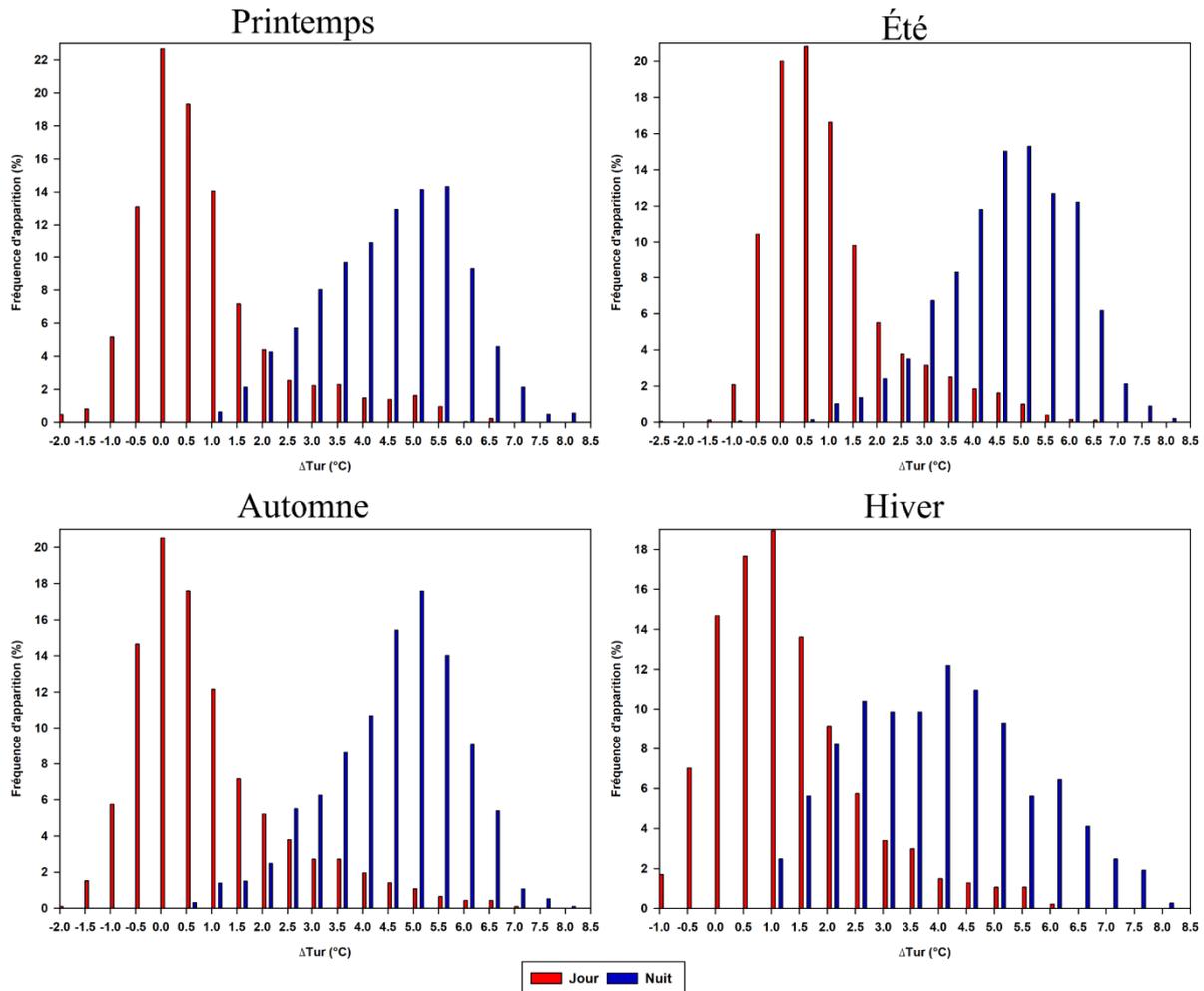


Figure 10 – Distribution des fréquences d'apparition saisonnières des écarts de température diurnes et nocturnes pour le couple DRIRE-Entzheim pour les jours de beau temps de la période 2009-2019.

Dans le cas d'une station représentative du milieu urbain, l'ICU strasbourgeois présente donc des intensités en moyenne plus élevées en été et plus faibles en hiver, à l'instar des résultats obtenus au sein d'autres villes européennes issues de la zone tempérée (Cheung, 2011 ; Parlow et al., 2014 ; Van Hove et al., 2015). Cependant, les $\Delta T_{ur, Max}$ moyens relativement proches d'une saison à l'autre, ainsi que les fréquences notables de ΔT_{ur} élevés, montrent bien que l'expression d'un ICU intense dépend avant tout des conditions météorologiques.

1.2.3. Ilot de chaleur urbain et types de temps

De nombreuses études ont déjà mis en évidence le lien entre intensité de l'ICU et conditions météorologiques synoptiques (Sundborg, 1950; Morris et al., 2001; Cantat, 2004). Toutes illustrent le rôle prépondérant des facteurs climatiques dans la détermination de l'amplitude du phénomène, notamment celui de la vitesse du vent et de la couverture nuageuse (Oke, 1998; Najjar, 2006; Oke et al., 2017), et s'accordent sur le fait que les jours de beau temps dénués de vent fort constituent le type de temps optimal pour le développement de l'ICU. Lors des sections précédentes, les caractéristiques de l'ICU strasbourgeois ont de ce fait été obtenues en analysant uniquement les belles journées, dont l'occurrence à Strasbourg est brièvement présentée en annexe C. Or ces analyses concernaient la dynamique moyenne de l'ICU, sans pouvoir estimer comment évolue le phénomène lors d'une succession de telles journées, courantes en été. En outre, l'analyse de la dynamique journalière de l'ICU démontre également que des intensités relativement élevées du phénomène peuvent tout de même se produire lors de conditions météorologiques moins favorables (cf. figure 2 à droite). Il semble alors également intéressant d'évaluer dans quelle mesure de telles intensités d'ICU peuvent survenir au-delà des jours de beau temps.

Cette partie ne prétend pas renseigner l'ensemble des configurations atmosphériques synoptiques favorisant la genèse de forts ICU. Néanmoins, elle vise à cerner au mieux l'impact des deux principaux facteurs climatiques, à savoir la nébulosité et la vitesse moyenne du vent, sur l'intensité de l'ICU. Leur potentiel d'altération du phénomène, et dans une moindre mesure celui des précipitations, est évalué à partir des données des stations DRIRE et Botanique sur la période 2009-2019. Les conséquences d'une succession sur l'intensité de l'ICU sont également exposées.

1.2.3.1. Rôle des variables météorologiques sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain

Afin de pouvoir travailler sur un échantillon suffisamment important de $\Delta T_{ur\ Max}$, les analyses menées au sein de cette partie concernent l'ensemble des saisons.

➤ La nébulosité

Le rôle de la nébulosité sur l'ICU est étudié via l'utilisation de la fraction d'insolation journalière (FINS), obtenue à partir des données de la station d'Entzheim. En plus des belles journées déjà utilisées lors des sections précédentes (FINS comprise entre 80 et 100%), cinq classes ont été définies pour les deux couples de stations : la première regroupe les journées totalement dénuées d'ensoleillement (FINS = 0%). Les quatre classes suivantes sont définies selon un intervalle de 20%, choisi afin de correspondre à celui également utilisé pour définir la nébulosité des jours de beau temps. Elles regroupent donc les journées à très forte nébulosité (FINS =]0 ; 20[), ainsi que celles à nébulosité forte (FINS = [20 ; 40[) et modérée (FINS = [40 ; 60[). La dernière classe contient quant à elle les journées dont l'ensoleillement relativement important (FINS = [60 ; 80[) les rapproche des belles journées.

Seule la nébulosité varie selon les journées, la vitesse moyenne du vent étant inférieure à 3 m/s et les précipitations absentes pour chacune d'entre elles. Les graphiques utilisés dans cette section sont construits selon Tukey (1977) : les quartiles constituent les bords du rectangle et la médiane sa valeur centrale. Les extrémités des barres sont situées aux premier et neuvième déciles, et les éventuels points représentent les valeurs en dehors de ces limites.

Les graphiques du $\Delta T_{ur\ Max}$ en fonction de la FINS illustrent non seulement le rôle prépondérant de cette dernière, mais également celui des caractéristiques propres au site d'étude considéré (Figure 11). Au niveau de la station DRIRE, le $\Delta T_{ur\ Max}$ augmente nettement avec l'accroissement de la FINS (Figure 11, à gauche). On passe ainsi d'une médiane autour de 2,3°C pour une FINS nulle à près de 6°C pour celle concernant les jours de beau temps. Hormis les classes intermédiaires (FINS entre 20 et 40%, et

1.2. Évolution temporelle

FINS entre 40 et 60%) qui présentent une importante similitude de leurs paramètres statistiques, les graphiques caractérisant les différentes catégories de FINS sont très distincts les uns des autres et mettent en évidence la sensibilité de l'ICU à ce facteur : lorsque le ciel est dénué de couverture nuageuse, les surfaces des zones urbaines et rurales se refroidissent à des vitesses différentes, aboutissant aux taux de refroidissement différenciés présentés précédemment au sein des figures 4 et 5, et de ce fait à des intensités d'ICU accrues. En cas de nébulosité importante, les vitesses de refroidissement s'homogénéisent et limitent ainsi les écarts de température entre zones urbaines et rurales.

Bien que les $\Delta T_{ur\ Max}$ les plus élevés soient relevés pour la classe des belles journées, de forts ICU surviennent tout de même lorsque la FINS est plus faible : hormis lors d'une nébulosité totale (FINS = 0), la médiane des graphiques présente ainsi des valeurs systématiquement supérieures à 4°C pour la DRIRE. Certains $\Delta T_{ur\ Max}$ élevés répertoriés au sein des classes à faible ensoleillement pourraient potentiellement s'expliquer soit par un effet d'accumulation au cours des journées précédentes, soit par une nébulosité certes forte, mais favorable à l'ICU du fait de son type de nuages. Il a en effet déjà été démontré que les différents types de nuages ont un impact important sur le bilan radiatif de surface, et de ce fait sur l'établissement de l'intensité de l'ICU (Oke, 1987 ; Morris et al., 2001 ; Najjar, 2006). Une couverture nuageuse totale, si elle est constituée de nuages fins de haute altitude (par exemple des cirrus), peut ainsi même conduire à des magnitudes d'ICU importantes (Oke et al., 2017). Il n'a malheureusement pas été possible d'obtenir de données venant étayer ou non cette hypothèse, aucune des stations du réseau INTERREG IV ne relevant les différents types de nuages.

Au niveau du parc urbain Botanique (Figure 11, à droite), la corrélation entre intensité maximale de l'ICU et nébulosité est cependant beaucoup moins prononcée : une certaine stabilisation de l'augmentation du $\Delta T_{ur\ Max}$ apparaît dès le graphique des journées à FINS comprises entre 20 et 40%, les médianes et quartiles des classes suivantes ne variant presque plus. Le test du χ^2 indique d'ailleurs que les valeurs du $\Delta T_{ur\ Max}$ issues des catégories 40-60%, 60-80% et $\geq 80\%$ ne sont pas significativement différentes (seuil de significativité de 0,001). La station étant située au sein d'une petite clairière entourée d'arbres, il n'est pas étonnant qu'en protégeant le site du rayonnement solaire direct, l'important ombrage fourni par la végétation arborée limite l'intensité du $\Delta T_{ur\ Max}$.

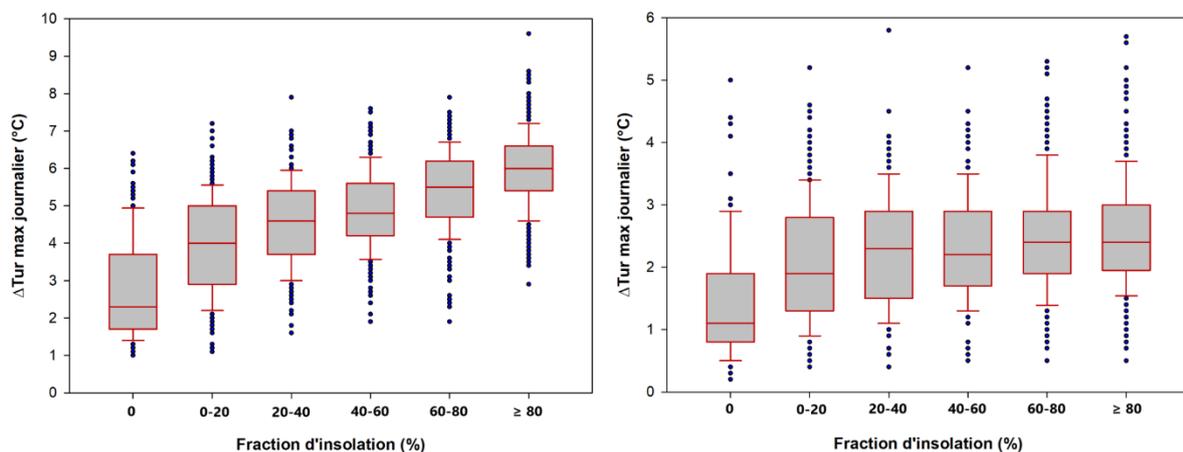


Figure 11 – Intensité du $\Delta T_{ur\ max}$ journalier des journées de la période 2009-2019 en fonction de la FINS pour la DRIRE (à gauche) et Botanique (à droite). Pour plus de lisibilité, il a été choisi de ne pas conserver la même échelle graphique et de l'adapter à chaque figure.

Les valeurs du $\Delta T_{ur\ Min}$ adoptent un comportement opposé à celui du $\Delta T_{ur\ Max}$ (Figure 12) : l'intensité minimale journalière de l'ICU décroît progressivement avec l'augmentation de la FINS. Cela traduit la différence de comportement avec la référence rurale, qui se réchauffe plus rapidement que le milieu urbain, et ceci d'autant plus lors d'une exposition à un fort rayonnement solaire (cf. Figure 4). Cette diminution reste cependant plutôt modérée pour la station DRIRE (Figure 12, à gauche) : la médiane

des graphiques se stabilise ainsi dès la classe 20-40% à une valeur d'environ $-0,2^{\circ}\text{C}$. L'importante part de $\Delta T_{\text{ur Min}}$ positifs peut résulter de la localisation de la station sur une toiture, comme nous l'avons déjà montré lors de l'étude de la dynamique moyenne journalière de l'ICU (cf. section 1.2.1). Cette situation n'empêche tout de même pas l'occurrence non négligeable de $\Delta T_{\text{ur Min}}$ inférieurs à zéro en journée, les valeurs les plus négatives ayant surtout lieu en automne (plus de 40% des $\Delta T_{\text{ur Min}} \leq -1^{\circ}\text{C}$), moment où les champs autour du site d'Entzheim sont à nu.

La diminution progressive des valeurs du $\Delta T_{\text{ur Min}}$ avec l'augmentation de la FINS est beaucoup plus prononcée pour le Jardin Botanique (Figure 12, à droite) : la médiane de l'ICU minimal journalier passe ainsi de $-0,2^{\circ}\text{C}$ pour les journées sans ensoleillement à près de $-1,6^{\circ}\text{C}$ pour celles de beau temps. Même lors des journées à FINS nulle, la médiane des $\Delta T_{\text{ur Min}}$ présente une valeur négative : pour cette classe, les valeurs de $\Delta T_{\text{ur Min}}$ inférieures à zéro se produisent presque toutes en deuxième partie de saison automnale et lors de la saison hivernale. Tout ombrage étant absent lors de ce type de journées, l'explication pourrait résider dans les différences saisonnières d'occupation du sol entre le Jardin Botanique et la station rurale : les champs d'Entzheim sont en effet dénués de végétation lors des saisons froides, ce qui n'est pas le cas au sein du parc urbain où la pelouse se maintient en hiver, ainsi qu'un mulch constitué de feuilles mortes tombées au cours de l'automne, ce qui permet de diminuer la quantité de chaleur stockée dans le sol.

Le rôle de la végétation apparaît même indirectement lors de la survenue de valeurs élevées de $\Delta T_{\text{ur Min}}$: ces quelques cas de $\Delta T_{\text{ur Min}}$ positifs surviennent tous en effet soit en période hivernale (79% des $\Delta T_{\text{ur Min}} > 0^{\circ}\text{C}$), soit lors de journées à faible ensoleillement en fin d'automne ou début de printemps, c'est-à-dire lorsque les feuilles des arbres du Jardin Botanique ne sont plus ou pas encore présentes. En outre, une part importante de ces $\Delta T_{\text{ur Min}}$ positifs se produisent lors de journées de fin d'automne ou d'hiver particulièrement froides, impliquant de ce fait la mise en route du chauffage urbain.

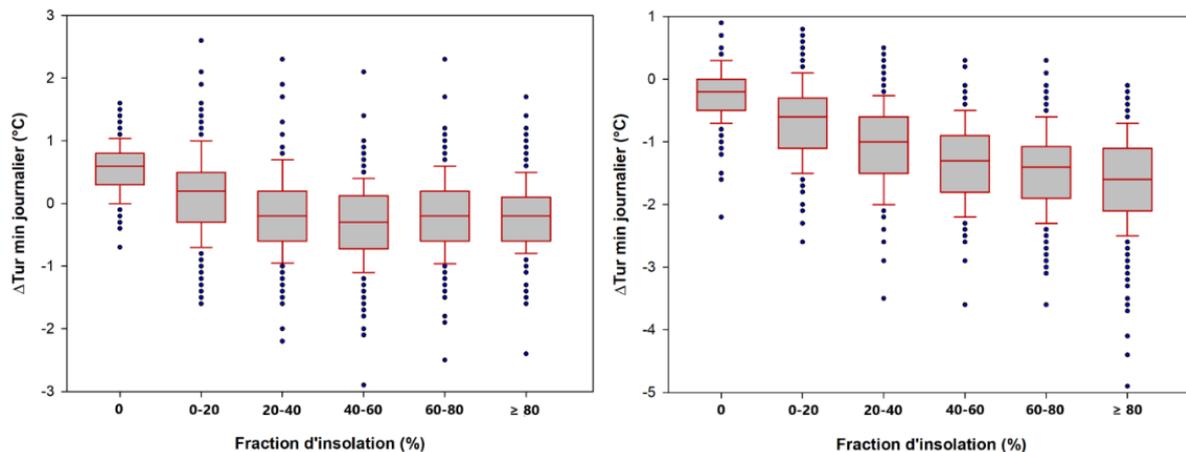


Figure 12 – Intensité du $\Delta T_{\text{ur min}}$ journalier des journées de la période 2009-2019 en fonction de la FINS pour la DRIRE (à gauche) et Botanique (à droite). Pour plus de lisibilité, il a été choisi de ne pas conserver la même échelle graphique et de l'adapter à chaque figure.

Les analyses précédentes illustrent l'importance de la nébulosité sur l'intensité de l'ICU. Cependant, ce paramètre ne suffit pas à expliquer l'ensemble de la variabilité du phénomène : lorsqu'on réalise une régression linéaire simple entre les $\Delta T_{\text{ur max}}$ relevés à la station DRIRE (variable expliquée) et l'ensemble des FINS journalières (variable explicative), force est de constater que le coefficient de corrélation R^2 reste en effet relativement bas ($R^2 \approx 0.41$) et la dispersion des valeurs élevée (Figure 13). Cette dispersion est particulièrement visible autour de la FINS nulle : une part importante des $\Delta T_{\text{ur max}}$ très élevés ($\Delta T_{\text{ur max}} \geq 4^{\circ}\text{C}$) survient lors de journées hivernales très froides lors desquelles le chauffage urbain est activé. Cependant, cette hypothèse ne parvient pas à expliquer les $\Delta T_{\text{ur max}}$ très élevés se

1.2. Évolution temporelle

produisant en début d'automne, et encore moins ceux en été. Cela démontre bien qu'aucune variable à elle seule ne peut expliquer la survenue d'une intensité donnée de l'ICU, nous conduisant à analyser le rôle tenu par d'autres paramètres météorologiques.

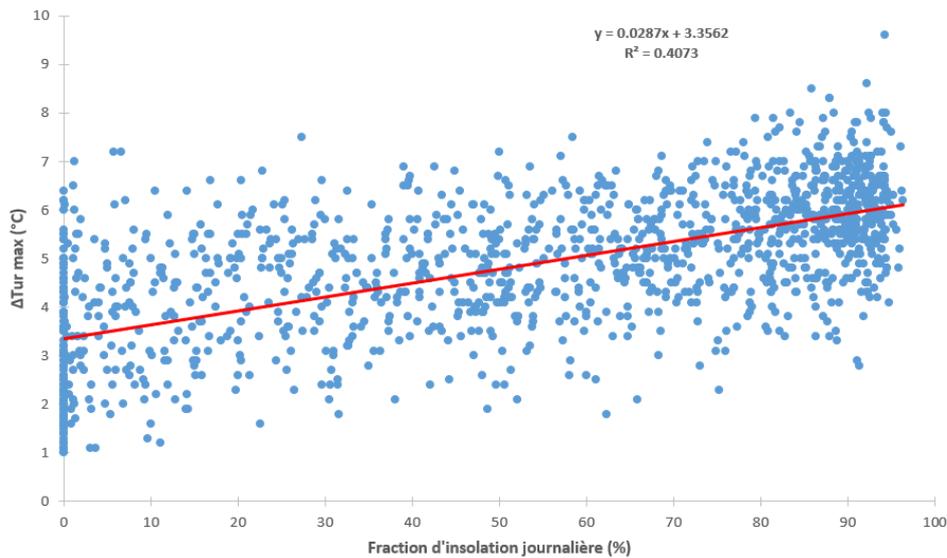


Figure 13 – Régression linéaire simple $\Delta T_{ur \max}$ -Fraction d'insolation journalière pour DRIRE-Entzheim.

➤ Le vent

Figurant parmi les premiers paramètres étudiés (Sundborg, 1950; Oke, 1976, Morris et al., 2001), le vent est, avec la nébulosité, le facteur climatique le plus prépondérant dans la détermination de l'ampleur de l'ICU (Kim & Baike, 2005; Kolokotsa et al., 2009 ; Oke et al., 2017). Afin de mettre en évidence le rôle de la vitesse du vent sur le $\Delta T_{ur \max}$ sans influence de la nébulosité, seules les journées à fraction d'insolation supérieure à 80% et dénuées de précipitations ont été sélectionnées pour l'analyse.

L'impact du vent sur l'ICU transparaît à travers la comparaison de jours de beau temps avec des journées ensoleillées mais durant lesquelles les vitesses de vent dépassent le seuil de 3 m/s (Figure 14) : pour cette catégorie de journées, la médiane des $\Delta T_{ur \max}$ est inférieure de plus de 1,5°C à celle des belles journées à vent faible (Figure 14, à gauche). Lors de vents soutenus, l'air au-dessus de la ville est dispersé et renouvelé, ce qui limite son réchauffement. Au contraire, lorsque le vent est suffisamment faible, l'air stagne et a le temps d'être chauffé par les surfaces urbaines (Cantat, 2004 ; Oke et al., 2017 ; Kastendeuch, 2022).

Le même constat peut être appliqué concernant le comportement du $\Delta T_{ur \min}$ en fonction de la vitesse moyenne journalière du vent, dans une moindre mesure cependant que pour le $\Delta T_{ur \max}$ (Figure 14, à droite) : la moindre dispersion des valeurs lors de vents soutenus (étendue de 1,4°C, contre 4,1°C pour les belles journées à vent calme), souligne tout de même bien l'effet d'homogénéisation des températures urbaines et rurales provoqué par des vitesses de vent élevées.

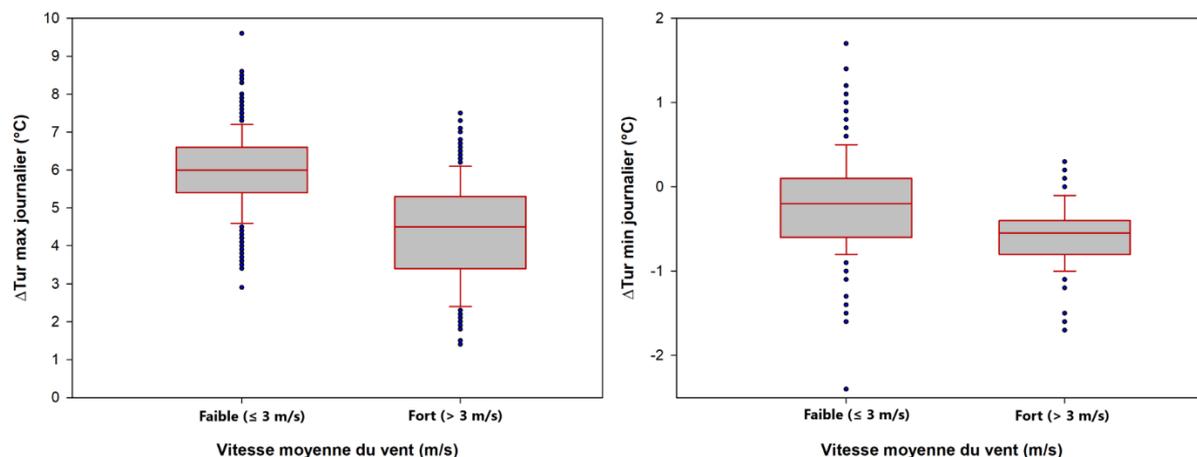


Figure 14 – Intensité des ΔT_{ur} max (à gauche) et ΔT_{ur} min (à droite) journaliers en fonction de la vitesse moyenne journalière du vent pour DRIRE-Entzheim.

L'effet d'atténuation du vent sur l'ICU est davantage mis en évidence lors de l'étude de la relation entre la vitesse moyenne journalière et le $\Delta T_{ur Max}$ (Figure 15). La corrélation négative, matérialisée par une fonction puissance suggérée par Oke (1976), souligne la diminution de l'ICU depuis sa valeur maximale théorique jusqu'à un seuil pouvant être schématisé par une droite asymptote horizontale. De par l'augmentation du mélange horizontal induite par des vitesses de vent accrues, les différences de températures entre les diverses zones s'amointrissent, voire disparaissent lorsque les vitesses atteintes sont suffisamment élevées.

À l'instar des études de Oke (1976), Morris et al. (2001) et Cantat (2004), ces différents résultats illustrent bien le rôle majeur de la nébulosité et de la vitesse du vent sur l'intensité de l'ICU. Toutefois, l'importante dispersion des valeurs du $\Delta T_{ur Max}$ autour d'une même vitesse de vent rappelle également qu'au-delà des principaux paramètres météorologiques, d'autres variables exercent un contrôle sur le phénomène (inertie thermique de la surface, comportement de la référence rurale...).

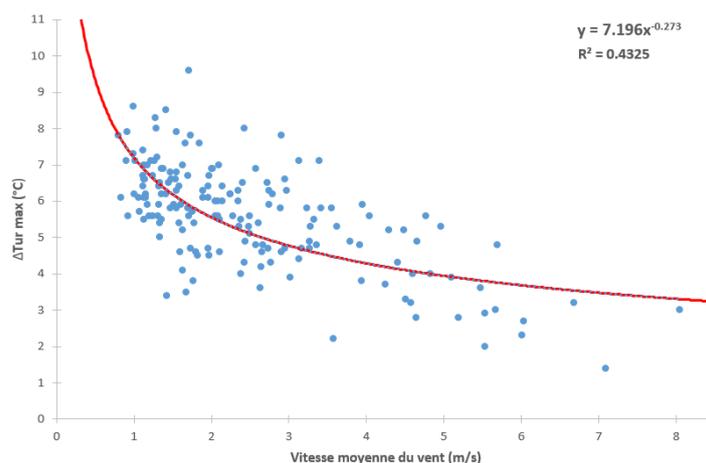


Figure 15 – Relation entre le ΔT_{ur} max et la vitesse moyenne journalière du vent pour DRIRE-Entzheim.

➤ Les précipitations

L'influence de la pluie sur l'ICU reste peu abordée dans la littérature en climatologie urbaine, la plupart des études consacrées à l'étude de ce paramètre traitant plutôt de l'effet du phénomène sur les précipitations (Changnon et al., 1991 ; Rozoff et al., 2003). Mettre en évidence l'impact de la pluie sur

1.2. Évolution temporelle

l'intensité de l'ICU est en effet plus complexe que pour les autres paramètres météorologiques, étant donné que les journées favorables au phénomène sont par définition dénuées de précipitations.

À l'instar de ce qui a été réalisé par [Yang et al. \(2020\)](#), nous avons tenté d'illustrer l'influence exercée par la durée journalière des précipitations sur l'intensité de l'ICU. Il a fallu pour cela se tourner vers les jours appartenant à la classe des FINS supérieures à zéro et inférieures à 20% (cf. figure 11), cette catégorie s'étant avérée être la seule à comporter un nombre suffisant de journées avec des précipitations pour se prêter à une analyse. Les différentes classes de durées de précipitations ont été sélectionnées à l'image de celles utilisées par [Yang et al. \(2020\)](#). Le $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ journalier décroît légèrement au fur et à mesure de l'accroissement de la durée des précipitations, la médiane passant de 4°C lors des journées sans pluie à 3,1°C lorsque la période pluvieuse dépasse 6h (Figure 16). Cela n'a rien d'étonnant puisque lorsque le sol de la zone rurale est humide, cette dernière se refroidit plus lentement, au contraire du milieu urbain dont la surface minérale reste peu impactée par l'effet de la pluie, entraînant par conséquent une diminution de l'ICU. L'influence potentielle de la nébulosité élevée de ces journées, ainsi que la faiblesse numérique de l'échantillon, nous incitent toutefois à considérer ces résultats avec prudence.

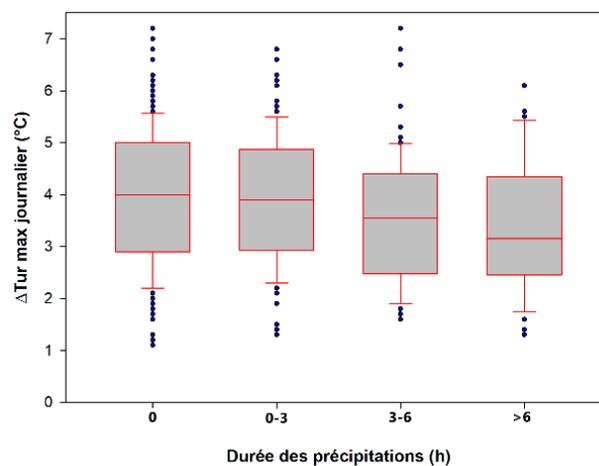


Figure 16 – Intensité des $\Delta T_{ur \text{ max}}$ journaliers en fonction de la durée des précipitations lors des journées à FINS comprise entre 0 (non inclus) et 20% pour DRIRE-Entzheim.

La sensibilité de l'ICU aux conditions météorologiques ressort fortement à travers sa corrélation avec la nébulosité et la vitesse du vent. Il est en effet couramment admis que ces deux facteurs exercent une influence majeure sur l'ampleur du phénomène, et cette étude ne fait que confirmer cette assertion. Néanmoins, l'ensemble de l'analyse s'est déroulée sur des journées étudiées séparément, sans qu'il soit possible d'estimer dans quelle mesure la persistance dans le temps de certaines conditions météorologiques, et notamment celles reliées aux jours de beau temps, impacte l'intensité de l'ICU. Cela nous conduit donc à nous intéresser à l'évolution du comportement de l'ICU lors d'une succession de belles journées.

1.2.3.2. Cas particulier des successions de journées de beau temps

Les journées ensoleillées à vent faible étant les plus propices à la survenue d'intensités élevées d'ICU, il apparaît intéressant d'analyser leur impact sur le phénomène lorsqu'elles perdurent suffisamment longtemps. Deux successions de journées de beau temps sont ainsi présentées au sein des figures 17 et 18. La première recouvre la période allant du 23 au 27 août 2016, lors d'un été qualifié de standard mais ayant subi une canicule tardive. La seconde se déroule du 22 au 27 août 2019 durant un été à tendance générale caniculaire. Le ΔT_{ur} horaire de chacune de ces périodes est analysé pour la

station DRIRE, mais aussi pour celle du Jardin Botanique afin de mettre en évidence les éventuelles différences de comportement dues à la présence de végétation au sein du parc urbain. L'analyse ne se limite cependant pas aux seuls jours de beau temps composant les deux successions : la journée ayant précédé la série temporelle, et celle lui ayant immédiatement succédé, sont également étudiées. L'objectif est d'évaluer l'influence des conditions météorologiques précédant la succession sur l'intensité de l'ICU, ainsi que les éventuelles conséquences d'une longue série de jours de beau temps sur le comportement du phénomène lors des journées suivantes.

Durant la vague de chaleur tardive de fin août 2016, de très nombreux records de température pour une dernière décade estivale ont été battus. Des séries exceptionnelles de jours de fortes chaleurs ont été observées, dont la période allant du 23 au 27 août (Météo France, 2020). Sur Strasbourg, ces cinq jours consécutifs de hautes températures ont tous été répertoriés comme étant des jours de beau temps, la plupart atteignant des FINS dépassant les 90%. Les deux jours ayant précédé cette succession n'appartiennent pas à cette catégorie : le 21 août est la dernière journée d'une période pluvieuse de quatre jours durant laquelle il est tombé au total 14 mm de précipitations. Il s'agit en outre d'une journée peu ensoleillée (FINS = 33%) et dont la vitesse de vent moyenne journalière atteint 3,6 m/s. En revanche, celle du 22 août, bien que caractérisée par un ensoleillement modéré (FINS = 54%), affiche une vitesse de vent moyenne journalière plus faible (1,4 m/s) et ne comporte aucune précipitation.

En début de période, au niveau de la DRIRE, l'ICU reste atténué en raison des précipitations survenant lors de la première partie de la journée du 21 août (Figure 17, en haut). Néanmoins, dès la fin de la période pluvieuse et la diminution de la vitesse du vent, le phénomène atteint à nouveau très vite des valeurs élevées : durant la nuit du 22 août, le $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ est ainsi déjà de 4,9°C. La relative stagnation de l'ICU entre le 22 et le 23 août peut s'expliquer par le fait que le sol de la zone rurale est sans doute encore assez humide suite aux précipitations survenues le 21 août (3 mm au total) : la station d'Entzheim se refroidit alors plus lentement qu'en cas de sol sec. Le $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ journalier augmente ensuite continuellement durant l'ensemble de la période de beau temps, passant de 5,2°C lors de la nuit du 23 août à 7,7°C durant celle du 27 août. En cinq jours, l'intensité maximale de l'ICU a ainsi crû de 2,5°C, représentant un gain d'un demi-degré par jour. Les taux de refroidissement/réchauffement présentés en annexe D montrent qu'au fur et à mesure de l'assèchement du sol, la station rurale se refroidit de plus en plus rapidement, tandis que les surfaces minérales et imperméables conservent une vitesse de refroidissement relativement constante. C'est cette différence, résultant du rôle conjoint des précipitations et de l'occupation du sol, qui provoque l'augmentation progressive de l'ICU de la DRIRE au fil de la succession de belles journées. Parallèlement, le $\Delta T_{ur \text{ min}}$ journalier est quant à lui plutôt constant dans le temps, en raison d'une vitesse de réchauffement de la station d'Entzheim relativement stable durant la période de beau temps.

L'évolution de l'ICU au Jardin Botanique diffère nettement de celle au niveau de la DRIRE (Figure 17, en bas). Non seulement le $\Delta T_{ur \text{ max}}$ journalier n'augmente que de manière négligeable durant les cinq jours caniculaires (passant de 2°C la nuit 23 août à 2,5°C lors de celle du 27 août), mais en plus l'IFU matinal a tendance à s'accroître au fur et à mesure de la vague de chaleur (de -2°C le 23 août au matin à -2,8°C le 27 août). Le comportement de la station urbaine et celui du parc urbain apparaissent ainsi comme totalement opposés. L'influence de la végétation du Jardin Botanique ressort ici clairement : l'effet d'accumulation en période nocturne est limité par une vitesse de refroidissement augmentant au fil de la succession de jours de beau temps (cf. annexe D). En période diurne, il est possible que l'augmentation de la quantité de rayonnement et de la température de l'air au fur et à mesure de la période de beau temps se traduise par des taux d'évapotranspiration plus importants (Snyder et al., 2011), qui exacerbent l'effet rafraîchissant du parc. L'augmentation de l'IFU matinal au fur et à mesure de la période peut également résulter de l'assèchement progressif du sol d'Entzheim qui, éclairé en continu, chauffe de plus en plus le matin. Malheureusement, nous ne disposons pas d'informations qui puissent nous permettre de trancher en faveur d'une de ces deux hypothèses.

1.2. Évolution temporelle

À la suite de cette succession de jours de beau temps, la journée du 28 août (FINS = 66% et vitesse moyenne du vent = 3,47 m/s) voit le ΔT_{ur} décroître fortement pour la DRIRE et se restreindre à des valeurs nocturnes maximales autour de 2,5°C. Or la situation est légèrement différente pour Botanique : le ΔT_{ur} continue en effet d'augmenter, et atteint des valeurs de 2,8°C et de 3,4°C lors de ses pics nocturnes et diurnes. Le ΔT_{ur} encore élevé peu de temps après minuit résulte de la survenue plus tardive du pic nocturne pour le Jardin Botanique par rapport à la DRIRE. S'agissant du pic diurne de 3,4°C, il peut s'expliquer par la limitation de l'influence du vent et de la nébulosité au sein du parc urbain du fait de l'importante présence d'arbres. Il n'est alors pas étonnant que des intensités relativement élevées de ΔT_{ur} puissent se maintenir dans ce cas de figure. Cet effet ne dure cependant pas très longtemps, puisqu'on retrouve des valeurs insignifiantes d'ICU ($\Delta T_{ur} < 1^\circ\text{C}$) dès la fin de journée.

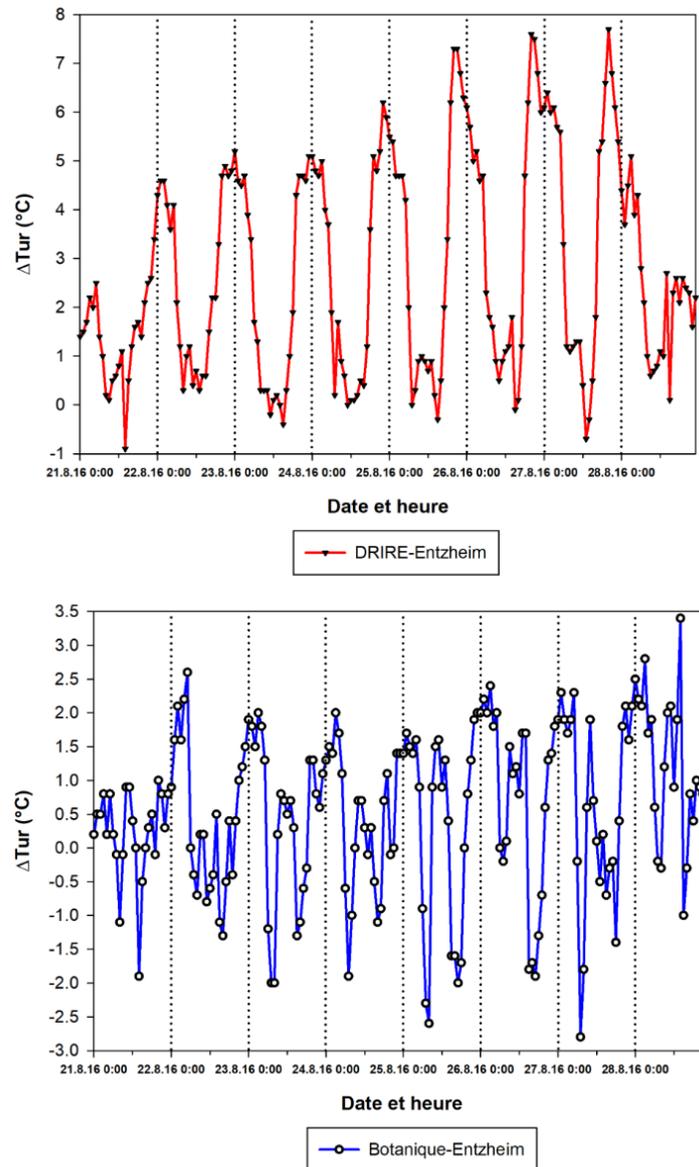


Figure 17 – Évolution du ΔT_{ur} horaire sur cinq jours successifs de beau temps durant la vague de chaleur de fin août 2016 pour DRIRE (en haut) et pour Botanique (en bas).

Au contraire de la succession précédente, la période allant du 22 au 27 août 2019 n'est pas qualifiée de caniculaire, malgré le fait que l'été 2019 ait été particulièrement chaud. Il s'agit de la plus longue série consécutive de belles journées de la base de données climatique dont nous disposons. Précédant cette succession, la journée du 21 août présente une FINS déjà élevée (63%) et une vitesse de vent

moyenne journalière de 2,4 m/s. Seule une infime quantité de précipitations y est relevée en tout début de nuit (0,2 mm).

Le comportement de l'ICU au niveau des deux stations semble à première vue très similaire à celui enregistré lors de la période de fin août 2016 : le $\Delta T_{ur\ Max}$ journalier est ainsi globalement en hausse pour la DRIRE au fur et à mesure de la période, et le $\Delta T_{ur\ Min}$ journalier du Jardin Botanique présente des valeurs très négatives (Figure 18). Cependant, le $\Delta T_{ur\ Max}$ de la DRIRE commence à baisser dès le 26 août malgré les conditions météorologiques favorables au développement de l'ICU (Figure 18, à gauche). Ces différences peuvent résulter d'un sol initialement plus sec en zone rurale que lors de la succession 2016 : en début de période, l'ICU augmente ainsi progressivement du fait d'une vitesse de refroidissement de plus en plus élevée à Entzheim (cf. annexe D). Or au fur et à mesure de la succession de belles journées, le sol de la station rurale continue de s'assécher et de s'échauffer, tendant de plus en plus à se comporter comme une surface minérale. Les différences de températures entre la DRIRE et Entzheim finissent ainsi par s'amoinrir. L'assèchement a également des conséquences sur le Jardin Botanique (Figure 18, à droite) : après avoir atteint un minimum le 25 août ($\Delta T_{ur\ Min} = -2,1^{\circ}C$), le $\Delta T_{ur\ Min}$ commence progressivement à augmenter. La végétation du parc urbain est, tout comme celle de la station rurale d'Entzheim, affectée par la diminution de l'humidité du sol. Il est de ce fait logique que les différences entre les deux sites s'amenuisent au fur et à mesure de l'assèchement de la surface.

La période 2019 se distingue également de la précédente par les caractéristiques de la journée lui succédant : clôturant la période de beaux jours, le 28 août présente en effet une FINS relativement basse (30,5%) et une vitesse moyenne de vent faible (1,47 m/s). Celle-ci apparaît ici comme le facteur limitant la dissipation de l'ICU, l'intensité du phénomène restant élevée malgré l'occurrence d'un type de temps a priori pas très favorable à son maintien. Une succession de jours de beau temps peut ainsi entraîner la persistance d'un fort ICU, et ceci en fonction de la combinaison des différents paramètres météorologiques des journées suivantes. Ces situations peuvent expliquer une partie des ICU dits atypiques, survenant lors de conditions normalement inopportunes. Dans certains cas, ces ICU atypiques peuvent représenter une part non négligeable de l'ensemble du phénomène (Szymanowski, 2005).

L'analyse de ces deux successions permet d'expliquer une partie de l'importante dispersion précédemment constatée du $\Delta T_{ur\ Max}$ autour d'une même valeur de FINS ou de vitesse moyenne journalière du vent (cf. figures 13 et 15). Selon la position occupée par une journée au sein d'une succession de jours de beau temps, la valeur de l'ICU maximal pourra en effet considérablement varier. En outre, l'étude de ces séries de jours de beau temps offre la possibilité d'obtenir un aperçu de l'influence exercée par les précipitations sur l'intensité de l'ICU, ainsi que du rôle primordial joué par le comportement de la station rurale de référence. De telles successions de belles journées estivales ne sont pas rares à Strasbourg : leur fréquence, leur durée et leur intensité sont d'ailleurs amenées à augmenter dans un contexte de réchauffement climatique global, aggravant le phénomène d'ICU et ses conséquences.

1.2. Évolution temporelle

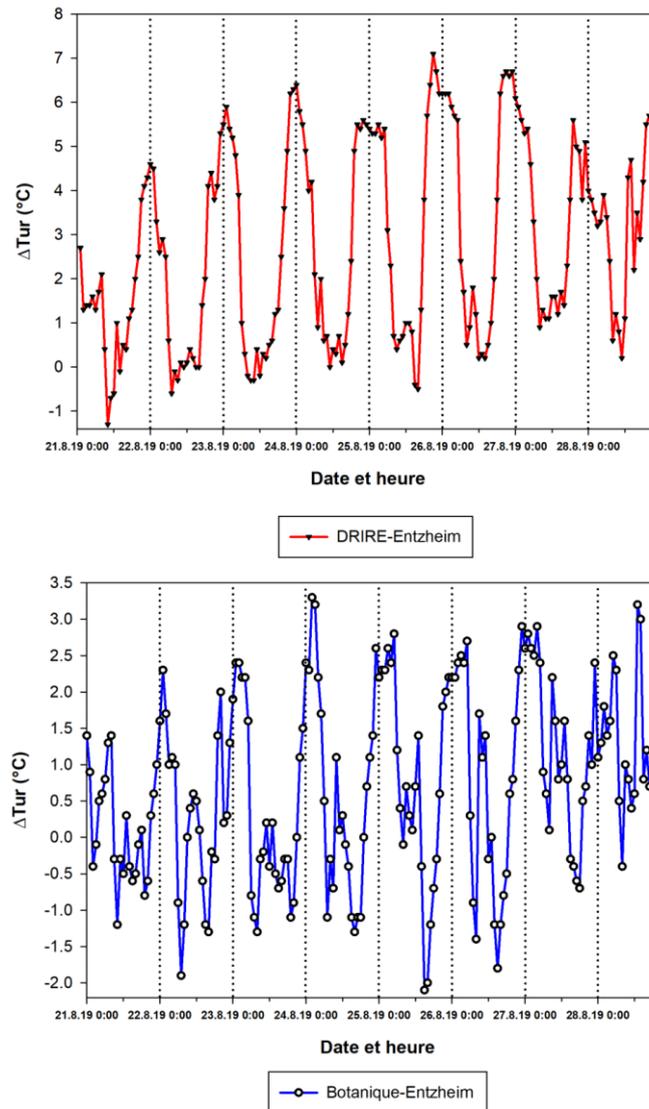


Figure 18 – Évolution du ΔT_{ur} horaire sur cinq jours successifs de beau temps durant la vague de chaleur de fin août 2019 pour DRIRE (en haut) et pour Botanique (en bas).

L'ensemble des aspects temporels mis en évidence soulignent la propension du phénomène à se manifester lors de nuits estivales dégagées et dénuées de vent fort. Or il est impossible de réduire l'occurrence d'un ICU intense à ce seul schéma simplifié, comme le montrent les fortes intensités d'ICU pouvant survenir lors des autres saisons, ainsi que les $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ prononcés apparaissant sous des conditions météorologiques pourtant peu favorables.

La survenue d'une configuration donnée de l'ICU dépend de l'interaction entre une multitude de paramètres, certains étant prédictibles car cycliques (saisons, moment de la journée) et d'autres présentant un caractère davantage aléatoire (types de temps, variations des conditions atmosphériques...). À cela s'ajoutent les conditions géographiques propres à chaque site d'études considéré : tout le long de l'étude, la comparaison de plusieurs sites aux différentes caractéristiques morphologiques et d'occupation du sol a souligné l'existence d'une diversité spatiale de l'ICU en termes d'intensité et de comportement. Analyser cette hétérogénéité spatiale et les facteurs qui la gouvernent est essentiel dans la détermination de l'intensité de l'ICU sur l'ensemble du territoire.

1.3. Structure spatiale

Toute la difficulté dans la prévision et l'atténuation de l'ICU est de cerner et quantifier le rôle exercé par l'ensemble des paramètres modulant son comportement et son intensité. Parmi ces facteurs, les caractéristiques liées à la géométrie urbaine et l'occupation du sol sont prépondérantes dans la détermination de la magnitude de l'ICU à un endroit donné (Oke, 1982 ; Eliasson & Svensson, 2003 ; Konarska et al., 2015). De leur diversité en milieu urbain découle l'importante variabilité de l'ICU à l'échelle d'une ville. L'utilisation de différents sites d'études a permis de fournir un premier aperçu de cette hétérogénéité spatiale au sein de la partie précédente. Or il est impossible, même avec un nombre très élevé de stations, d'obtenir une distribution spatiale de l'ICU tenant compte de toutes les subtilités morphologiques d'un territoire. Une méthode de classification des différents types de zones du milieu urbain en fonction de paramètres donnés s'avère indispensable.

Plusieurs études ont proposé des classifications des sites du milieu urbain en fonction de caractéristiques pouvant se rapporter au climat, à la forme du bâti ou aux matériaux (Chandler, 1965, Ellefsen, 1991 ; Oke, 2004). Parmi elles, la classification en *Local Climate Zones* (LCZ) (Stewart & Oke, 2012) s'est distinguée du fait de sa capacité d'adaptation à n'importe quelle ville du globe. Cette typologie se divise en dix-sept types de zones, reposant chacun sur une dizaine de paramètres liés à l'occupation du sol, la géométrie urbaine et les propriétés thermo-physiques des matériaux. Elle permet une standardisation de l'ensemble des zones urbaines du monde, au-delà des conditions géographiques et climatiques du lieu d'études. La réalisation d'une classification LCZ cohérente et pertinente représente un enjeu majeur dans l'étude de la distribution spatiale de l'ICU puisqu'elle rend possible l'identification des secteurs les plus exposés au phénomène sans qu'il soit nécessaire de multiplier les sites de mesure. Elle fournit également des indications précieuses sur les configurations urbaines à privilégier lors de l'élaboration de futurs projets d'aménagement. Les LCZ ont déjà été utilisées et évaluées au sein de nombreux travaux sur l'ICU (Alexander & Mills, 2014 ; Fenner et al., 2014 ; Yang et al., 2017 ; Geletic et al., 2018). En France, des classifications LCZ ont été réalisées pour Nancy (Leconte et al., 2015), Dijon (Richard et al., 2018) et Strasbourg (Landes et al., 2020), mais également à Paris, Nantes, et Toulouse dans le cadre du projet MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme – Climat Urbain et Énergie) (Hidalgo et al., 2019)

Le principal objectif de cette partie consiste à fournir un aperçu de la configuration spatiale de l'ICU strasbourgeois. Dans ce but, une classification en LCZ de l'EMS est proposée : issue respectivement des travaux de Master 1 de Gourguechon (2018) et de Master 2 de Montauban (2019), la méthodologie aboutissant à cette cartographie LCZ est présentée dans un premier temps, puis dans un second temps la classification est exploitée via l'analyse de l'ICU au sein de plusieurs types de LCZ. Enfin, la partie se conclut avec une tentative de cartographie de l'ICU strasbourgeois reposant sur l'emploi direct des paramètres composant les LCZ.

1.3.1. L'apport spécifique des Local Climate Zones

Tout l'intérêt des LCZ repose dans leur capacité à décrire l'ensemble du milieu urbain tout en limitant le risque de biais découlant de la situation géographique, topographique ou climatique d'une ville (Stewart & Oke, 2012). En permettant l'identification de zones considérées comme homogènes en termes de morphologie et d'occupation du sol à l'échelle d'une agglomération entière, elles offrent effectivement la possibilité d'associer à un type de quartier une certaine intensité de l'ICU, et par conséquent de cerner la structure probable du phénomène sur l'ensemble de l'EMS. Les LCZ apparaissent donc comme une étape fondamentale à l'étude de la distribution spatiale de l'ICU d'un territoire. Or, en plus de la réalisation d'une classification LCZ, qui constitue déjà en soi une procédure

1.3. Structure spatiale

complexe, une spatialisation de l'ICU implique de disposer d'un réseau de stations météorologiques suffisamment étendu et décrivant au mieux la diversité spatiale du milieu urbain.

Mis en place plusieurs années avant le démarrage des travaux sur les LCZ, le réseau de stations météorologiques INTERREG IV ne comprend malheureusement pas l'ensemble des types de LCZ présents au sein de l'EMS. Il possède néanmoins une bonne représentativité du milieu urbain : de par son nombre important de stations réparties sur l'ensemble du territoire (cf. figure 1), ce réseau recouvre en effet des zones aux caractéristiques morphologiques et d'occupation du sol variées, et de ce fait offre tout de même la possibilité d'assurer la représentation de plusieurs types de LCZ.

Cette sous-partie vise donc à évaluer le potentiel des LCZ dans l'étude de la structure spatiale de l'ICU. En premier lieu, elle fournit une description de la méthodologie ayant permis d'aboutir à la cartographie LCZ issue des travaux respectifs de [Gourguechon \(2018\)](#) et [Montauban \(2019\)](#), et par la suite publiée par [Landes et al. \(2020\)](#). Le comportement thermique des LCZ est ensuite analysé via les données de différentes stations issues du réseau INTERREG IV.

1.3.1.1. Méthodologie de classification LCZ appliquée à l'EMS

Les dix-sept types composant la classification LCZ se répartissent entre 10 classes bâties et 7 classes naturelles ([Stewart & Oke, 2012](#)). Chaque type de LCZ est défini à l'aide de dix paramètres mesurables et relevant de la géométrie, de l'occupation du sol ou des propriétés thermo-physiques des matériaux composant le milieu urbain. Il existe deux approches distinctes offrant la possibilité de calculer ces indicateurs, et donc de réaliser une classification LCZ à l'échelle d'un territoire, chacune comportant des avantages et des inconvénients lui étant propres.

L'approche WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) de type raster a été proposée par [Bechtel et al. \(2015\)](#) et repose sur l'utilisation de données satellitaires et de logiciels libres d'accès. Elle consiste à comparer la signature spectrale des pixels composant des zones d'apprentissage définies par l'utilisateur à celle associée à chaque classe LCZ, permettant ainsi de relier toute zone du territoire à un type de LCZ. Déjà employée au sein de notre équipe dans le cadre d'un mémoire de recherche ayant conduit à la réalisation de la première classification LCZ de l'EMS ([Gourguechon, 2018](#)), cette méthodologie présente l'avantage d'être aisément applicable et peu coûteuse. Or elle reste très dépendante à la fois de la qualité des images satellitaires utilisées et de l'appréciation subjective de l'opérateur dans la définition des zones d'apprentissage, et n'atteint que le niveau de détail L0 selon l'échelle WUDAPT ([Landes et al., 2020](#)). Ces limites nous ont conduit à nous tourner vers la seconde approche, plus précise et plus complète, pour la suite de nos travaux.

Parallèlement à l'approche raster, l'approche vectorielle s'appuie sur l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG) pour calculer les valeurs des différents paramètres définis par [Stewart & Oke \(2012\)](#) afin d'en déduire le périmètre des polygones LCZ. Elle requiert de ce fait beaucoup plus de données, mais parvient à un niveau de précision supérieur à celui atteint par la méthodologie raster. Faisant suite à l'étude de [Gourguechon \(2018\)](#) dans l'objectif d'aboutir à une cartographie LCZ plus précise et plus détaillée, les travaux de [Montauban \(2019\)](#) adoptent de ce fait une approche vectorielle s'inspirant entre autres des analyses de [Unger et al. \(2014\)](#) et [Hidalgo et al. \(2019\)](#). Toutes les données utilisées (occupation du sol, albédo, hauteur de végétation...) proviennent de bases de données *Open source* et gratuites, dont celles de la collectivité de l'EMS et de l'Institut Géographique National (IGN).

La méthodologie vectorielle employée se déroule en trois étapes principales : à l'instar des travaux de [Hidalgo et al. \(2019\)](#), la zone d'étude est d'abord découpée en îlots de polygones issus du traitement du parcellaire cadastral et d'autres bases de données vectorielles de l'IGN. Les paramètres composant les LCZ sont ensuite calculés pour chaque polygone, l'ensemble des données disponibles nous permettant d'en obtenir six sur les dix existants. Enfin, après avoir exclu les types de LCZ inexistant

au sein de l'EMS, une procédure de classification inspirée de [Unger et al. \(2014\)](#) est appliquée comme règle de décision d'appartenance d'un polygone à une classe LCZ. Afin de distinguer davantage certains types de LCZ, deux paramètres supplémentaires sont ajoutés : l'indice de compacité et le pourcentage de surface végétale (VgSF) ([Landes et al., 2020](#)). La cartographie LCZ finale obtenue par [Montauban \(2019\)](#) atteint le niveau de détail L1 selon l'échelle WUDAPT (Figure 19). Davantage de détails sur les différentes méthodologies et procédures sont fournis par [Gourguechon \(2018\)](#), [Montauban \(2019\)](#), et [Landes et al. \(2020\)](#).

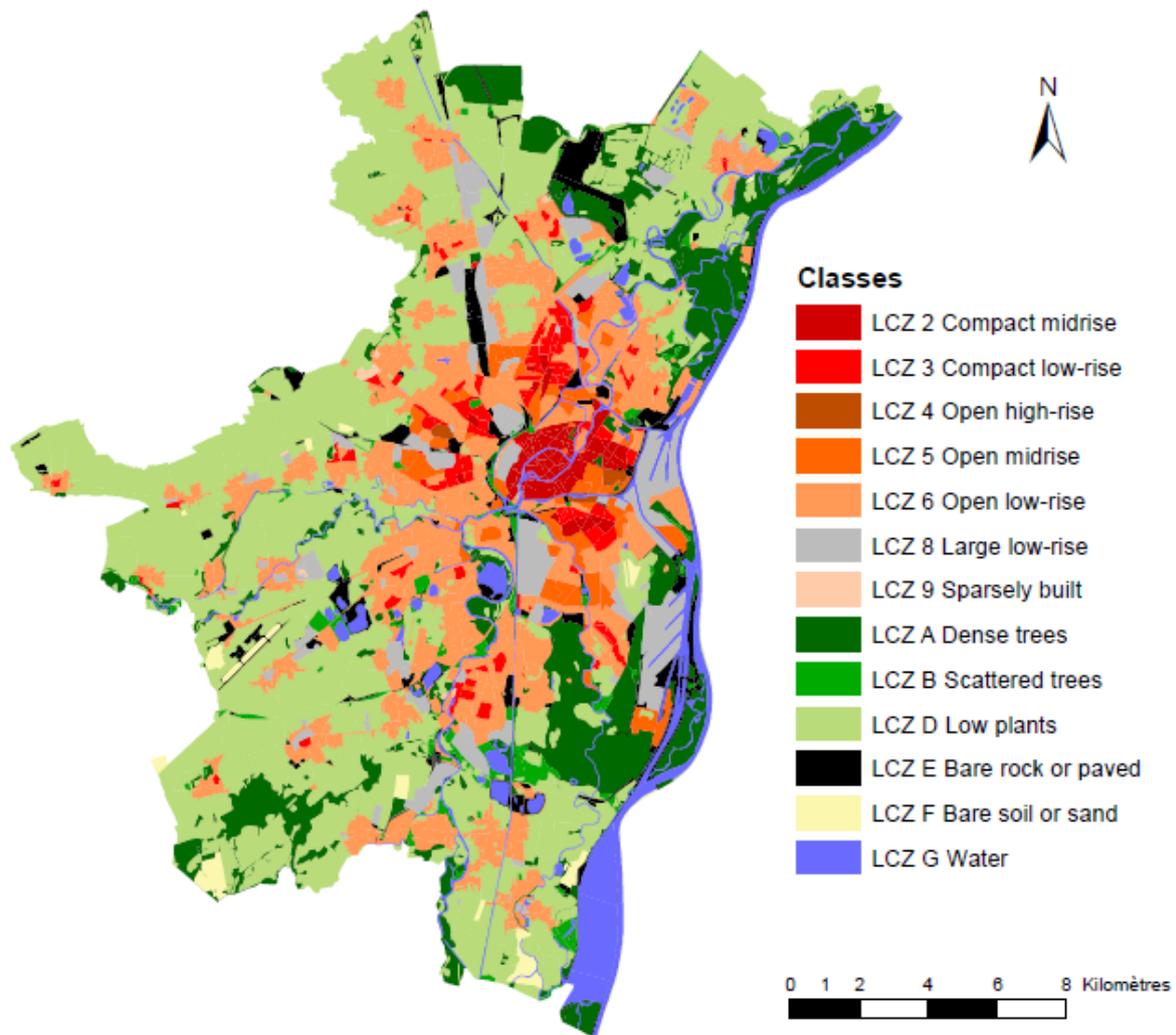


Figure 19 - Cartographie LCZ de l'EMS ([Landes et al. \(2020\)](#) d'après [Montauban \(2019\)](#)).

La classification LCZ de l'EMS regroupe 13 types de LCZ sur les 17 définis par [Stewart & Oke \(2012\)](#). La zone urbaine est majoritairement dominée par les LCZ 2 (*compact midrise*), 3 (*compact low-rise*), 5 (*open midrise*), 6 (*open low-rise*) et 8 (*large low-rise*), tandis que le milieu rural est représenté par les LCZ A (*dense trees*), D (*low plants*) et G (*water*). Ces classes sont à peu près les mêmes que celles présentes au sein de classifications LCZ de villes similaires à celles de Strasbourg en termes de contextes géographique et climatique ([Leconte et al., 2015](#); [Gál et al., 2018](#)). Une comparaison a été effectuée entre cette cartographie et celle de [Gourguechon \(2018\)](#) : malgré une classification très similaire des LCZ non construites, certaines différences apparaissent concernant la répartition et

1.3. Structure spatiale

l'attribution des LCZ bâties, résultant d'une distinction plus fine de certaines classes grâce à l'intégration de paramètres supplémentaires, ainsi que d'une meilleure prise en compte de détails morphologiques (Landes et al., 2020). Une évaluation réalisée par l'Agence d'Urbanisme de Strasbourg (ADEUS) a validé la cartographie vectorielle, en mettant cependant en évidence quelques erreurs de classification persistantes, notamment au niveau des cimetières, parcs urbains et terrains sportifs. Ces erreurs peuvent potentiellement provenir de la non prise en compte de quatre des dix paramètres dans la détermination des LCZ, cette absence résultant soit d'un manque de données, soit de difficultés de calcul. Il est cependant possible que certains de ces indicateurs manquants parviennent à être obtenus lors de futurs travaux, ce qui devrait conduire à une amélioration de certains résultats de la classification (Montauban, 2019).

À partir de la cartographie LCZ, chaque station du réseau INTERREG peut désormais être reliée à une classe LCZ. Le type de LCZ associé à chaque site de mesures est indiqué au sein de l'annexe A. Or il convient de rappeler que les stations constituant le réseau ont été implantées plusieurs années avant l'élaboration de la classification LCZ. Le choix de leur emplacement n'a donc pas été fait en fonction de cette dernière, et dépendait de critères de représentativité du milieu urbain et de faisabilité technique. De ce fait, les différents sites ne recouvrent pas tous les types de LCZ présents au sein de l'EMS. Certains d'entre eux comme les LCZ 2 ou LCZ 6 sont ainsi très bien représentés, tandis que des classes comme la LCZ 4 ne contiennent aucun site de mesures. En outre, les stations ne sont pas toujours localisées au cœur même de leur LCZ : quelques-unes se situent même à la frontière de deux polygones appartenant à des LCZ de classes différentes. Ces sites peuvent ainsi présenter un comportement thermique particulier, non représentatif du type de LCZ considéré, et sont de ce fait difficilement exploitables.

Malgré ces problèmes, la diversité des stations météorologiques à notre disposition offre tout de même la possibilité d'effectuer des premières comparaisons entre cinq types de LCZ. Le lien entre ICU et facteurs de variabilité spatiale peut d'ailleurs déjà être initié à travers l'utilisation directe des paramètres composant les LCZ.

1.3.1.2. Rôle des facteurs liés à la géométrie urbaine et l'occupation du sol

À Strasbourg, les relations entre ICU et occupation du sol avaient déjà été étudiées par De Hatten (2003), Fischer (2005) et Najjar (2006). Or elles reposaient sur une période nettement plus courte et ne concernaient pas les mêmes stations. De plus, les seuls paramètres analysés étaient le pourcentage d'espace bâti et le pourcentage total d'espaces verts, les données concernant la géométrie urbaine n'étant pas disponibles lors du projet RECLUS. Réitérer l'analyse permet ainsi de vérifier et consolider les relations établies antérieurement avec d'autres stations tout en apportant de nouvelles informations sur l'influence exercée par certains facteurs.

Les quatre paramètres évalués font partie des indicateurs composant les LCZ obtenues par Montauban (2019). Il s'agit du pourcentage de surface bâtie (BSF), du pourcentage de surface perméable (PSF), du Sky View Factor (SVF) et du pourcentage de surface végétale (VgSF). Leur relation avec le $\Delta T_{ur\ Max}$ moyen est ici analysée à partir de régressions linéaires simples. Seize stations urbaines parmi celles du réseau fixe INTERREG IV sont ainsi utilisées lors d'une vingtaine de journées de beau temps comprises entre le 28/06/2015 au 30/08/2015, unique période commune à l'ensemble des sites.

L'ensemble des régressions sont présentées au sein de la figure 20. Sans surprise, le BSF présente une importante corrélation positive au $\Delta T_{ur\ max}$ moyen ($r = 0.75$). Ce résultat rejoint celui énoncé par de nombreuses études (Oke, 1981, Bottyan & Unger, 2003 ; Imhoff et al., 2010) ayant déjà démontré l'effet d'une importante fraction de surface bâtie sur le $\Delta T_{ur\ Max}$ moyen. À l'opposé, le PSF présente une forte corrélation négative ($r = -0.81$) avec le $\Delta T_{ur\ Max}$ moyen. Souvent représentées par de la végétation, des sols naturels, ou encore des matériaux poreux, les surfaces perméables stockent effectivement moins

de chaleur, impliquant une restitution amoindrie d'énergie par refroidissement infrarouge (IR) la nuit et de ce fait un ICU nocturne réduit.

La relation entre VgSF et ICU maximal moyen affiche également un résultat prévisible : la corrélation obtenue est évidemment négative ($r = -0.65$), et illustre bien la présence de $\Delta T_{ur Max}$ moyens plus modérés au niveau des stations correspondant à des parcs urbains. Elle n'atteint cependant pas le degré de celle entre ICU maximal et PSF. Or parmi les 23 classes d'occupation du sol sur lesquelles se sont basés les calculs du BSF, de l'ISF et du PSF, celles étant répertoriées comme perméables relèvent toutes de différentes formes de végétation (pelouses, cultures, forêts...), à l'exception de l'eau (Montauban, 2019). Il est de ce fait possible que la corrélation entre végétation et $\Delta T_{ur max}$ soit en réalité encore plus prononcée.

Pour l'étude du SVF, plusieurs sites ont été écartés afin d'éviter les biais découlant de la présence de végétation arborée (Klemm et al., 2015 ; Oke et al., 2017). Il s'agit du paramètre qui présente la corrélation la plus négative avec le $\Delta T_{ur Max}$ moyen ($r = -0.83$), soulignant la prépondérance de la géométrie urbaine dans la mise en place de l'ICU. En termes de morphologie, de faibles valeurs de SVF correspondent en effet à des canyons urbains peu ouverts : de par la présence d'obstacles masquant le ciel, cette géométrie contrarie les émissions de rayonnement IR dans le fond du canyon durant la nuit, et par conséquent limite la vitesse de refroidissement nocturne, contribuant alors à l'exacerbation de l'ICU.

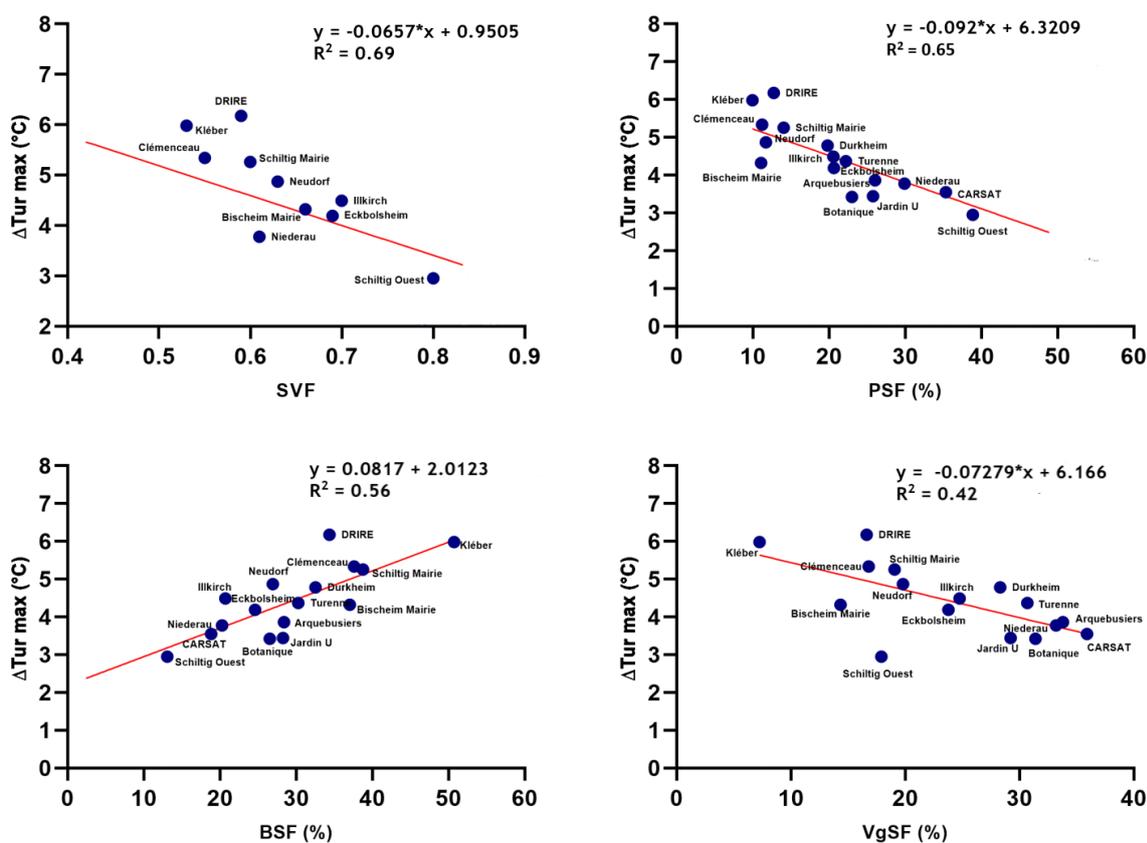


Figure 20 – Régressions linéaires entre $\Delta T_{ur max}$ moyen de plusieurs sites d'études et facteurs liés à la géométrie urbaine et à l'occupation du sol : SVF (Sky View Factor), PSF (Pervious Surface Fraction), BSF (Building Surface Fraction) et VgSF (Vegetation Surface Fraction).

1.3. Structure spatiale

Les régressions exposées ci-dessus démontrent clairement le rôle fondamental exercé par l'occupation du sol et la géométrie urbaine sur l'intensité de l'ICU. Or au-delà d'une estimation du ΔT_{ur} max moyen, ces relations permettent surtout d'obtenir un premier aperçu de la répartition spatiale du phénomène. Même s'il s'agit de régressions linéaires simples, les corrélations plutôt bonnes pour l'ensemble des paramètres montrent bien que l'ICU résulte d'une combinaison de plusieurs facteurs de géométrie et d'occupation du sol, soulignant d'autant plus l'intérêt de recourir aux LCZ dans l'étude de sa configuration spatiale.

1.3.1.3. Comportement thermique des LCZ

Un des principaux objectifs des LCZ consiste à pouvoir associer un comportement et une plage d'intensités de l'ICU à un type de LCZ donné. Il apparaît alors essentiel d'évaluer dans quelle mesure les différentes classes LCZ se distinguent les unes des autres en termes d'intensité de l'ICU. En outre, il est en toute logique attendu que le comportement de l'ICU soit relativement homogène au sein d'une classe de LCZ donnée : cette section vise ainsi à évaluer la pertinence de la classification LCZ en termes d'étude de la structure spatiale de l'ICU, en évaluant la variabilité entre les différents types de LCZ pour lesquels nous disposons de sites de mesure, mais également celle au sein d'une seule et même classe de LCZ.

➤ Variabilité inter-LCZ

Afin d'éprouver la variabilité inter-LCZ, les dix-huit sites déjà utilisés au sein de la section précédente sont regroupés au sein de leur classe LCZ et comparés sur la période de jours de beaux temps qu'ils ont en commun. Plusieurs analyses de variance (ANOVA) suivies d'un test de Fisher ont d'abord été réalisées sur les ΔT_{ur} max des diverses stations afin de vérifier si les valeurs sont statistiquement différentes les unes des autres. Les résultats confirment la significativité statistique entre les groupes de LCZ à un seuil de confiance fixé à 95%. Les graphiques de la figure 21 soulignent également les disparités d'intensité du ΔT_{ur} max, les médianes décroissant globalement avec l'augmentation de l'indice du type de LCZ. Le graphique des LCZ 2 est nettement plus étendu que ceux se rapportant aux autres types LCZ du fait du nombre plus important de stations rattachées à cette classe, tandis qu'un seul site a pu être relié respectivement aux LCZ 8 et LCZ D. Le nombre de stations rattachées à un type de LCZ variant nettement d'une classe à l'autre nous incite d'ailleurs à davantage nous fier aux médianes et quartiles qu'aux écarts.

La comparaison du ΔT_{ur} moyen horaire inter-LCZ met également en évidence une hétérogénéité de l'ICU bien accordée aux types de LCZ, notamment sur le plan de l'amplitude du phénomène. La disparité spatiale concernant l'intensité de l'ICU est particulièrement remarquable en période nocturne, durant laquelle le ΔT_{ur} max moyen décroît avec l'augmentation de l'indice du type de LCZ : la station Geispo (LCZ D) est ainsi celle où l'amplitude moyenne de l'ICU nocturne apparaît comme étant la plus faible, tandis que la Kléber (LCZ 2) possède celle étant la plus forte. La différence entre ces deux types de LCZ atteint en moyenne 4,02°C en période nocturne, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par [Alexander & Mills \(2014\)](#) et [Leconte et al \(2015\)](#) qui relèvent respectivement 4,2°C et 4,4°C de différence entre les LCZ 2 et les LCZ D de Dublin et Nancy. Le bilan de ces deux études concernant les différentes comparaisons inter-LCZ est d'ailleurs très proche du nôtre, ce qui apparaît d'autant plus cohérent que ces deux villes sont proches de Strasbourg en termes de nombre d'habitants.

L'évolution des courbes du ΔT_{ur} moyen horaire selon un axe temporel normalisé démontre que le comportement de l'ICU est relativement proche d'une classe LCZ à l'autre, malgré la différence d'intensités (Figure 21, en bas). Seule la courbe de la station CARSAT, répertoriée comme appartenant à une LCZ 8, affiche un motif particulier, avec la présence d'un ICU diurne semblable à celui du Jardin Botanique (cf. section 1.2.2). Située au sein d'un terrain végétalisé et entourée d'arbres, la station

CARSAT présente en effet une configuration se rapprochant de celle du parc urbain (cf. annexe A). Il en résulte une dynamique du ΔT_{ur} moyen horaire très proche de celle relevée pour le Jardin Botanique, pourtant affilié à un type de LCZ différent. De ce fait, cette station n'est pas forcément la plus représentative du comportement d'une LCZ 8. Elle laisse toutefois supposer que la dynamique de l'ICU d'un site ayant de telles caractéristiques (localisation au sein d'un espace vert, proximité immédiate de végétation arborée...) reste la même, quel que soit le type de LCZ dans lequel la station se trouve.

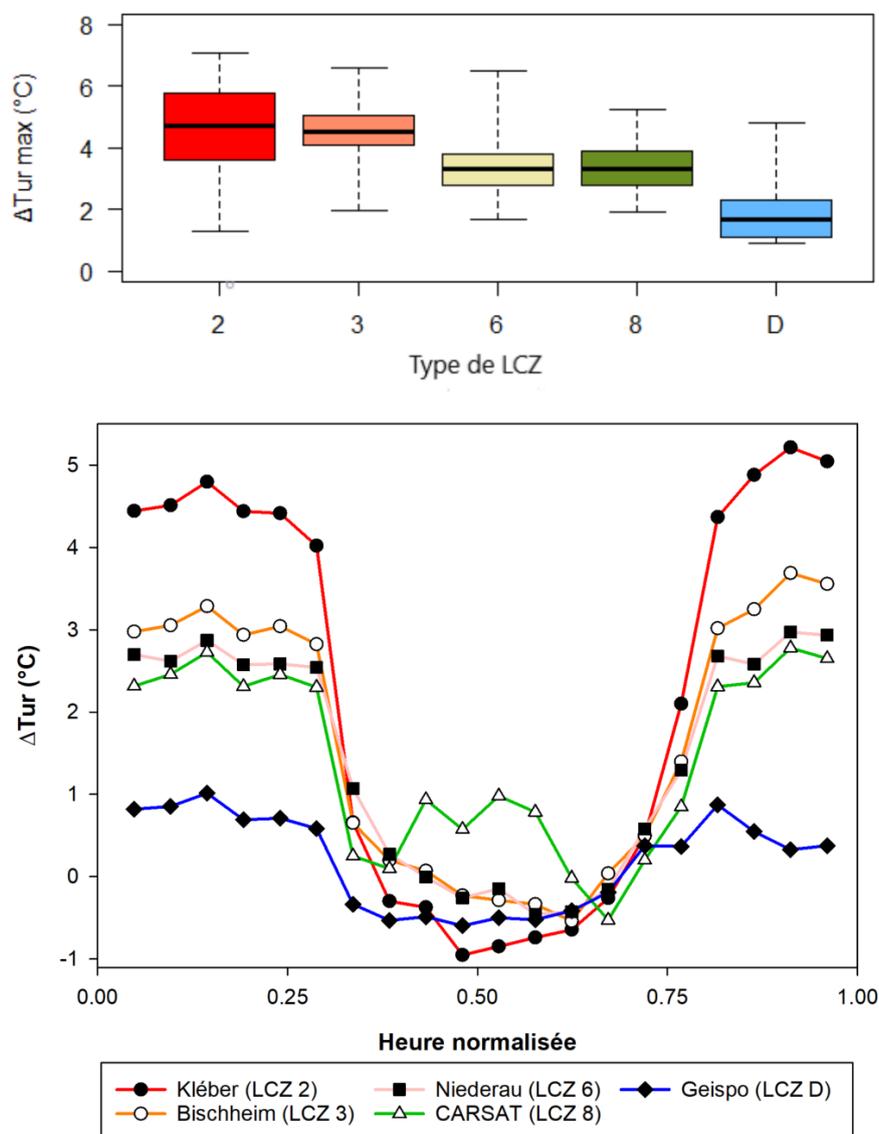


Figure 21 – ΔT_{ur} max journaliers répertoriés pour différentes classes de LCZ (en haut) et évolution des ΔT_{ur} moyens horaires pour différentes stations appartenant à différents types de LCZ (en bas).

La distribution des fréquences d'apparition du ΔT_{ur} en fonction du type de LCZ met également bien en évidence l'hétérogénéité inter-LCZ (Figure 22). Les ΔT_{ur} supérieurs à 5°C sont presque exclusivement relevés au niveau de la station en LCZ 2, tandis que près de la moitié des intensités d'ICU mesurées pour la classe D sont inférieures ou égales à 0°C. Des magnitudes élevées d'ICU ($\Delta T_{ur} \geq 4^\circ\text{C}$) peuvent tout de même survenir au sein de tous les types de LCZ, mais dans une moindre mesure que pour les LCZ 2 ou LCZ 3 : s'agissant des LCZ 6 et 8, seul le $\Delta T_{ur \text{ Max}}$ atteint en effet des valeurs aussi élevées. Sans surprise, les LCZ 2 et 3 sont quant à elles régulièrement soumises à des intensités d'ICU particulièrement prononcées, les ΔT_{ur} supérieurs ou égaux à 3°C représentant respectivement 35,7% et 26,3% des ΔT_{ur} mesurés au sein de ces deux classes.

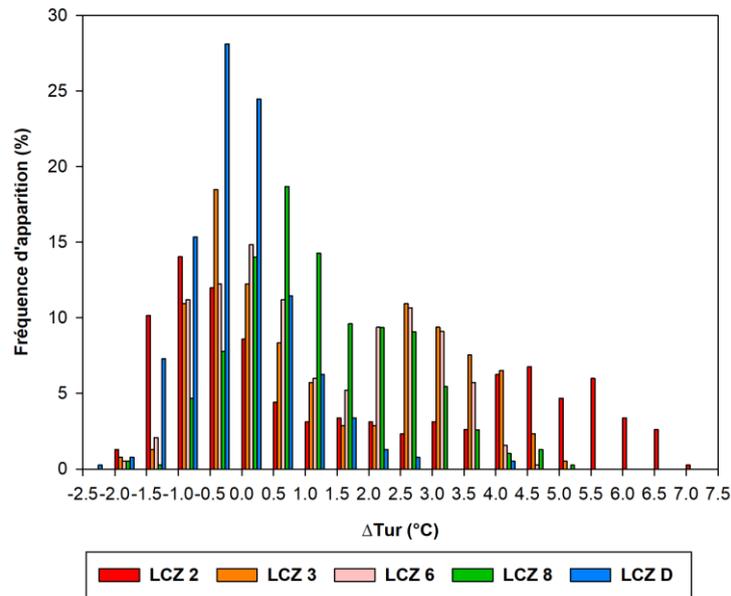


Figure 22 – Évolution des ΔT_{ur} moyens horaires pour différentes stations appartenant à différents types de LCZ.

Cet aspect des travaux atteint ses limites du fait de la faible représentation de certains types de LCZ. Plusieurs stations sont en outre difficilement exploitables dans le cadre d'une étude sur le comportement thermique des LCZ du fait de leur localisation problématique (frontière entre deux classes de LCZ différentes, présence d'un effet de site dû à des particularités de l'environnement immédiat de la station...). Néanmoins, cette analyse constitue une première évaluation qu'il s'agira de compléter par la suite soit à l'aide de mesures mobiles dédiées, soit via l'installation d'un réseau permanent de stations dont le choix d'emplacement se fera en prenant pleinement en considération la classification LCZ. S'il est ainsi difficile d'exploiter davantage l'hétérogénéité des différents types de LCZ, le plus grand nombre de LCZ 2 permet en revanche d'aborder la question de la variabilité intra-LCZ au sein de nos travaux.

➤ Variabilité intra-LCZ

Le fait pour deux stations d'être situées dans un même type de LCZ implique logiquement qu'elles aient des caractéristiques communes. Néanmoins, il n'est pas impossible qu'elles présentent encore des disparités notables. Il peut en effet subsister une variabilité interne au sein d'un type de LCZ, pouvant résulter soit d'intervalles de définition trop larges dans les paramètres définissant les LCZ, soit d'un important échantillon de sites affilié à une classe donnée (Richard et al., 2018). Il est également possible que cette variabilité intra-LCZ résulte partiellement de potentielles erreurs de classification au niveau de la cartographie LCZ, ou de la localisation problématique de certaines stations en bordure de LCZ.

Cette hétérogénéité intra-LCZ est illustrée ici à travers l'exemple des LCZ 2, classe représentée par huit stations (Figure 23). Deux groupes distincts transparaissent en effet aussi bien du point de vue de l'intensité du ΔT_{ur} max que du comportement global de l'ICU. Ces groupes sont composés de stations LCZ 2 minérales pour le premier (en rouge) et de stations assimilables à des parcs urbains pour le second (en bleu). Les graphiques des différentes stations mettent en évidence une variabilité persistante entre ces différents groupes, la différence entre la médiane de la station DRIRE et celle de la station Botanique atteignant par exemple plus de 3,5°C. Les graphiques des stations de type « parc urbain » se rapprochent par conséquent davantage de celui de la LCZ 8, voire de la LCZ D (cf. figure 21, en bas).

L'intensité maximale moyenne de l'ICU décroît sans surprise au fur et à mesure qu'on se rapproche des caractéristiques de parcs urbains, avec un écart de plus de 3°C entre le $\Delta T_{ur} \max$ moyen le plus élevé et celui le plus bas. Le comportement des stations ARQ, TUR et DUR est d'ailleurs particulièrement intéressant : ces trois sites sont situés à proximité du parc urbain des Contades, la station ARQ étant la plus proche et la DUR la plus éloignée. Les médianes de la figure 23 montrent que plus la station est proche des Contades, plus les $\Delta T_{ur} \max$ nocturnes y étant relevés diminuent, mettant en évidence une influence du parc urbain sur les sites environnants qui reste toutefois à déterminer.

L'analyse de la dynamique journalière de l'ICU permet de davantage mettre en évidence la proximité entre les différentes stations appartenant aux LCZ 2. Afin de mieux comparer les différents sites entre eux, les ΔT_{ur} moyens sont également normalisés à partir des valeurs de $\Delta T_{ur} \min$ et $\Delta T_{ur} \max$ via la formule suivante : $\Delta T_{ur} i_{normalisé} = (\Delta T_{ur} i - \Delta T_{ur} \min) / (\Delta T_{ur} \max - \Delta T_{ur} \min)$. Hormis le motif particulier des trois stations assimilables à un parc urbain, les courbes sont plutôt similaires entre les différentes stations en période nocturne. On peut même constater que les courbes des stations les plus minérales, c'est-à-dire celles correspondant le plus à la définition d'une LCZ 2, se superposent presque, traduisant une forte homogénéité du comportement de l'ICU entre ces sites. Hormis le cas très particulier des parcs urbains, la cinétique de l'ICU est ainsi relativement la même entre les stations LCZ 2.

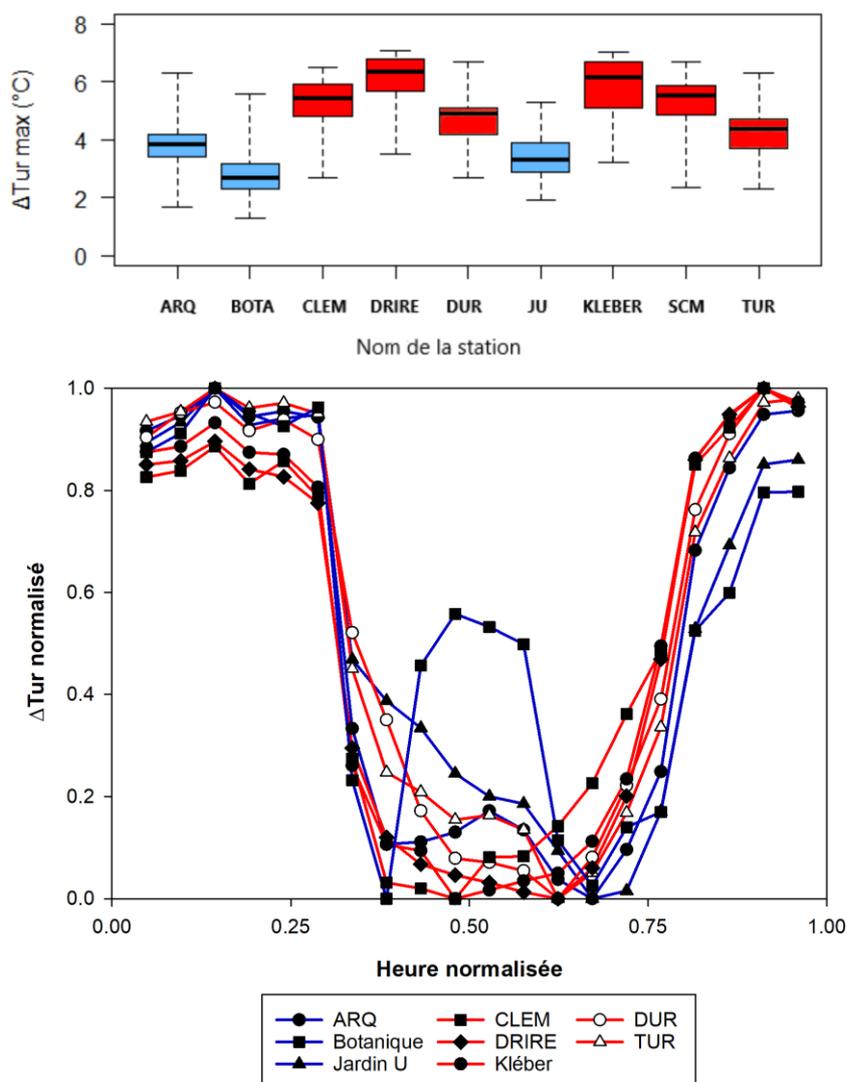


Figure 23 – $\Delta T_{ur} \max$ journaliers répertoriés en période de beau temps pour les stations LCZ 2 (en haut) et évolution de leurs ΔT_{ur} moyens horaires (en bas).

1.3. Structure spatiale

La persistance d'une variabilité intra-LCZ est déjà attestée au sein d'autres études, notamment dans les travaux de [Kotharkar & Bagade \(2018\)](#) qui ont par conséquent choisi de définir des sous-classes LCZ spécifiques pour adapter leur classification à cette variabilité interne. Or loin d'invalider la classification LCZ, la variabilité intra-LCZ présentée ici peut être perçue comme illustrant le degré d'influence de la végétation dans la mise en place de l'intensité de l'ICU. Son potentiel de mitigation s'applique efficacement au sein des LCZ 2, pourtant associées à d'importantes intensités nocturnes d'ICU du fait d'une configuration géométrique leur étant particulièrement favorable. Il faut toutefois rappeler qu'il est toujours possible que cette variabilité intra-LCZ résulte simplement d'éventuelles erreurs de classification, ou de la non-représentativité de certains sites du fait de leur localisation à proximité de deux types de LCZ.

La pertinence de l'outil des LCZ apparaît pleinement à travers cette analyse. L'intensité de l'ICU, ainsi que sa dynamique, sont globalement en corrélation avec le type LCZ attribué à chacun des différents sites de mesures étudiés. Comme souligné précédemment, il s'agit d'une toute première analyse du comportement thermique des LCZ qui mériterait bien entendu d'être enrichie, notamment avec de nouveaux sites de mesures dont la localisation serait plus adaptée à la cartographie LCZ et permettrait de recouvrir l'ensemble des classes existantes au sein de l'EMS. Les relations établies précédemment entre plusieurs paramètres définissant les LCZ et $\Delta T_{ur\ max}$ offrent cependant déjà la possibilité de se faire une représentation de l'expression de l'ICU moyen sur l'ensemble du territoire. Chacun des 2212 polygones composant la classification LCZ de l'EMS contient en effet une valeur de BSF, de SVF ou de PSF lui étant propre. Ces informations rendent possible la réalisation d'une cartographie détaillée de l'ICU maximal moyen eurométropolitain.

1.3.2. Cartographie de l'îlot de chaleur urbain

L'obtention d'une cartographie de l'ICU d'un territoire donné constitue un véritable aboutissement. Elle permet de représenter la distribution spatiale du phénomène à l'échelle de l'agglomération et ainsi d'identifier les secteurs de la ville au sein desquels il est le plus intense. Il s'agit de ce fait d'un outil d'aide à la décision essentiel dans la mise en place de mesures d'atténuation de l'ICU, qui permet aux services concernés d'une collectivité de cibler les zones sur lesquelles agir en priorité.

Il existe un grand nombre de méthodologies et de techniques permettant de cartographier l'ICU à l'échelle d'une agglomération, chacune d'entre elles présentant ses propres avantages et inconvénients. Les plus couramment utilisées reposent sur la télédétection ([De Almeida et al., 2021](#)) et sur l'utilisation de données de températures de l'air issues de mesures fixes ou mobiles ([Bottyán & Unger, 2003](#) ; [Szymanowski & Kryza, 2009](#) ; [Heusinkveld et al., 2014](#) ; [Varentsov et al., 2021](#)). Bien que principalement plébiscitées pour l'étude de l'ICU de surface, les méthodologies satellitaires peuvent également être utilisées dans la réalisation de cartographies de l'ICU de canopée urbaine. Les travaux de [Del Pozo et al. \(2021\)](#) ont ainsi démontré une bonne corrélation entre températures de l'air et températures de surface nocturnes, et ont de ce fait permis d'aboutir à des cartographies saisonnières cohérentes de l'ICU strasbourgeois. Cependant, les résolutions spatiales restent grossières (de l'ordre de 1 km² pour les satellites MODIS), et quelques difficultés persistent concernant le calcul de la température de surface (signal reçu par le satellite influencé par certains facteurs comme la nature des matériaux, sur-échantillonnage des toits et du sommet des façades du fait des prises inclinées qui privilégient les surfaces en hauteur...) ([Kastendeuch, 2022](#)). Une autre méthode consiste à employer des capteurs aéroportés : réalisée dans le cadre du projet RECLUS ([Najjar et al., 2004](#)), cette démarche rend possible l'obtention de résolutions spatiales beaucoup plus fines que lors de l'utilisation d'imageurs satellitaires (de l'ordre de 4 mètres). Or du fait de l'impossibilité de multiplier le nombre de vols, elle ne permet pas de cerner la variabilité spatio-temporelle de l'ICU. Le choix d'une méthodologie de cartographie dépend donc de l'objectif recherché, mais également du type et du nombre de données à notre disposition.

Au sein de l'équipe TRIO, plusieurs cartographies de l'ICU strasbourgeois ont déjà été réalisées via des données de terrain : les travaux de Fischer (2005) et De Hatten (2003) ont conduit à l'établissement de deux cartes instantanées de l'ICU à partir des mesures issues des campagnes PRIMEQUAL et RECLUS. La première repose sur une méthode d'interpolation par krigeage des données de températures de l'air provenant du réseau de mesures. La deuxième provient de l'application d'une méthodologie initialement développée par Bottyán & Unger (2003) : elle consiste à établir une équation de régression linéaire multiple (MLR) reliant la température de l'air nocturne à des variables liées à l'occupation du sol, et calculant ainsi la température au sein de n'importe quelle maille dont on connaît les propriétés du tissu urbain qui la compose. Bien que conduisant à une cartographie de l'ICU détaillée et à la structure spatiale cohérente, les résultats de De Hatten (2003) ne concernent qu'un horaire donné d'une seule nuit estivale, et manquent donc de représentativité. Il est proposé ici une nouvelle cartographie de l'ICU maximal moyen strasbourgeois en appliquant la méthodologie de Bottyán & Unger (2003) à un échantillon plus conséquent de belles nuits. La nouveauté par rapport aux précédents travaux réside dans le fait que les variables explicatives sont directement issues des paramètres composant les LCZ. L'application de la MLR concerne ainsi chaque polygone de la classification LCZ de l'EMS.

1.3.2.1. Application de la méthodologie de Unger

La détermination de l'équation de MLR dépend des relations linéaires précédemment établies (section 1.3.1.2) entre $\Delta T_{ur} \max$ et facteurs liés à la morphologie urbaine et l'occupation du sol. Afin d'obtenir une cartographie la plus robuste et la plus représentative possible, les $\Delta T_{ur} \max$ moyens de dix-huit stations issues du réseau INTERREG IV sont calculés sur une vingtaine de belles journées, majoritairement estivales, de l'année 2015. Plusieurs MLR reposant sur différentes combinaisons de paramètres constituant les LCZ (BSF, SVF, albédo, ISF, VgSF...) sont éprouvées afin d'obtenir l'équation la plus corrélée possible à l'ICU maximal moyen. Seule la MLR au coefficient de détermination le plus élevé est retenue ($R^2 = 0,71$). Le calcul du $\Delta T_{ur} \max$, issu de l'équation (1), relève donc entièrement du BSF, de l'ISF et du VgSF.

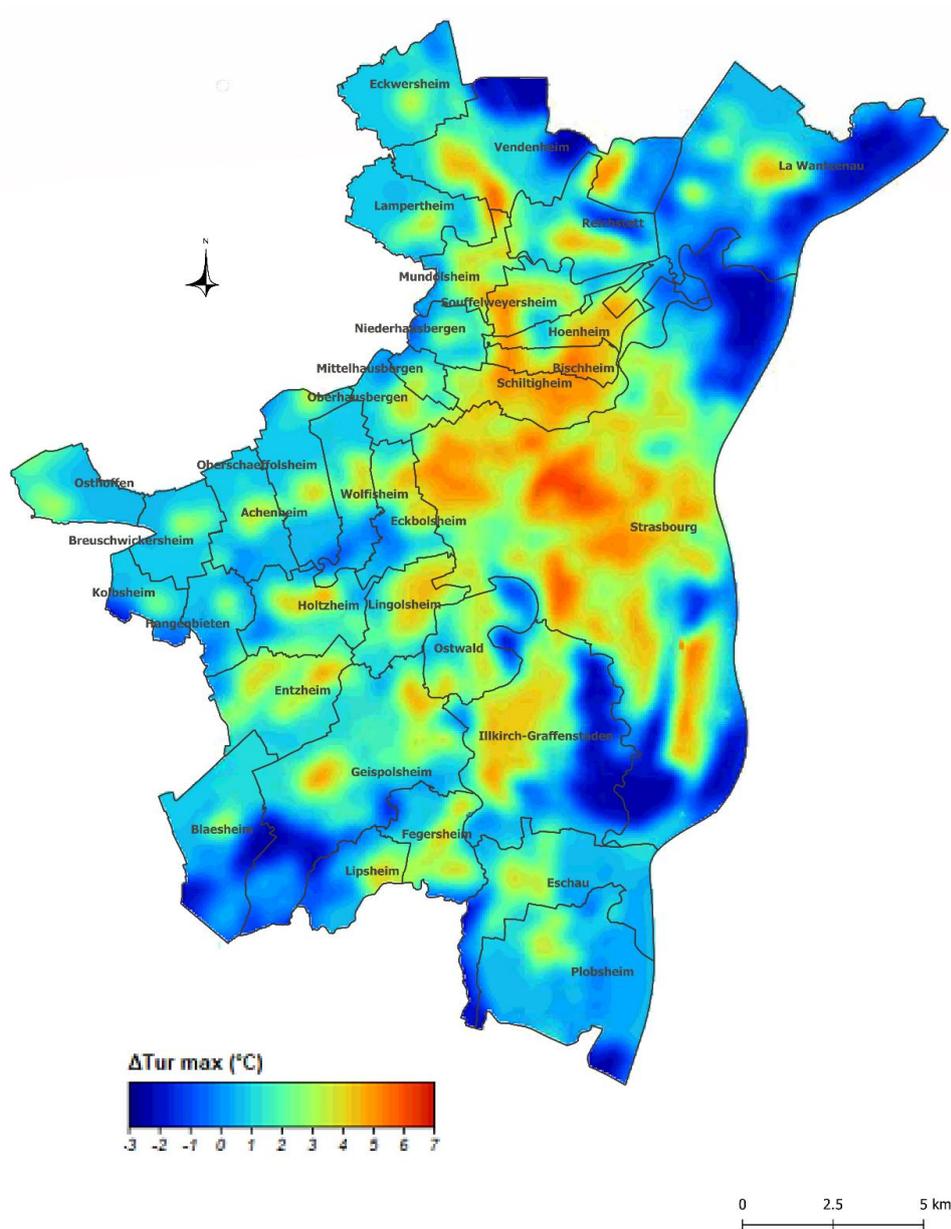
$$\Delta T_{ur} \max = 0,0699 * BSF + 0,0572 * ISF - 0,0329 * VgSF + 0,03268. \quad (1)$$

La MLR ainsi obtenue est implémentée dans le logiciel de système d'information géographique (SIG) SAGA GIS, ainsi que les différentes couches raster contenant les informations relatives aux paramètres utilisés en tant que variables explicatives. L'équation est alors appliquée à l'ensemble des polygones LCZ, contenant chacun ses propres valeurs de BSF, d'ISF et de VgSF. Après un lissage par moyenne mobile permettant d'éviter les possibles transitions abruptes et irréalistes entre polygones LCZ voisins, une cartographie de l'ICU maximum moyen par beau temps est réalisée (Figure 24). L'ensemble de la procédure d'utilisation de SAGA GIS menant à la réalisation de la cartographie est détaillée dans l'annexe E.

La cartographie obtenue affiche une certaine cohérence structurelle, avec des intensités de $\Delta T_{ur} \max$ particulièrement élevées au centre-ville strasbourgeois et dans la zone industrielle du Port du Rhin. En toute logique, la cartographie montre une forte cohérence avec la classification LCZ : les valeurs calculées du $\Delta T_{ur} \max$ ont ainsi tendance à être plus prononcées au niveau des LCZ 2 et 3, caractéristiques de l'hyper-centre strasbourgeois et des communes très urbanisées de première couronne (Schiltigheim, Bischheim). Les communes davantage périphériques exposent également, dans une moindre mesure, quelques zones où le $\Delta T_{ur} \max$ moyen est plus élevé, correspondant souvent à l'emplacement de LCZ 6 ou 8 se distinguant des LCZ A ou D environnantes. De par son application à chaque polygone LCZ, la méthodologie de cartographie permet cependant d'obtenir une représentation de la distribution spatiale de l'ICU moyen intégrant pleinement la variabilité intra-LCZ existante. Outre les LCZ 2 dont l'hétérogénéité a déjà été exposée en section 1.3.1.3, la cartographie met ainsi en

1.3. Structure spatiale

évidence des valeurs d'ICU maximum moyen très variées au niveau des autres types de LCZ, notamment les LCZ 8.



1.3.2.2. Analyse de la qualité du modèle et limites de la méthode

La méthodologie de [Bottyan & Unger \(2003\)](#) reposant sur une MLR, il semble essentiel d'en éprouver la significativité statistique. En plus du R^2 , l'équation est évaluée à l'aide des grandeurs statistiques suivantes : l'erreur quadratique moyenne des résidus (RMSE pour *Root Mean Square Error*), l'erreur moyenne (MBE pour *Mean Bias Error*), l'erreur moyenne absolue (MAE pour *Mean Absolute Error*) et l'indice d'accord (dr pour *redefined index of agreement*). L'ensemble des formules de chaque indicateur statistique sont fournies au sein de l'annexe F.

Le tableau 1 expose les valeurs des principaux indicateurs statistiques permettant l'évaluation de la qualité du modèle de régression. Les faibles RMSE, MBE et MAE mettent en évidence une certaine fiabilité de la MLR, tout comme le dr très élevé. En outre, les valeurs des résidus restent faibles, aboutissant à des $\Delta T_{ur\ Max}$ moyens correspondant à $\pm 1^\circ C$ aux observations. Il convient de préciser que les résidus les plus élevés peuvent provenir de stations particulières et donc potentiellement sources de biais, comme le Jardin Botanique. Même si ces indicateurs d'écart mettent clairement en évidence un potentiel de prédiction élevé, ils ne garantissent pas une significativité de la MLR.

R^2	RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	MBE (<i>Mean Bias Error</i>)	MAE (<i>Mean Absolute Error</i>)	dr (<i>redefined index of agreement</i>)
0,71	0,53	$-2,71 \cdot 10^{-16}$	0,43	0,99

Tableau 1. Paramètres statistiques de la MLR représentée par l'équation (2).

Une ANOVA est réalisée à partir de l'outil d'analyse d'Excel afin de vérifier si le modèle de régression et ses composants sont statistiquement significatifs. Les résultats sont nuancés : lors du test de Fischer, le BSF et l'ISF montrent une significativité notable à hauteur du seuil de confiance fixé à 95% (et même à $p < 0.01$ pour le BSF). Or ce n'est pas le cas du VgSF : cette variable ne contribue donc pas autant que les autres à la pertinence du modèle de régression. Cependant, sa suppression entraîne une légère diminution de la qualité globale de la MLR : elle provoque ainsi une baisse du R^2 (0,67) et une augmentation de la RMSE (0,59). Il est donc tout de même choisi de conserver le VgSF au sein du modèle.

Au-delà de la pertinence du choix des paramètres constituant le modèle de régression, plusieurs limites inhérentes à la méthodologie de [Bottyán & Unger \(2003\)](#) sont à signaler. En premier lieu, la méthode ne permet d'aboutir qu'à une cartographie de l'ICU maximal moyen. Cette manière de cartographier l'ICU a certes pour avantage de synthétiser la distribution spatiale du phénomène en une seule carte, ce qui correspond clairement aux attentes des urbanistes et aménageurs ([Richard et al., 2022](#)). Or il a été montré dans les parties précédentes que le $\Delta T_{ur\ Max}$ ne se produisait pas toujours aux mêmes heures : le moment de son apparition varie ainsi non seulement en fonction de la station considérée, mais également selon les caractéristiques de la journée analysée (cf. section 1.2.1). Cela constitue un biais majeur puisque tous les polygones n'atteignent pas leur $\Delta T_{ur\ Max}$ au même moment, contrairement à ce que laisse apparaître la cartographie réalisée. En outre, la méthodologie n'est pas adaptée à la conception de cartographies saisonnières : les valeurs de certains paramètres constituant l'équation de la MLR changent en effet en fonction des saisons (notamment le VgSF), ce qui implique que la combinaison de facteurs utilisée au sein de l'équation (1) n'est valable que pour la saison estivale. Des travaux menés dans le cadre de mémoires de Master démontrent d'ailleurs clairement que cette méthode ne parvient pas à aboutir au calcul de l'ICU moyen saisonnier ([Galand, 2021 ; Weiss, 2022](#)). Enfin, certains $\Delta T_{ur\ Max}$ moyens affichent des intensités très négatives ($\Delta T_{ur\ Max} \leq -1^\circ C$). Les polygones concernés correspondent tous à des zones forestières, au sein desquelles le VgSF atteint des valeurs très élevées. Le problème vient du fait que la méthodologie de Unger considère que les forêts présentent le même comportement que n'importe quelle autre zone végétalisée : or il a déjà été montré que des stations considérées comme rurales, mais situées dans des zones boisées, peuvent afficher des températures nocturnes plus élevées que celles de sites ruraux localisés dans des champs comme Entzheim ([Najjar, 2006](#)). De telles intensités d'ICU ne sont donc pas réalistes et ne traduisent pas correctement le comportement spécifique aux zones forestières.

Il semble alors possible d'affirmer que nous avons atteint les limites d'application de la méthodologie de [Bottyán & Unger \(2003\)](#) avec la réalisation de cette cartographie de l'ICU maximal moyen. D'autres outils, notamment la télédétection dont l'usage pour l'étude du phénomène a été initié au sein de l'équipe TRIO par [Del Pozo et al. \(2020\)](#), pourront par la suite constituer des alternatives intéressantes, notamment dans la réalisation de cartographies de l'ICU moyen saisonnier.

1.4. Conclusion du chapitre 1

Dans ce chapitre, une analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'ICU strasbourgeois a été effectuée à partir de l'exploitation d'un réseau de mesures composé d'une vingtaine de stations et ayant fonctionné durant plusieurs années.

Après une présentation des différentes expérimentations de terrain ayant contribué à alimenter la base de données utilisée dans cette thèse, la première partie du chapitre a traité de l'évolution temporelle de l'ICU à plusieurs pas de temps. L'étude de la dynamique journalière et saisonnière a montré que le phénomène, à l'instar d'autres villes européennes et nord-américaines, atteint son paroxysme durant les nuits estivales de faible nébulosité et dénuées de vent fort. L'analyse de son comportement sous différents types de temps a cependant quelque peu nuancé cette généralité, démontrant que des intensités prononcées d'ICU peuvent tout de même survenir sous certaines conditions dans des situations pourtant moins propices au phénomène. Même s'il s'agit en majorité de cas particuliers, cela souligne bien le fait que l'ICU est intrinsèque de la ville et que son étude ne doit pas se restreindre aux seules belles journées d'été. Le rôle primordial de la station rurale de référence dans la détermination de l'intensité de l'ICU a également été souligné tout le long de cette partie.

La seconde grande partie de ce chapitre a été consacrée à la spatialisation de l'ICU strasbourgeois. Elle s'est essentiellement appuyée sur l'utilisation d'une classification LCZ de l'EMS. Dans un premier temps, la méthodologie permettant d'aboutir à cette cartographie LCZ a été présentée. Chaque station du réseau de mesures a ensuite pu être rattachée à un type de LCZ. Dès lors, l'objectif était de pouvoir associer un comportement et une plage d'intensités de l'ICU à une classe de LCZ donnée. Puisque l'installation du réseau de mesures précède de plusieurs années le démarrage des travaux sur les LCZ, tous les types répertoriés par la classification n'ont malheureusement pas pu être recouverts. Il a tout de même été possible d'étudier le comportement thermique de cinq classes de LCZ sur les treize recensées, et de ce fait d'étudier l'intensité et la dynamique de l'ICU en fonction du type de LCZ. De plus, le grand nombre de stations météorologiques classées en LCZ 2 a offert la possibilité de mettre en évidence la persistance d'une variabilité intra-LCZ. Bien que celle-ci ait contribué à mettre en évidence le potentiel d'atténuation de la végétation, il est toujours possible qu'elle résulte avant tout d'erreurs de classification ou de la localisation problématique de certaines stations. Enfin, l'étude du lien entre caractéristiques des LCZ et comportement de l'ICU a permis d'aboutir à une tentative de cartographie détaillée de l'ICU maximal moyen sur tout le territoire de l'EMS.

Plusieurs aspects développés au sein de cette thèse restent à creuser et à améliorer, en particulier la partie consacrée aux LCZ qui reste pour le moment exploratoire. La plupart des stations composant le réseau de mesures ont fonctionné sur une période temporelle réduite, ne permettant pas d'étudier le comportement des LCZ sur le long terme. En outre, en raison de l'antériorité du réseau, beaucoup de stations ne sont pas forcément représentatives du type de LCZ auquel elles appartiennent. Pour autant, l'objectif de dresser un état des lieux de l'ICU strasbourgeois aussi complet que possible à ce stade, tant sur sa variabilité temporelle que sur sa structure spatiale, a été atteint. Les limites persistantes de ce chapitre constitueront autant de nouvelles directions et perspectives de recherche qu'il sera possible d'aborder dans des études ultérieures. Cela nécessiterait indubitablement la mise en place d'un réseau permanent de stations météorologiques fixes sur le territoire de l'EMS.

L'approche expérimentale sur laquelle repose ce chapitre rend également possible l'acquisition de l'ensemble des données nécessaires au test et à la validation de modèles numériques. Ceux-ci, en plus d'appréhender l'ICU et les processus qui le gouvernent à toutes les échelles, permettent aussi de tester des hypothèses, de prédire ou d'évaluer l'impact de projets d'aménagement sur l'ICU. La modélisation numérique constitue de ce fait une approche parfaitement complémentaire à l'expérimentation de terrain, et c'est dans cet esprit qu'elle est développée au sein du chapitre suivant.

Chapitre 2 : Modélisation numérique à différentes échelles

Lors du chapitre précédent, l'exploitation des données issues des expérimentations de terrain a permis de définir la structure spatiale de l'ICU strasbourgeois à l'échelle de l'agglomération. Cependant, cette approche présente inévitablement certaines limites : d'une part, il restera toujours des zones non couvertes par le réseau de stations météorologiques. Par conséquent, certains détails demeurent impossibles à obtenir par le seul biais des méthodes statistiques. D'autre part, la mise en place d'aménagements intégrant la lutte contre l'ICU se doit de prendre en compte les spécificités propres à chaque quartier, et même les caractéristiques des différentes rues les composant. L'étude de l'ambiance climatique au sein de zones urbaines spécifiques requiert donc le passage à des échelles bien plus fines que celle de l'agglomération, aisément atteignables par la modélisation numérique.

Approche complémentaire à l'expérimentation de terrain, la modélisation constitue un moyen efficace pour générer des informations en tout point et sur l'ensemble des variables modulant le climat urbain (Oke et al., 2017). Outre la possibilité de se substituer à des données mesurées là où elles sont difficiles à obtenir, les simulations permettent de mieux cerner les processus atmosphériques régissant le climat urbain et leurs interactions avec les villes (Hidalgo et al., 2008), de quantifier les conséquences d'un plan d'aménagement à l'échelle d'une agglomération ou d'un quartier (Masson et al., 2013a), ou encore d'éprouver l'efficacité de mesures d'atténuation de l'ICU et du stress thermique (Martins et al., 2016). Il existe une multitude de modèles climatiques travaillant à différentes échelles spatiales. Parmi eux, ceux de méso-échelle simulent l'agglomération entière et les zones rurales limitrophes, et tiennent compte des rétroactions existantes entre le milieu urbain et les basses couches atmosphériques. Ils offrent ainsi une vision globale des processus affectant l'ensemble de la ville. Les modèles de micro-échelle se focalisent quant à eux sur des zones de dimension beaucoup plus restreinte (quartiers, rues, bâtiments) et visent à simuler le microclimat local en reproduisant la géométrie 3D du tissu urbain le plus fidèlement possible. Ils permettent donc de cibler des zones d'intérêt et de reproduire l'ambiance climatique y régnant avec un haut niveau de détail. Les spécificités complémentaires caractérisant chacune de ces catégories de modèles leur confèrent des avantages et des inconvénients leur étant propres : de ce fait, parvenir à les faire fonctionner ensemble permettrait de tirer avantage de leurs atouts respectifs.

C'est dans cet esprit que depuis une vingtaine d'années, l'équipe TRIO a recours à la modélisation numérique pour simuler le climat urbain de Strasbourg. Des simulations ont ainsi été réalisées respectivement aux échelles mésoclimatique (Kastendeuch et al., 2010) et microclimatique (Ringebach, 2004 ; Kastendeuch et al., 2017). Une analyse a notamment établi un lien direct entre ces deux catégories de modèles en réalisant un couplage entre méso-échelle et micro-échelle (Kastendeuch & Najjar, 2015). Au cours de cette thèse, il nous a été donné l'occasion d'approfondir ces travaux lors d'une collaboration avec l'Agence Régionale de Santé (ARS), l'EMS et Météo-France dont l'objectif était d'établir un diagnostic de l'ICU strasbourgeois via une modélisation à méso-échelle (Goret, 2021). Cette opportunité nous a permis de réitérer l'expérience, cette fois à l'échelle d'un quartier entier et en y intégrant de nouveaux champs d'investigation.

L'objectif de ce chapitre consiste ainsi à mettre au point et valider un tel couplage entre modèles méso et microclimatiques, afin de disposer à terme d'une chaîne de simulation multi-échelle pouvant modéliser à un niveau de détail élevé l'ambiance climatique de n'importe quelle zone urbaine. En premier lieu, les résultats des modèles microclimatiques sont testés et évalués à travers une phase de validation multivariable qui s'appuie sur les données acquises lors de l'expérimentation INTERREG IV. Dans un deuxième temps, le couplage entre la méso-échelle et la micro-échelle est appliqué sur un quartier spécifique de Strasbourg. La faisabilité de la démarche est alors éprouvée en vérifiant que les résultats restent cohérents entre les différents modèles. Enfin, les sorties sont comparées à des données issues d'une campagne de mesures spécialement dédiée à l'évaluation de la chaîne de simulation.

2.1. Validation des modèles

Dans cette thèse, il était initialement prévu d'effectuer les simulations uniquement par le biais de modèles à micro-échelle puisqu'un des objectifs recherchés est d'établir des prescriptions détaillées sur des zones urbaines de dimension restreinte. En utilisant à la fois la géométrie 3D réelle du tissu urbain et une description approfondie des caractéristiques des matériaux, les modélisations microclimatiques permettent en effet de reproduire la morphologie d'un quartier ou d'une rue de manière réaliste, et par conséquent d'obtenir des résultats extrêmement précis. Au cours des travaux, l'intégration de notre équipe comme partenaires scientifiques au sein de l'analyse menée par Météo France (Goret, 2021) dans le cadre du Contrat Local de Santé 2020, a toutefois permis d'inclure les résultats d'un modèle de méso-échelle à notre étude. Cette démarche, dont l'intérêt et la mise en place sont présentés plus en détails dans la partie 2.1, rend possible la combinaison d'échelles de simulation différentes par l'utilisation conjointe de plusieurs modèles numériques.

Quel que soit le modèle employé, il est avant tout essentiel d'estimer le degré de confiance qu'on peut lui accorder sur la pertinence de ses sorties. C'est pourquoi après avoir présenté les différents modèles utilisés au sein de la thèse, cette partie se consacre à leur validation en procédant à des comparaisons avec des mesures de terrain. Cette évaluation cherche à suivre les recommandations émises par Crank et al. (2018) et Tsoka et al. (2018), et par conséquent met un point d'honneur à ne pas se restreindre à l'examen des variables présentes au sein des fichiers de forçage.

2.1.1. Présentation des modèles

Au sein de cette thèse, trois modèles numériques sont utilisés. D'une part, les données de modélisation obtenues à méso-échelle proviennent du système de simulation Méso-NH/SURFEX (Masson, 2000). D'autre part, deux modèles microclimatiques simulent le climat à l'échelle du quartier. Le premier, LASER/F (Kastendeuch et al., 2017) est un modèle thermo-radiatif développé au sein de l'équipe TRIO du laboratoire ICube. Le second, ENVI-Met (Bruse & Fleer, 1998), est un logiciel commercial reposant sur le recours aux équations de la mécanique des fluides. L'emploi conjoint de ces deux modèles de micro-échelle se justifie par leurs avantages et faiblesses spécifiques, liés à leur catégorie respective.

2.1.1.1. Méso-NH/SURFEX

Dans le cadre du contrat passé entre Météo France, l'ARS et l'EMS, les simulations à méso-échelle ont été réalisées à l'aide de la plateforme Climat Urbain Étude (CLUE) développée par le Centre National de la Recherche Météorologique (CNRM) et s'appuyant sur le système Méso-NH/SURFEX. Celui-ci associe le modèle atmosphérique non-hydrostatique Méso-NH (Lafore et al., 1998 ; Lac et al., 2018) au schéma de surface SURFEX (Masson, 2000 ; Masson et al., 2013b).

En tant que modèle météorologique, Méso-NH fonctionne à partir d'un maillage atmosphérique (Figure 25) : l'atmosphère y est découpée en volumes (nommés voxels) possédant une certaine résolution horizontale et verticale. Afin de pouvoir être couplé à Méso-NH, le schéma de surface SURFEX travaille donc à la même résolution spatiale que le modèle atmosphérique, celle-ci allant de quelques kilomètres à une centaine de mètres. Il simule ainsi les échanges thermiques, radiatifs et hydriques se produisant entre la surface terrestre et l'atmosphère. À chaque grand type d'occupation du sol (océans et lacs, forêts, villes) correspond un schéma de surface donné dans Méso-NH. Parmi eux, le module Town Energy Budget (TEB) décrit le milieu urbain et est chargé de modéliser les processus se déroulant au sein de la canopée urbaine. Même s'il est possible de différencier le contenu de chaque maille, la résolution spatiale utilisée oblige à recourir à des paramétrisations : au sein d'une maille, la ville est décrite de manière simplifiée, avec des canyons urbains d'orientation équiprobable, des

bâtiments de même hauteur et composé des mêmes matériaux. Ce compromis permet de conserver des temps de calcul raisonnables tout en préservant la diversité du milieu urbain puisque les valeurs des indices décrivant le canyon (hauteur moyenne du bâti, pourcentage de végétation...) peuvent être adaptées à chaque maille.

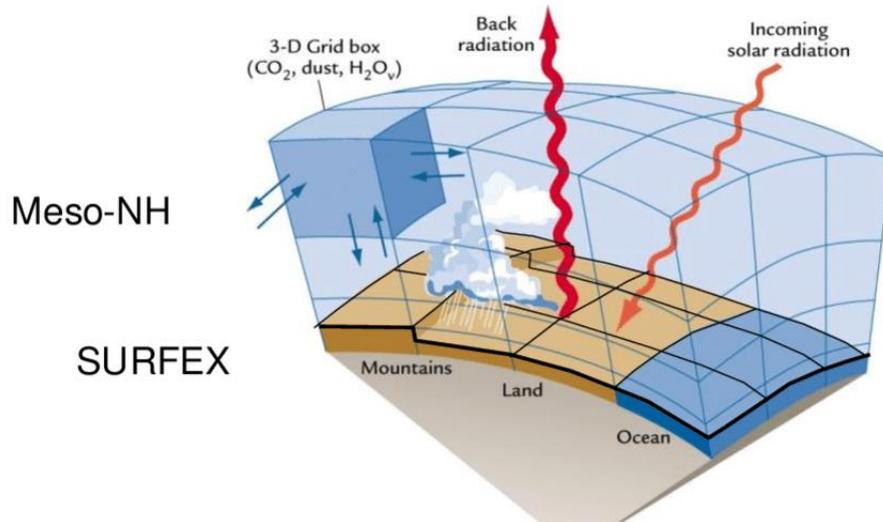


Figure 25 – Principe du couplage entre le modèle atmosphérique Meso-NH et le schéma de surface SURFEX (source : [Kastendeuch \(2022\)](#) d'après [Ruddiman \(2001\)](#)).

Imposé par le contrat ARS, le choix du système Meso-NH/SURFEX comme modèle de méso-échelle peut s'appuyer sur de nombreuses études menées sur plusieurs villes françaises ([Tremeac et al., 2012](#), [Kwok et al., 2019](#), [Bernard et al., 2022](#)). Il s'agit en outre d'un modèle fréquemment employé au sein des travaux de l'équipe TRIO via des collaborations régulières avec Météo France : une première validation de Meso-NH/SURFEX à Strasbourg avait ainsi déjà été réalisée à l'aide de données acquises en 2002, lors de la campagne de mesures menée à l'occasion du projet RECLUS ([Kastendeuch & Najjar, 2009](#)). Le système a été par la suite plusieurs fois mis en œuvre sur l'EMS afin de modéliser l'ICU à l'échelle de l'agglomération ([Kastendeuch et al., 2010](#) ; [Kastendeuch & Najjar, 2015](#)).

La simulation la plus récente a d'ailleurs été conduite dans le cadre de l'étude par Météo France pour l'Eurométropole ([Goret, 2021](#)). L'ICU de l'agglomération a été modélisé à une résolution de 250 m durant une période estivale normale (du 25 juin au 2 juillet 2016) et une période estivale caniculaire (du 28 juin au 2 juillet 2015). Deux zones, dont le centre-ville strasbourgeois, ont également bénéficié de simulations à plus haute résolution (100 m). Ces périodes de simulation ont été sélectionnées afin de correspondre à celle durant laquelle l'ensemble du réseau de stations météorologiques INTERREG IV a fonctionné (cf. chapitre 1.1.2). En effet, les données d'observation utilisées par [Goret \(2021\)](#) proviennent toutes de ce réseau et ont servi au contrôle des résultats de Meso-NH/SURFEX. Parmi ces derniers, une cartographie de l'ICU de l'EMS le plus fréquent entre minuit et 2h du matin a été réalisée à 2 m de hauteur (Figure 26, à gauche). En termes de configuration spatiale, elle présente de nombreux points communs avec celle obtenue à partir des données de terrain du réseau INTERREG IV (Figure 26, à droite), pourtant obtenue à partir d'une toute autre méthode (cf. chapitre 1.3.2.1). L'ensemble des résultats issus de cette simulation sont disponibles au sein du rapport fourni pour cette étude ([Goret, 2021](#)).

2.1. Validation des modèles

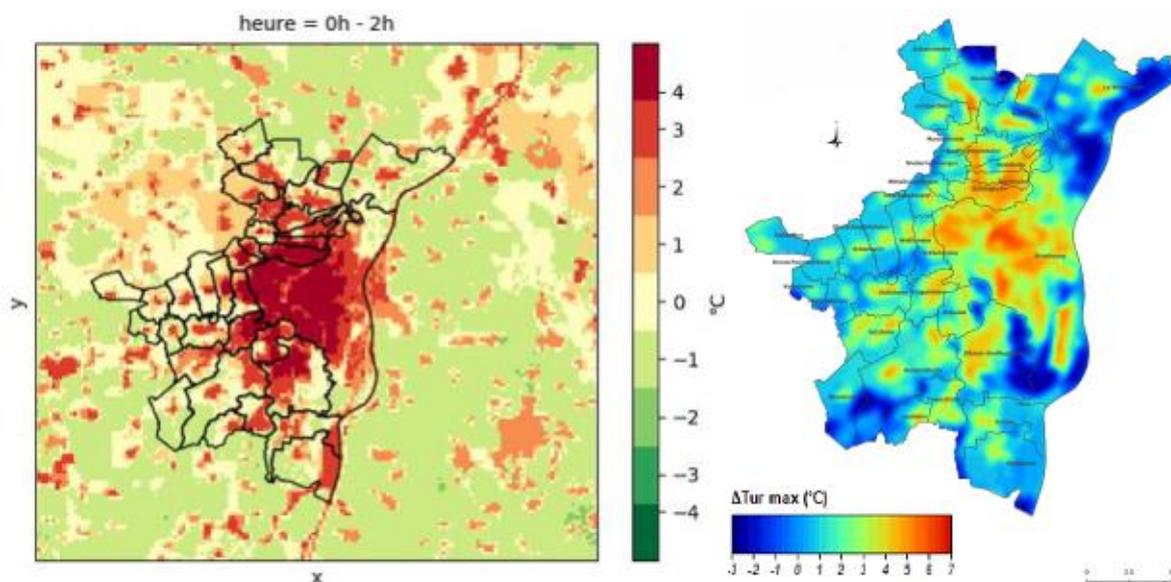


Figure 26 – Cartographie de l’ICU de l’EMS le plus fréquent entre 0h et 2h du matin simulé par Mésó-NH/SURFEX à 250 m de résolution pour la période estivale caniculaire du 28 juin au 2 juillet 2015 (à gauche, source [Goret \(2021\)](#)), comparée à la cartographie de l’ICU maximal moyen obtenue pour des belles journées de l’été 2015 par la méthodologie mise au point par Unger (à droite, source [Philipps et al. \(2020\)](#)).

Désormais, tous les modèles de méso-échelle sont couplés avec un schéma de surface pour la ville et les principaux types de surfaces. Ces derniers ne cessent d’évoluer, atteignant des résolutions de plus en plus fines (de l’ordre de la centaine de mètres) et intégrant de nouvelles fonctionnalités comme la modélisation des arbres urbains ([Redon et al., 2020](#) ; [Bernard et al., 2022](#)). Néanmoins, ces modèles atteignent irrémédiablement leurs limites lorsqu’on cherche à travailler à l’échelle d’un îlot ou d’une rue, nécessitant alors de se tourner vers des logiciels travaillant à de plus hautes résolutions.

2.1.1.2. LASER/F

Le modèle microclimatique LASER/F (*LA*tent, *SE*nsible and *R*adiation *F*luxes) est développé depuis 2002 par l’équipe TRIO ([Kastendeuch et al., 2006](#), [Kastendeuch et al., 2017](#)). Il s’agit d’un modèle thermo-radiatif, calculant en détail les bilans radiatifs et d’énergie en tout point d’une zone de simulation. En revanche, LASER/F choisit de s’affranchir des équations de la dynamique des fluides afin de réduire les temps de calcul, et a de ce fait recours à des paramétrisations pour obtenir un comportement moyen de certaines variables atmosphériques comme la température de l’air, l’humidité relative et la vitesse du vent ([Kastendeuch & Najjar, 2015](#)).

Modéliser à très haute résolution les transferts radiatifs et les composantes du bilan d’énergie implique de disposer d’une géométrie détaillée en 3D de la zone étudiée. Le domaine de simulation, dont un exemple est fourni par la figure 27, correspond ainsi à une maquette 3D qui est divisée en mailles de dimension comprise entre 100 m et 1 km. Au sein d’une maille donnée se trouvent plusieurs objets représentant les éléments constituant le milieu urbain (bâtiments, routes, arbres...), chacun disposant de propriétés physiques lui étant propres. De cette manière, le bilan d’énergie peut être obtenu pour n’importe quel objet ou face le composant. En plus de la description géométrique de la zone d’études et des caractéristiques des différents matériaux, le modèle nécessite d’être alimenté en entrée par des données de forçage fournissant les conditions météorologiques au-dessus de la canopée urbaine. Le forçage et le paramétrage de LASER/F sont décrits en détail au sein de l’annexe G.

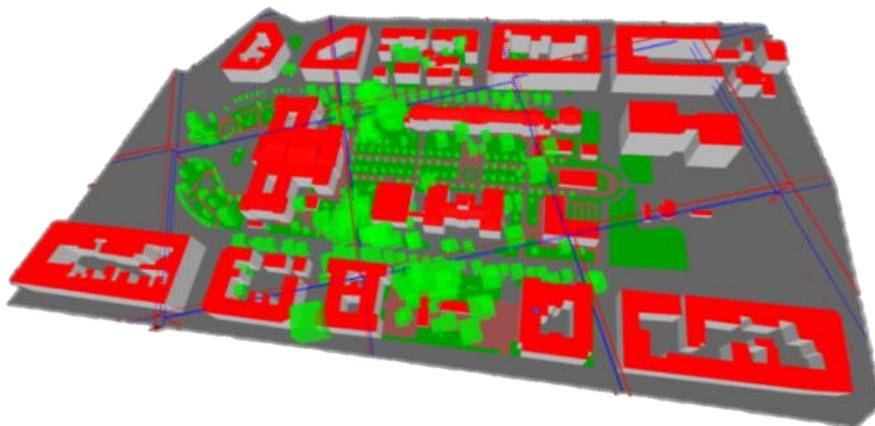


Figure 27 – Maquette 3D de la zone du Jardin du Palais Universitaire représentée par LASER/F. Les carrés représentent le maillage appliqué au domaine de simulation (ici des mailles de dimension 150 x 150 m).

Depuis son lancement, LASER/F a pu bénéficier de plusieurs tests et validations et a été utilisé dans le cadre de diverses analyses du climat urbain à Strasbourg. À partir de données de terrain issues de plusieurs campagnes de mesures (Najjar et al., 2004 ; Najjar et al., 2015), le modèle microclimatique a été ainsi éprouvé sur ses capacités à simuler les variables de rayonnement et les composantes du bilan d'énergie au sein d'un canyon (Kastendeuch et al., 2006 ; Kastendeuch et al., 2009), d'un quartier (Kastendeuch et al., 2017), et d'un parc urbain (Bournez, 2018). D'autres variables comme la température de surface (Jacob, 2016 ; Roupioz et al., 2018) ou les flux d'évapotranspiration (Bournez, 2018) ont également fait l'objet de contrôles et de validations.

L'ensemble de ces analyses ont permis à LASER/F de faire ses preuves dans la modélisation d'un canyon urbain. Or le développement du modèle n'est pas entièrement achevé et certains aspects doivent encore être approfondis. C'est notamment le cas du module de l'arbre, développé au sein des travaux de Landes et al. (2014) et Bournez (2018), et de la simulation des indices de confort. Afin d'avoir une idée du potentiel de LASER/F sur ces aspects, il a de ce fait été choisi dans cette thèse d'en comparer les résultats avec ceux du modèle ENVI-Met, doté de modules complets de la végétation et du confort thermique et largement utilisé à travers le monde.

2.1.1.3. ENVI-Met

Développé par Bruse & Fleer (1998), ENVI-Met est un modèle microclimatique conçu pour la simulation des interactions entre atmosphère, bâti, surface et végétation en milieu urbain. À la différence des modèles thermo-radiatifs, il s'appuie sur les équations de la dynamique des fluides (CFD) pour simuler finement l'écoulement de l'air autour des bâtiments. Des phénomènes complexes comme les mouvements de l'air au sein des rues (Gallagher et al., 2012) et la dispersion de polluants (Sun et al., 2021) sont ainsi reproduits avec précision, au prix cependant d'une complexité accrue et de temps de calcul importants (Jänicke et al., 2021). Le lecteur intéressé pourra se référer à Huttner (2012) pour davantage d'informations sur les équations CFD régissant le fonctionnement du modèle.

Comme LASER/F, ENVI-Met utilise la représentation géométrique en 3D pour modéliser les zones simulées, mais sous forme de cubes dont la résolution spatiale est comprise entre 0,5 et 10 m (Figure 28). Les éléments de la scène sont ainsi représentés sous la forme d'un ensemble de cellules composant une grille régulière. En plus des bilans radiatifs et d'énergie, l'emploi de la CFD permet de calculer les variables atmosphériques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent...) pour chaque cellule du domaine de simulation. ENVI-Met dispose en outre d'un module complet de végétation 3D, ainsi que d'un outil calculant les principaux indices de confort, notamment l'Universal Thermal Index (UTCI) (Bröde et al., 2012) et le Physiological Equivalent Temperature (PET) (Höppe, 1999). À l'instar de

2.1. Validation des modèles

LASER/F, les données d'entrée dont le logiciel a besoin pour fonctionner sont la géométrie de la zone et les conditions météorologiques. Elles sont détaillées dans l'annexe H, avec le paramétrage d'ENVI-Met.

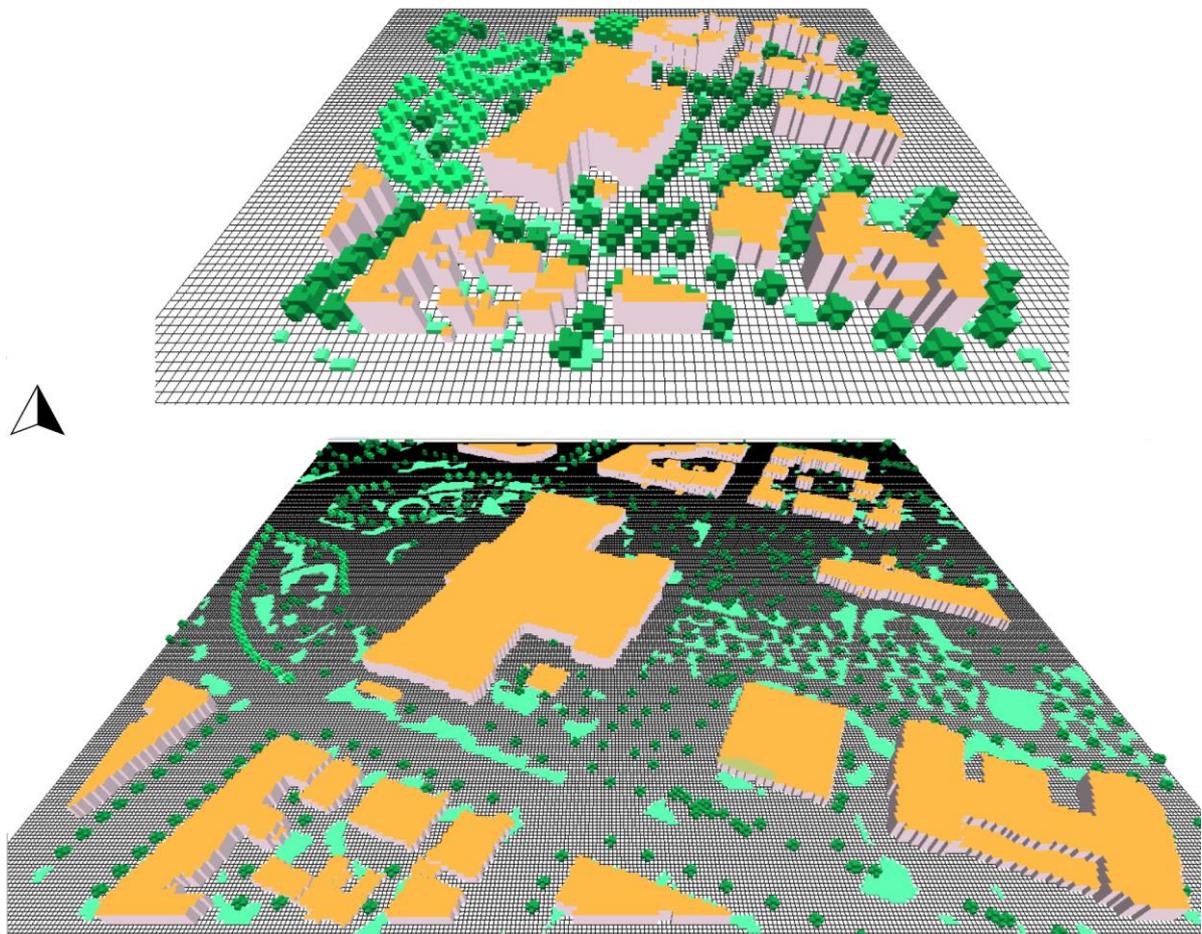


Figure 28 – Maquette 3D de la zone du Jardin du Palais Universitaire représentée par ENVI-Met, à résolution horizontale 4 m (en haut) et 1 m (en bas). Les différents objets (murs en gris, toits en orange, arbres en vert foncé et végétation basse en vert clair) sont représentés sous forme de cubes.

ENVI-Met jouit d'une importante notoriété du fait du très grand nombre d'équipes de recherche à travers le monde l'utilisant pour l'étude du climat urbain. Il s'agit d'un des modèles microclimatiques ayant le plus fait l'objet d'analyses (Tsoka et al., 2018), et il est également considéré comme étant un des logiciels les plus complets en termes de simulation du confort thermique (Balany et al., 2020). Dans cette thèse, il a de ce fait été choisi d'utiliser ENVI-Met conjointement à LASER/F, à la fois pour bénéficier de l'apport d'un modèle CFD reconnu mondialement et évaluer la capacité de LASER/F à simuler plusieurs variables caractérisant le microclimat urbain, et en particulier les indices de confort.

2.1.2. Zone d'étude, période de simulation et données associées

Zone d'étude sélectionnée pour la validation des modèles, le jardin du Palais Universitaire correspond à un parc urbain typique (Figure 29). Situé à Strasbourg, à seulement 1 km du centre-ville, le fonctionnement de sa végétation arborée et son intégration dans un modèle microclimatique ont fait l'objet d'analyses poussées au sein des travaux de Bournez (2018) dans le cadre de l'ANR COOLTREES. Il s'agit également de la station du Jardin Universitaire (JU), un des principaux sites du réseau météorologique INTERREG IV (cf. Figure 1 et Annexe A).

Une validation d'un modèle climatique vise avant tout à évaluer sa capacité à reproduire les processus physiques à l'origine des microclimats urbains, et de ce fait à simuler les composantes du bilan d'énergie. Or il s'agit de variables très difficiles à obtenir sur le plan expérimental, nécessitant une procédure et des capteurs spécifiques (Bournez, 2018). Parmi les sites constituant le réseau INTERREG IV, seuls deux d'entre eux mesurent les flux de chaleur : le premier est localisé sur le toit de la mairie de Schiltigheim (cf. Annexe A), et le second en plein cœur du jardin du Palais U. C'est sur ce dernier que le choix s'est porté en tant que site de validation des modèles, d'une part parce qu'il a déjà été utilisé pour des tests et des évaluations du module de végétation de LASER/F dans les travaux de Bournez (2018), et d'autre part parce qu'en tant que parc urbain, il offre la possibilité d'analyser directement le rôle de la végétation sur les flux de chaleur et les variables climatiques.



Figure 29 – Visualisation aérienne de la zone du Jardin du Palais Universitaire (à gauche, source : Google Maps) et aperçu du cœur du parc urbain (à droite, source Bournez (2018)).

Le forçage météorologique nécessaire aux modèles microclimatiques provient aussi de la campagne de mesures INTERREG IV. L'initialisation de ces derniers impose par ailleurs la connaissance des conditions radiatives au-dessus de la zone d'études (rayonnement direct, diffus et IR atmosphérique), dont les données proviennent d'un site expérimental spécialement équipé et installé sur le toit d'un bâtiment du campus universitaire (cf. Figure 1 et Annexe A). Bien que mesurée par un anémomètre situé sur le mât du jardin du Palais U, la vitesse et la direction du vent ont dû être adaptées dans le fichier de forçage pour correspondre aux exigences d'ENVI-Met : aucune valeur de vitesse de vent n'est ainsi possible en-dessous de 0,8 m/s et la direction du vent a été moyennée sur la journée considérée. Cet ajustement nous a été conseillé par les développeurs du logiciel et vise à éviter la survenue d'erreurs de turbulence conduisant à un arrêt brutal des simulations (www.envi-met.info).

Outre les données météorologiques, les modèles nécessitent également d'être alimentés par des données d'occupation du sol, ainsi que par des informations sur la géométrie 3D. Un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) a ainsi été obtenu pour les différentes zones modélisées à partir de la maquette 3D des bâtiments dont dispose désormais l'EMS à l'échelle de l'agglomération entière via son service Géomatique et Connaissance du Territoire (GCT). Toutes les données relatives à la forme et la hauteur du bâti, l'occupation des sols et la végétation arborée proviennent par conséquent de ce service. Les différentes bases de données dont elles sont issues sont exposées dans Landes et al. (2020).

Dans la partie qui suit, les résultats des modèles LASER/F et ENVI-Met sont confrontés à des données de terrain provenant de la zone du Jardin du Palais Universitaire pour la belle journée du 7 juillet 2016 (pour plus de détails sur les conditions météorologiques, se référer à l'Annexe I). Les simulations démarrent le 6 juillet 2016 à minuit TU, le moment recommandé de lancement d'une modélisation étant au cours de la nuit ou avant le lever du soleil pour faciliter la simulation du rayonnement solaire (Wang et al., 2016). La journée du 6 juillet 2016 correspond au temps de chauffe nécessaire à la bonne initialisation des modèles (spin-up) et n'est donc pas prise en compte dans leur évaluation. Le contrôle des résultats du système Mésoscale-NH/SURFEX a quant à lui été effectué par Goret

2.1. Validation des modèles

(2021) sur un très grand nombre de stations météorologiques du réseau INTERREG IV, et portait principalement sur la température de l'air.

2.1.3. LASER/F

Au cours de la thèse, plusieurs versions de LASER/F ont été utilisées : les résultats présentés dans cette section sont issus de la version 2.1.0 du modèle thermo-radiatif. Les grandeurs évaluées incluent aussi bien les composantes du bilan d'énergie que les indices de confort.

La comparaison des variables climatiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) avec les données de terrain n'est pas effectuée ici : il s'agit en effet de données de forçage, dont l'évaluation ne présente pas de véritable intérêt, d'autant plus pour LASER/F qui approxime les comportements moyens de ces grandeurs à l'échelle de la maille. De plus, le modèle thermo-radiatif attribue à chacune des mailles composant le domaine de simulation un type de LCZ selon les seuils définis par [Stewart & Oke \(2012\)](#) (cf. chapitre 1.3.1) (<https://sites.google.com/view/laserf>). D'après ce système de classification, les caractéristiques du Jardin du Palais U dans LASER/F en termes de géométrie et d'occupation du sol le désignent comme appartenant à une LCZ 5. Or depuis la dernière version de LASER/F, seules les LCZ de type 1 à 4 sont considérées comme étant des canyons urbains. Aucune température de canyon n'est donc calculée par le modèle pour les mailles ne correspondant pas à ces types de LCZ : c'est la température de l'air issue du forçage météorologique qui est alors directement utilisée au sein de la maille considérée. Ce choix apparaît plus réaliste pour un site se rapportant à un parc urbain.

2.1.3.1. Validation des flux de chaleur

Le climat urbain résulte en partie de l'altération des bilans radiatifs et d'énergie engendrée par les caractéristiques radiatives, thermiques et dynamiques propres aux zones urbaines ([Oke et al., 2017](#)). Expriment les quantités d'énergie échangées entre une surface et l'atmosphère sous forme de rayonnement, conduction et convection, le bilan d'énergie d'une zone urbaine (en l'absence d'une source d'émission de chaleur anthropique) peut ainsi se résumer par l'équation suivante :

$$0 = RN + H + LE + G \quad (2)$$

L'énergie se répartit par conséquent entre le **rayonnement net** (RN, W/m²), le **flux de chaleur sensible** (H, W/m²) qui quantifie le transfert de chaleur entre surface et atmosphère, le **flux de chaleur latente** qui correspond à la chaleur associée au transport de vapeur d'eau entre surface et atmosphère (LE, W/m²) et le **flux de chaleur dans le sol** qui traduit l'emmagasinement ou le stockage d'énergie (G, W/m²). Le comportement de ces variables permet de cerner l'origine des particularités du climat urbain, et notamment de l'ICU, d'où l'importance de leur validation dans les modèles climatiques.

L'évaluation de LASER/F commence donc par une validation des flux turbulents, qui se répartissent en chaleur sensible et en chaleur latente. Au sein du Jardin du Palais U, ces flux sont mesurés à l'aide d'une combinaison d'un anémomètre sonique (CSAT3 – *Campbell*), capteur mesurant la vitesse du vent en trois dimensions, et d'un analyseur de gaz (LI-7500A – *LI-cor*) permettant d'obtenir la quantité de vapeur d'eau et la concentration en CO₂ dans l'air. Positionnés sur un mât de 17 m de hauteur situé au centre du parc, la combinaison de ces mesures permet le calcul des flux de chaleur sensible et latente émanant de l'emprise du capteur ([Bournez, 2018](#)). Ce sont les données brutes issues des capteurs qui sont utilisées dans cette partie, aucune étude de l'emprise du footprint² du site d'étude n'ayant été réalisée. Afin d'améliorer la pertinence de la comparaison entre valeurs mesurées et simulées, des

² Footprint : zone alimentant les flux mesurés par un capteur. Son extension varie dans le temps en fonction de la vitesse et la direction du vent.

capteurs fictifs ont été introduits dans la scène de LASER/F, exactement au même emplacement et à la même hauteur que leurs homologues réels.

La figure 30 présente ainsi la comparaison du flux de chaleur sensible mesuré avec celui simulé par LASER/F. Sur l'ensemble de la journée, le flux apparaît bien modélisé par LASER/F, tant au niveau de ses valeurs que de sa dynamique. Le R^2 et la RMSE obtenus sont ainsi proches de ceux calculés lors des travaux de Bournez (2018) pour des périodes antérieures (R^2 allant de 0,72 à 0,96, et RMSE comprises entre 30,8 et 52,4 W/m^2). Cependant, la différence majeure entre ces résultats et ceux de Bournez (2018) réside dans le fait que LASER/F parvient désormais à simuler des valeurs nocturnes négatives pour le jardin du Palais U. Le même problème avait été observé lors de l'utilisation des anciennes versions de LASER/F au cours de cette thèse. Il est fort probable que ce changement résulte d'une modification de l'emplacement du capteur flux dans la scène au cours de la simulation la plus récente, et par conséquent de son emprise : le flux émanant de la façade du Palais U était sans doute trop pris en compte. Cela ne souligne que davantage encore l'importance du footprint dans la détermination des flux turbulents, et la nécessité d'en cerner l'emprise réelle.

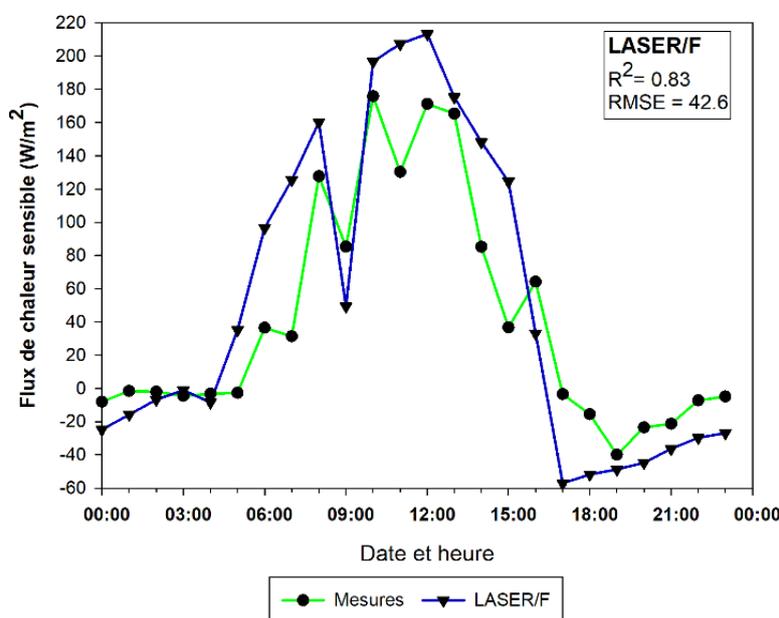


Figure 30 – Comparaison du flux de chaleur sensible simulé par LASER/F et ENVI-Met avec les données mesurées pour la journée du 7 juillet 2016.

Les valeurs élevées du flux de chaleur latente mesuré illustrent pleinement l'influence de la végétation sur le bilan d'énergie (Figure 31) : le flux atteint en effet jusqu'à 410 W/m^2 et se maintient au-dessus de 300 W/m^2 entre 10h et 15h TU. Il s'agit de la période où l'ensemble de la végétation se trouvant dans le Jardin du Palais U est éclairée par le soleil. À titre comparatif, le flux de chaleur latente mesuré sur le toit de la mairie de Schiltigheim, qui est un site beaucoup plus minéral (cf. annexe A), ne dépasse pas 135 W/m^2 pour la même journée (annexe J).

Les résultats obtenus pour LASER/F montrent que ce dernier arrive plutôt bien à reproduire la dynamique journalière du flux de chaleur latente. Tout comme pour le flux de chaleur sensible, les valeurs des indicateurs statistiques de LASER/F sont comparables à celles obtenues par Bournez (2018), avec une légère amélioration de la RMSE. Le modèle thermo-radiatif présente une cinétique du flux cohérente, avec un pic survenant autour de midi et des valeurs nocturnes très faibles, ce qui est en accord avec le fait communément admis que les plantes ne transpirent pas la nuit. LASER/F semble tout de même enclin à surestimer le flux de chaleur latente ($MBE = 41,6 W/m^2$), en particulier l'après-midi.

2.1. Validation des modèles

Cette surévaluation au plus fort de la journée pourrait potentiellement s'expliquer par des valeurs de LAD³ trop élevées pour les arbres.

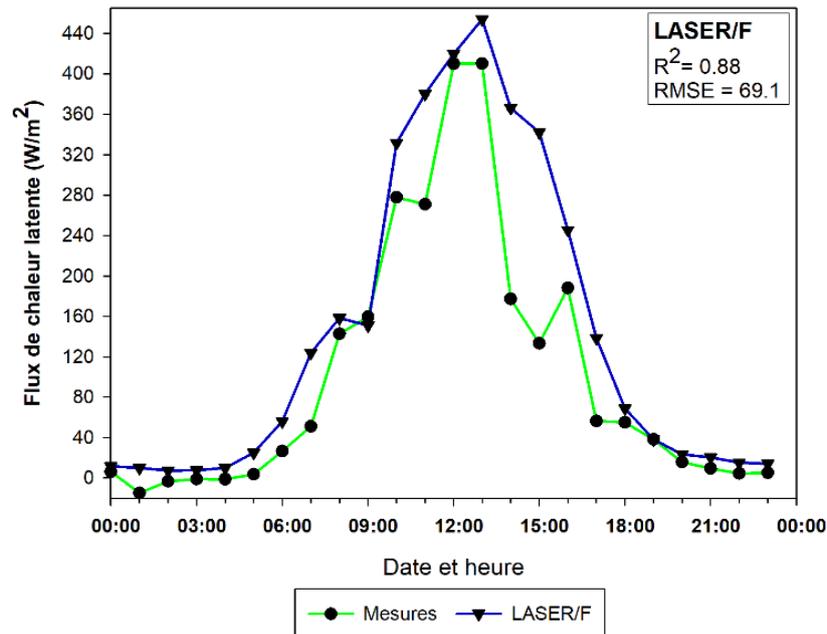


Figure 31 – Comparaison du flux de chaleur latente simulé par LASER/F et ENVI-Met avec les données mesurées pour la journée du 7 juillet 2016.

En se basant sur ces résultats, force est de constater que LASER/F parvient à reproduire correctement le comportement des flux de chaleur turbulents dans un parc urbain. Dès lors, il reste à estimer dans quelle mesure le modèle est capable de simuler l'ambiance climatique ressentie au sein du site du Jardin du Palais, notamment en évaluant son aptitude à modéliser certains indices de confort.

2.1.3.2. Évaluation de la TMRT et des indices de confort

Défini comme l'état de satisfaction éprouvé envers son environnement thermique (MacGregor, 2011), le confort thermique peut être évalué à travers le prisme de divers indices. La plupart appartiennent à la catégorie des indices dits « simples » et n'utilisent que des variables climatiques de base dans leurs formules respectives (Blazejczyk et al., 2012). Or il existe une catégorie d'indices plus complexes, qui incorporent dans leur calcul les aspects du bilan thermique humain en plus des variables météorologiques. Ces indices de confort dits « rationnels » sont plus précis, mais aussi plus difficiles à calculer que les indices simples car ils intègrent dans leurs formules la température radiante moyenne (Mean Radiant Temperature ou TMRT).

La TMRT est définie comme une température évaluant le rayonnement total perçu par le corps humain (Chen et al., 2014). Il ne s'agit pas d'une variable mesurée directement, et elle fait certainement partie des grandeurs les plus complexes à déterminer. D'ailleurs, il existe différentes méthodes permettant de la calculer (Kantor & Unger, 2011), chacune d'entre elles ayant ses propres avantages et inconvénients. La justesse de cette variable est cependant cruciale puisqu'il s'agit du principal paramètre duquel va résulter le calcul des indices de confort rationnels comme l'UTCI et le PET.

³ LAD : Densité surfacique foliaire (Leaf Area Density). Il s'agit de la moitié de la surface foliaire totale contenue dans le volume de la couronne foliaire (Jupp et al., 2009 in Bournez, 2018).

Une des techniques expérimentales les plus employées pour obtenir la TMRT est la méthode des six directions (Höppe, 1992). Elle consiste à mesurer le bilan radiatif 3D dans les six directions définissant l'environnement d'un corps humain (nord, sud, est, ouest, haut, bas). La proportion de rayonnement reçue par l'organisme dans chaque direction est ensuite déterminée par le biais de coefficients de pondération empiriques (Thorsson et al., 2014). À ce jour, il s'agit de la méthode considérée comme la plus fiable puisqu'elle repose sur la mesure du rayonnement à la base de la TMRT (Chen et al., 2014 ; Kantor et al., 2014). Cette technique requiert toutefois l'utilisation de nombreux capteurs (six pyranomètres et six pyrghéomètres pour mesurer le rayonnement dans toutes les directions et longueurs d'ondes), ce qui la rend coûteuse et complexe à mettre en œuvre. De plus, des études ont montré que certains des coefficients de pondération empiriques utilisés pouvaient conduire à des surestimations (ou au contraire à des sous-estimations) du rayonnement absorbé par le corps humain dans une ou plusieurs directions (Chen et al., 2014).

Une autre méthode, plus accessible, repose sur l'utilisation de capteurs de type globe noir ou globe gris. La TMRT peut ainsi être obtenue à partir de la température mesurée par le globe, celle-ci étant proportionnelle à la quantité de rayonnement absorbée par la sphère. À partir de cette variable, il est alors possible de calculer la TMRT à l'aide de formules prenant également en compte les caractéristiques spécifiques au globe noir ou au globe gris (diamètre, émissivité), la température de l'air et la vitesse du vent (Thorsson et al., 2007). Cette méthode présente l'avantage d'être moins coûteuse et d'être plus facilement reproductible, car nécessitant moins de matériel et reposant sur des formules de calcul plutôt simples (Chen et al., 2014). Cependant, cette dépendance vis-à-vis de plusieurs autres grandeurs, ainsi que la complexité d'acquisition de la température du globe, font que l'obtention de la TMRT par le biais de cette technique n'est pas non plus exempte de potentielles erreurs. Quelle que soit la méthode employée, il est donc nécessaire de rester prudent dans l'interprétation des valeurs obtenues.

Dans ce chapitre, les valeurs de la TMRT calculée à partir de mesures sont obtenues par le biais de la méthode du globe. Au sein du Jardin du Palais U, un globe noir et un globe gris ont ainsi été installés à environ 2 m du sol. Les caractéristiques de ces appareils sont décrites dans les travaux de Bournez (2018), et les formules permettant d'obtenir respectivement la TMRT du globe noir et celle du globe gris sont détaillées au sein de l'annexe K.

La comparaison des TMRT simulées par LASER/F est effectuée à la fois avec la TMRT calculée à partir de la température du globe noir (Figure 32, à gauche) et avec celle obtenue à l'aide du globe gris (Figure 32, à droite). En termes de prédiction des valeurs, les simulations de LASER/F semblent plus cohérentes avec les mesures du globe gris, rejoignant les conclusions issues des travaux de Bournez (2018). Le modèle thermo-radiatif tend ainsi à sous-estimer la TMRT diurne, et plus particulièrement celle issue du globe noir ($MBE_{LASER/F} = -7,6^{\circ}\text{C}$). À l'opposé, la TMRT nocturne est surestimée de manière similaire par les deux globes ($MBE_{LASER/F\text{ nocturne}} = 4,3^{\circ}\text{C}$ pour les deux globes). Lorsqu'il est question de la cinétique de la variable, on peut toutefois noter que le modèle se rapproche davantage de la dynamique obtenue à partir du globe noir.

Compte tenu de la complexité inhérente à l'obtention de la TMRT, il est difficile de fournir une explication à de telles divergences entre valeurs mesurées et modélisées. À première vue, ces écarts pourraient résulter d'un problème de simulation : la surestimation de la TMRT nocturne pourrait par exemple s'expliquer par une température de surface trop élevée qui engendrerait alors un rayonnement infrarouge montant trop important : cette possibilité avait déjà été évoquée par Bournez (2018). L'absence de mesures de la température de surface ne nous permet toutefois pas de tester cette possibilité, qui reste dès lors à l'état d'hypothèse. Il sera cependant au moins possible de vérifier si cette surévaluation de la TMRT nocturne se produit également pour des zones dont la typologie correspond davantage à celle du canyon urbain.

2.1. Validation des modèles

Rien ne permet non plus d'exclure la possibilité que le problème provienne des mesures. Du fait de la forte sensibilité des capteurs des sphères à la vitesse du vent, la technique des globes peut conduire à des valeurs de TMRT nettement plus élevées et instables que celles obtenues par le biais de la méthode des six directions (Chen et al., 2014). Cette potentielle surestimation pourrait expliquer pourquoi LASER/F, qui calcule la TMRT à partir du bilan radiatif, affiche des valeurs plus faibles que celles mesurées. D'ailleurs, les équations permettant d'obtenir la TMRT à partir de la température du globe soulèvent également des interrogations, notamment concernant les unités de mesure de certains paramètres : les études que nous avons consultées utilisent dans ces équations un diamètre du globe soit en millimètres (Thorsson et al., 2007 ; Kántor & Unger, 2011), soit en mètres (Guo et al., 2018 ; Staiger & Matzarakis, 2020). Dans notre cas, nous avons tranché en faveur du mètre, en raison des résultats plus convaincants obtenus avec cette unité (cf. annexe K). Cet exemple illustre cependant à lui seul l'incertitude demeurant autour de l'utilisation de ces équations empiriques.

Actuellement, aucune des méthodes expérimentales permettant l'obtention de la TMRT ne peut donc être considérée comme étant une référence absolue (Chen et al., 2014 ; Thorsson et al., 2014). Il est de ce fait beaucoup plus difficile d'expliquer les différences entre les résultats. Des investigations supplémentaires seront nécessaires afin de comparer les différentes méthodes d'obtention de la TMRT entre elles, et par conséquent de mieux cerner l'origine de leurs divergences. En attendant, il s'agira dès lors de conserver une certaine prudence dans l'interprétation des résultats de la TMRT, mais également des indices de confort qui en dépendent fortement.

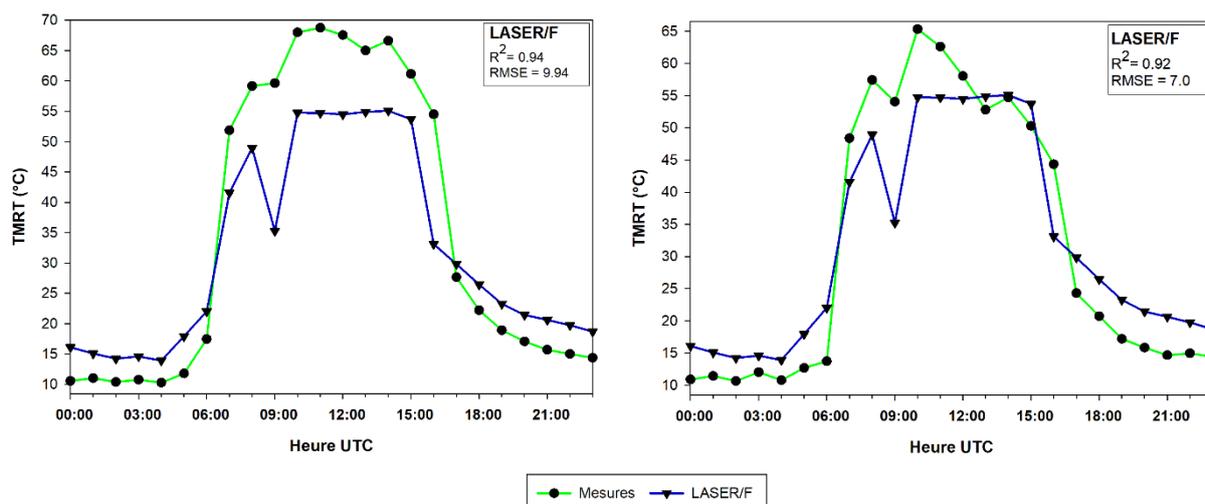


Figure 32 – Température moyenne radiante simulée par LASER/F à 2 mètres comparée à celle mesurée par le globe noir (à gauche) et celle mesurée par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016 au Jardin du Palais U.

Parmi les indices de confort rationnels, notre choix s'est porté sur le PET et l'UTCI : ce sont en effet les deux indices les plus plébiscités au sein des études bioclimatiques. Leurs échelles de sensation respectives figurent en annexe L. Comme pour la TMRT, les deux indices simulés par LASER/F et ENVI-Met sont ici comparés à ceux calculés respectivement à partir des données du globe noir et du globe gris.

Malgré les problèmes rencontrés lors de la modélisation de la TMRT, les résultats de l'UTCI s'avèrent relativement satisfaisants (Figure 33). Le fait que la formule de l'indice de confort intègre également d'autres paramètres (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) permet en effet d'en limiter les répercussions sur sa dynamique. On observe tout de même une tendance à la sous-estimation de l'indice en période diurne ($MBE_{LASER/F \text{ diurne}} = -0,9^{\circ}\text{C}$ pour le globe noir ; $MBE_{LASER/F \text{ diurne}} = 0,5^{\circ}\text{C}$ pour le globe gris) et une surestimation en période nocturne ($MBE_{LASER/F \text{ nocturne}} = 1,4^{\circ}\text{C}$ pour les deux globes), qui découlent directement du comportement de la TMRT. Il semble cependant

important de noter que LASER/F parvient à simuler les différents niveaux de stress thermique, et notamment ceux atteints au plus fort de la journée. À l’instar de ce qui a été observé pour la TMRT, le degré de proximité des simulations avec les mesures reste tout de même tributaire du capteur utilisé : les résultats associés au globe gris présentent systématiquement de meilleurs indicateurs statistiques que ceux issus du globe noir.

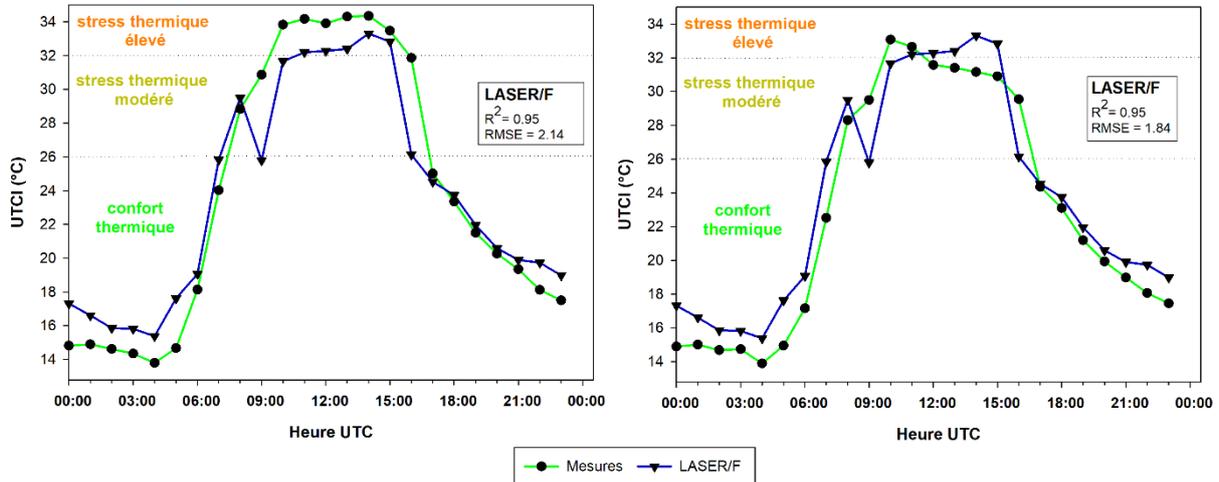


Figure 33 – UTCI simulé par LASER/F à 2 mètres comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016 au Jardin du Palais U.

Les résultats de l’UTCI démontrent une bonne capacité de LASER/F à simuler le confort thermique. Il semble de ce fait intéressant d’évaluer également son aptitude à modéliser le PET, qui demeure l’indice de confort le plus utilisé dans les analyses bioclimatiques (Morakinyo et al., 2016 ; Lee et al., 2020 ; Abdallah & Mahmoud, 2022).

Comme pour l’UTCI, la figure 34 souligne une cohérence évidente entre les sorties du modèle et les données obtenues à partir des deux globes. Toutefois d’après les grandeurs statistiques, les résultats obtenus sont un peu moins bons que pour l’UTCI, avec des RMSE pouvant approcher, voire dépasser 5°C, ce qui se traduit par des erreurs d’estimation du stress thermique : LASER/F peut ainsi sous-évaluer de un à deux niveaux le stress thermique atteint en journée. Cette sous-estimation diurne vaut particulièrement pour le PET obtenu à partir du globe noir ($MBE_{diurne\ LASER/F} = -3,2^{\circ}C$). Les valeurs du PET modélisé par LASER/F se rapprochent en effet plutôt de celles du globe gris, notamment au plus fort de la journée. Cependant, la cinétique du modèle correspond davantage à celle du PET issu du globe noir, à l’image de ce qui avait été montré pour l’UTCI. Ce constat est d’ailleurs exactement le même que celui de Bournez (2018) lors de la toute première validation de l’UTCI simulé par LASER/F.

La pertinence des modélisations de l’UTCI et du PET reste tributaire de celle de la TMRT, laquelle est nécessaire au calcul des deux indices. En conséquence, comprendre l’origine des divergences entre valeurs simulées et mesurées des indices de confort impliquera nécessairement de mener une analyse comparative des différentes méthodes d’obtention de la TMRT, afin d’en cerner les avantages et inconvénients respectifs.

2.1. Validation des modèles

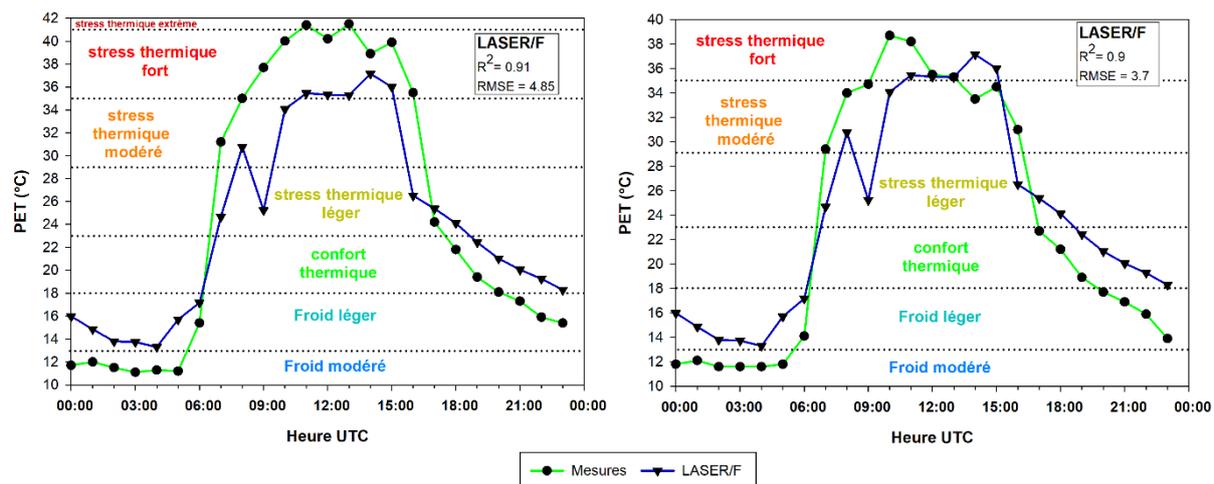


Figure 34 – PET simulé par LASER/F à 2 mètres comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016 au Jardin du Palais U.

Les résultats exposés au sein de cette partie prouvent qu'il est possible d'accorder un certain degré de confiance à LASER/F dans sa capacité à simuler des composantes du bilan d'énergie, ainsi que le confort thermique d'un parc urbain. La section suivante se consacre à l'évaluation des sorties d'ENVI-Met. Celle-ci va permettre d'une part de comparer les résultats de LASER/F par rapport à ceux d'un modèle jouissant d'une bonne notoriété en termes de simulation du confort thermique, et d'autre part de bénéficier de l'apport complémentaire d'un modèle CFD.

2.1.4. ENVI-Met

La version d'ENVI-Met employée dans cette thèse est la version 5.0.1 (ENVI-Met, 2022). Les simulations avec ENVI-Met étant très coûteuses en termes de temps de calcul, il avait finalement été décidé de l'utiliser à une résolution de 4x4x3 m, bien que le modèle puisse atteindre des résolutions plus fines encore (Bruse & Fleer, 1998). De ce fait, afin de nous assurer que cette concession ne débouche pas sur une éventuelle diminution trop importante de la cohérence des résultats, une analyse de l'influence de la résolution des cellules sur la pertinence des sorties d'ENVI-Met a été réalisée pour l'ensemble des variables utilisées, à l'image de ce qu'avaient proposé Salata et al. (2016) : cette analyse s'effectue par l'intermédiaire d'une comparaison des résultats d'ENVI-Met à résolution 4x4x3 m avec ceux à résolution 1x1x3 m.

Seul le contrôle des variables climatiques et des indices de confort est effectué dans cette partie. Il n'a en effet pas été possible de valider les flux de chaleur sensible et latente pour le modèle ENVI-Met. Contrairement à LASER/F, le modèle CFD ne permet d'obtenir aucun de ces deux flux en données de sortie⁴ : les seuls flux de chaleur pouvant être extraits d'ENVI-Met ne prennent en compte ni le bâti, ni la végétation, se restreignant à la surface. Par conséquent, ils sont incomparables à nos données de terrain.

2.1.4.1. Contrôle des variables climatiques

Au sein de cette section sont évaluées les principales variables climatiques, à savoir la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Ces grandeurs font toutes trois partie des variables constituant le forçage météorologique de LASER/F et d'ENVI-Met : de ce fait, leur évaluation ne présente en soi qu'un intérêt limité et ne constitue pas une véritable validation. Néanmoins, la majorité

⁴ Ces précisions sur le fonctionnement d'ENVI-Met et sur les résultats pouvant en être extraits ont toutes été recueillies sur le forum des utilisateurs (www.envi-hq.com) lors de discussions avec les développeurs du modèle.

des études impliquant l'utilisation du modèle ENVI-Met ne valident ce dernier qu'à partir de ces variables (Müller et al., 2014 ; Abdallah & Mahmoud, 2022 ; Balany et al., 2022), voire uniquement via la température de l'air (Ng et al., 2012 ; Jamei et al., 2017), du fait qu'elles ne disposent pas d'autres données sur leurs zones d'études (Balany et al., 2020). C'est donc uniquement à titre d'exemple et de comparaison qu'une telle vérification est proposée ici.

L'évolution des températures de l'air à 2 m modélisées par ENVI-Met est exposée figure 35. Les données simulées sont obtenues à l'aide d'un capteur fictif situé au même endroit que celui utilisé lors de l'expérimentation. Quelle que soit la résolution appliquée, le modèle tend à surestimer la température diurne ($RMSE_{diurne\ rés\ 4\ m} = 1,1^{\circ}C$ et $RMSE_{diurne\ rés\ 1\ m} = 1,5^{\circ}C$). Ces résultats vont dans le sens de ceux issus de Lee et al. (2016), et Salata et al. (2016) qui eux aussi mettent en évidence une surestimation de la température en journée. Il est en revanche plus étonnant de noter que la résolution horizontale la plus fine ne soit pas celle présentant les meilleurs indicateurs statistiques, contrairement à ce que Salata et al. (2016) avaient démontré à travers la comparaison de résultats fournis par trois résolutions différentes. Nous n'avons pas d'explications à ce jour concernant la moindre performance d'ENVI-Met lors de l'utilisation d'une résolution horizontale à 1 m. En outre, si ENVI-Met surestime la température de l'air diurne pour le Jardin du Palais U, d'autres études comme Liu et al. (2020) et Detommaso et al. (2021) soulignent au contraire une tendance du modèle à la sous-estimer. L'analyse de dizaines d'études réalisées avec ENVI-Met dans le cadre d'une méta-analyse effectuée par Tsoka et al. (2018) ne débouche d'ailleurs sur aucune tendance générale : ni les conditions géographiques et climatiques du site d'études considéré, ni les périodes temporelles traitées ne permettent d'expliquer la dynamique du modèle. Cette absence de tendance s'avère délicate car il est de ce fait beaucoup plus difficile de trouver des explications sur l'origine d'un comportement particulier.

Malgré la surestimation diurne, les valeurs des grandeurs statistiques se rapprochent de celles répertoriées au sein d'autres analyses pour la simulation de la température de l'air (Tsoka et al., 2018; Heris et al., 2020), et sont même comprises parmi celles présentant les résultats les plus convaincants (RMSE médiane de $1,51^{\circ}C$ relevée par Tsoka et al. (2018) sur un total de 48 études analysées). Ce constat est tout de même à tempérer puisque nous travaillons avec une version très récente d'ENVI-Met (v 5.0.1), tandis que l'ensemble des études auxquelles nous avons eu accès utilisent des versions antérieures et donc potentiellement moins performantes.

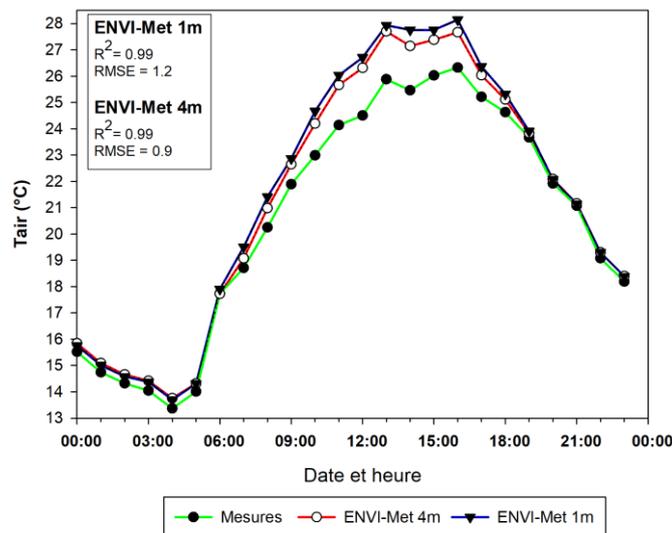


Figure 35 – Comparaison de la température de l'air simulée par ENVI-Met selon différentes résolutions horizontales avec les données mesurées pour la journée du 7 juillet 2016.

2.1. Validation des modèles

Tout comme la température de l'air, l'humidité relative simulée par ENVI-Met à résolution 4 m présente une légère surestimation diurne ($RMSE_{\text{diurne rés} 4\text{ m}} = 3,33\%$) et une excellente corrélation nocturne ($RMSE_{\text{nocturne rés} 4\text{ m}} = 0,82\%$) (Figure 36). Cette tendance est également rapportée par [Salata et al. \(2016\)](#). Contrairement à ce qui avait été constaté pour les flux de chaleur et la température de l'air, la résolution à 1 m affiche cette fois de meilleurs indicateurs statistiques que la résolution 4 m ($RMSE_{\text{diurne rés} 1\text{ m}} = 1,78\%$ et $RMSE_{\text{nocturne rés} 1\text{ m}} = 0,6\%$), avec des valeurs d'humidité relative nettement plus faibles au plus fort de la journée. Ces valeurs plus basses peuvent s'expliquer par les plus hautes températures diurnes simulées à résolution 1m, l'humidité relative restant en effet très sensible aux variations de la température de l'air au cours de la journée ([Kastendeuch et al., 2019](#)).

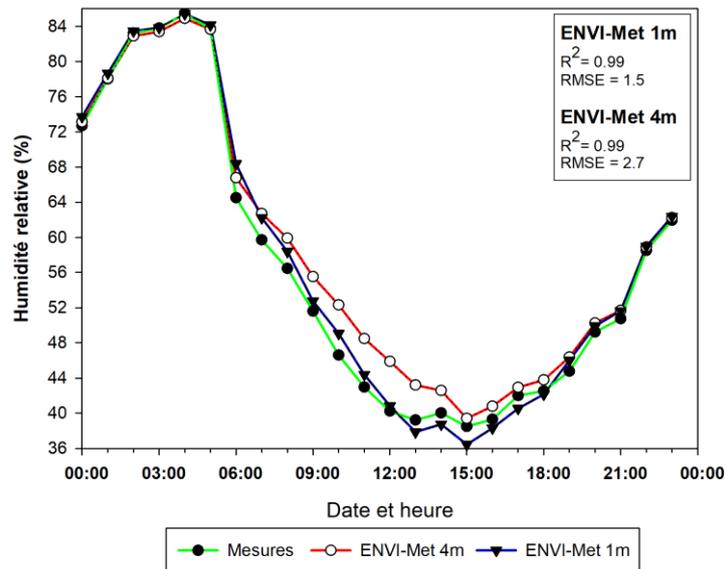


Figure 36 – Comparaison de l'humidité relative simulée par ENVI-Met à 2 mètres selon différentes résolutions horizontales avec les données mesurées lors de la journée du 7 juillet 2016 pour le Jardin du Palais U.

Le contrôle de l'humidité relative se justifie principalement par le fait qu'elle constitue une des variables entrant dans le calcul de l'UTCI et du PET, et donc qu'il est essentiel que le modèle la simule correctement. Même s'il s'agit d'une variable ayant fait l'objet de plusieurs analyses comparatives menées avec ENVI-Met ([Tsoka et al., 2018](#)), l'intérêt de la tester reste néanmoins limité, puisque son comportement dépend fortement de la température de l'air. De ce fait, la pression partielle en vapeur d'eau, communément utilisée en météorologie pour l'analyse du contenu en vapeur d'eau de l'air, peut représenter une variable plus intéressante à évaluer.

La pression partielle en vapeur d'eau n'est pas directement mesurée et s'obtient en deux étapes. En premier lieu, il est nécessaire de calculer la pression saturante en vapeur d'eau (ew , hPa) par le biais de la formule de Tetens (Eq. 3) :

$$ew = 6,107 * 10^{(7,5 * \frac{T_{air}}{237,3 + T_{air}})} \quad (3)$$

On obtient ensuite la pression partielle en vapeur d'eau (e , hPa) en pondérant la pression saturante en vapeur d'eau avec l'humidité relative (Eq. 4) :

$$e = ew * \frac{HR}{100} \quad (4)$$

Afin d’obtenir la pression partielle en vapeur d’eau modélisée par ENVI-Met, les valeurs de la température de l’air et de l’humidité relative simulées par le modèle CFD sont directement utilisées dans les équations (3) et (4). Les valeurs obtenues sont ensuite comparées à celles calculées à partir des données de terrain (Figure 37). Contrairement à ce qui a été constaté pour la température de l’air et l’humidité relative, la corrélation entre valeurs simulées et mesurées est nulle, et ceci quelle que soit la résolution d’ENVI-Met utilisée. Cependant, lorsqu’on analyse séparément les périodes nocturne et diurne, on remarque que la corrélation est excellente pour la première ($R^2 > 0,96$ pour les deux résolutions), et absente pour la seconde ($R^2 < 0,05$ pour les deux résolutions). Ces fortes différences en journée entre valeurs modélisées et mesurées découlent du cumul de la surestimation de la température de l’air et de l’humidité relative (cf. figures 35 et 36), dont la pression partielle en vapeur d’eau reste tributaire (cf. Eq (3) et Eq (4)). En raison de ces résultats peu convaincants, nous ne nous attarderons donc pas davantage sur cette variable lors de l’évaluation des résultats d’ENVI-Met.

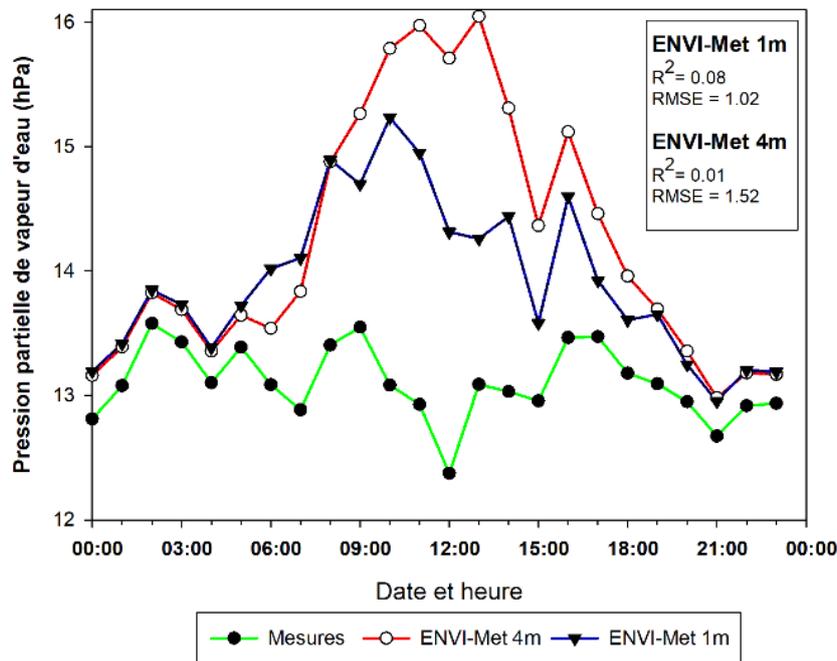


Figure 37 – Comparaison de la pression partielle en vapeur d’eau simulée par ENVI-Met selon différentes résolutions horizontales avec les données mesurées lors de la journée du 7 juillet 2016 pour le Jardin du Palais U.

Malgré des indicateurs statistiques plutôt satisfaisants, les graphiques de la figure 38 montrent bien que les vitesses du vent simulées par ENVI-Met diffèrent assez nettement de celles mesurées. Ces divergences résultent des modifications du fichier de forçage auxquelles il a fallu procéder pour éviter une instabilité de la simulation (cf. 2.1.2) : la valeur minimale de vitesse de vent a ainsi été fixée à 0,8 m/s. Cela explique pourquoi ENVI-Met diverge fortement des valeurs mesurées au moment où ces dernières sont inférieures à 0,8 m/s (par exemple entre minuit et 9h TU). Il faut s’attendre à ce que de tels écarts aient des répercussions sur les indices de confort simulés, puisque la vitesse du vent entre à la fois dans le calcul de la TMRT et dans celui de l’UTCI et du PET. Il sera toutefois certainement possible d’améliorer ces résultats après une éventuelle mise à jour d’ENVI-Met⁵ renforçant la stabilité des simulations.

⁵ La version 5.5 d’ENVI-Met disponible pour l’été 2023 comprend justement une amélioration de la stabilité des simulations, le modèle étant désormais capable d’intégrer de très faibles vitesses de vent (de l’ordre de 0,1 m/s) (www.envi-met.info).

2.1. Validation des modèles

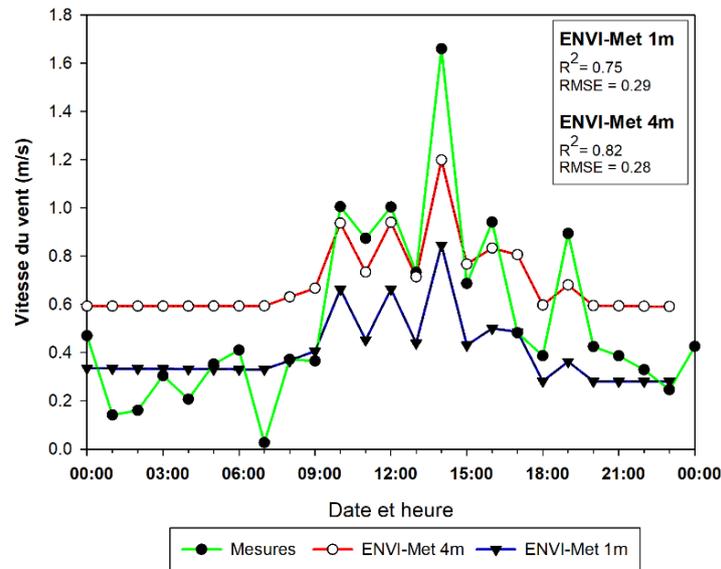


Figure 38 – Comparaison de la vitesse du vent simulée par ENVI-Met avec celle obtenue via les mesures de terrain pour la journée du 7 juillet 2016.

Il semble important de rappeler que l'ensemble des contrôles effectués dans cette section constituent une vérification de la cohérence des sorties d'ENVI-Met, et non une validation du modèle. Ces comparaisons ont été essentiellement effectuées dans l'objectif de s'assurer que le modèle parvienne à reproduire de manière relativement correcte le comportement des variables climatiques dont dépendent la TMRT et les indices de confort.

2.1.4.2. Vérification de la TMRT et des indices de confort

Les variables contrôlées dans cette section sont les mêmes que celles testées lors de l'évaluation de LASER/F, à savoir la TMRT, l'UTCI et le PET. À l'image de ce qui a été constaté pour le modèle thermo-radiatif, les valeurs de la TMRT simulée par ENVI-Met se rapprochent davantage de celles obtenues à partir du globe gris (Figure 39). Cependant, le modèle CFD sous-estime encore plus la TMRT diurne que ne le fait LASER/F, notamment par rapport à celle obtenue via le globe noir ($MBE_{ENVI-Met\ 4\ m} = -14,2^{\circ}C$ et $MBE_{ENVI-Met\ 1\ m} = -4,5^{\circ}C$). En revanche, la corrélation entre TMRT nocturne mesurée et simulée est excellente, quel que soit le globe considéré ($R^2_{nocturne} > 0,93$ et $RMSE_{nocturne} < 1,2^{\circ}C$).

Ces résultats vont plutôt à l'encontre de ceux exposés par des études antérieures, qui soulignent en majorité une importante surestimation diurne de la variable (Lee et al., 2016 ; Salata et al., 2016). À notre connaissance, seuls les travaux de Mohammad et al. (2021) montrent également une nette sous-estimation de la TMRT diurne. Or la version 5.0.1 d'ENVI-Met intègre d'importantes modifications du calcul de la TMRT (Sinsel et al., 2022), ce qui rend obsolète la comparaison avec d'autres études utilisant une version plus ancienne du modèle.

Une nette surestimation de l'impact du rayonnement diffus pourrait être à l'origine de l'importante sous-estimation de la TMRT diurne. De multiples signalements au sein d'analyses en cours et utilisant la version 5.0.1 du modèle font également part d'une telle sous-évaluation de la variable (www.envi-hq.com). Le problème est actuellement en cours de traitement au sein de l'équipe de développement du logiciel. Une autre explication résiderait également dans l'adaptation de la vitesse du vent imposée par les conditions d'ENVI-Met (cf. 2.1.4.1) : cette grandeur contribuant au calcul de la TMRT, une modification de certaines de ses valeurs horaires pourrait conduire à des différences potentiellement importantes entre mesures et simulations.

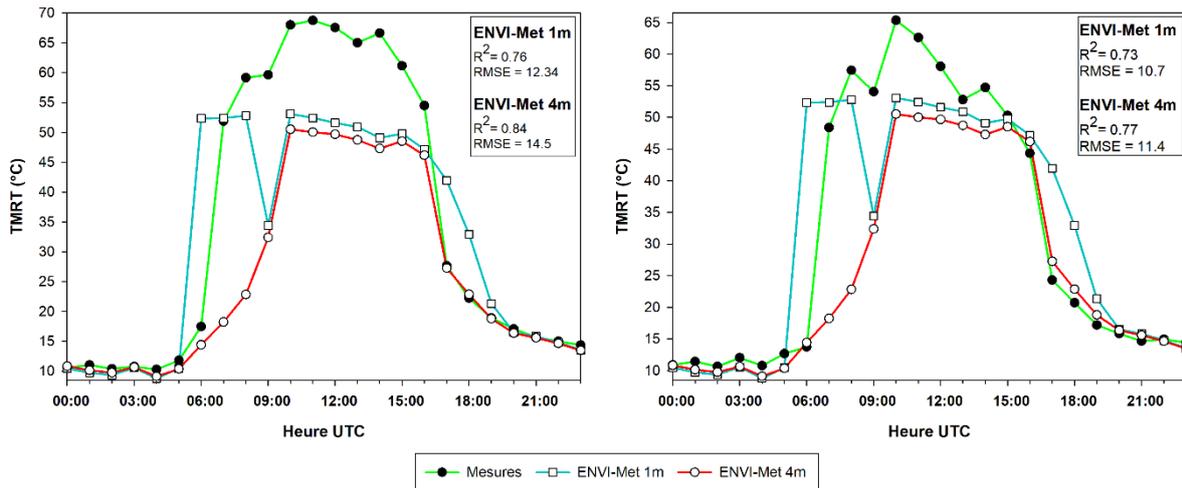


Figure 39 – Température moyenne radiante simulée par ENVI-Met à résolutions 1m et 4m comparée à celle mesurée par le globe noir (à gauche) et celle mesurée par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016.

Les résultats concernant l'UTCI simulé par ENVI-Met s'avèrent très proches de ceux obtenus pour LASER/F (Figure 40) : les répercussions de la TMRT simulée sont là aussi limitées par le fait que l'indice de confort comprend également les variables climatiques dans son calcul. La sous-estimation diurne par rapport à l'UTCI issu du globe noir reste ainsi plutôt modérée ($MBE_{ENVI-Met\ 4m} = -1,9^{\circ}C$ et $MBE_{ENVI-Met\ 1m} = 1,6^{\circ}C$), et ENVI-Met tend même à légèrement surestimer l'indice lorsque l'UTCI de référence est celui issu du globe gris ($MBE_{ENVI-Met\ 4m} = 0,5^{\circ}C$ et $MBE_{ENVI-Met\ 1m} = 3^{\circ}C$). Par ailleurs, l'UTCI nocturne est particulièrement bien simulé pour les deux globes ($R^2_{nocturne} = 0,99$ et $RMSE_{nocturne} < 0,5^{\circ}C$). Enfin, tout comme LASER/F, ENVI-Met réussit à modéliser correctement les différents niveaux de stress thermique atteints au cours de la journée simulée.

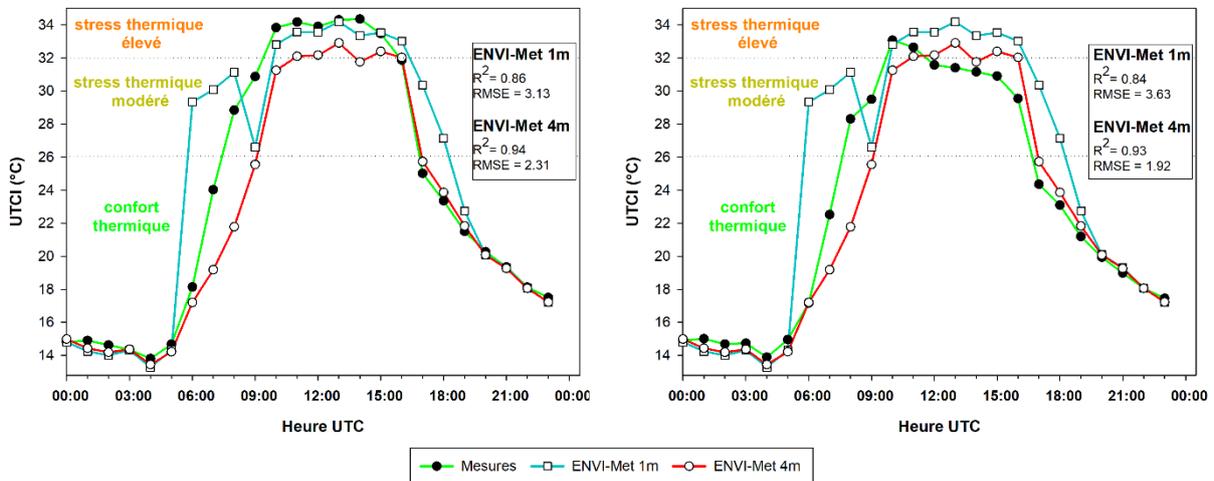


Figure 40 – UTCI simulé par ENVI-Met à résolutions 1m et 4m comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016.

À notre connaissance, il n'existe encore aucune analyse d'ENVI-Met ayant testé la capacité du modèle à simuler l'UTCI : en effet, seule la version 5.0 et celles lui faisant suite permettent d'effectuer le calcul de cet indice de confort pour des vitesses de vent inférieures ou égales à 0,5 m/s (www.envi-met.info). Par conséquent, les quelques études ayant évalué le confort thermique simulé par ENVI-Met par le biais d'un indice rationnel ont toutes utilisé le PET (Lee et al., 2016 ; Morakinyo et al., 2016 ; Lee et al., 2020 ; Abdallah & Mahmoud, 2022), ce qui nous conduit à tester également cette variable afin de pouvoir comparer nos résultats aux leurs.

2.1. Validation des modèles

Même si les indicateurs statistiques se révèlent relativement proches de ceux relevés pour l'UTCI (cf. figure 40), les résultats du PET demeurent toutefois moins pertinents (Figure 41) : lorsque le PET mesuré de référence est celui issu du globe noir, ENVI-Met peut nettement sous-estimer le PET diurne ($MBE_{ENVI-Met\ 4\ m} = -4,6^{\circ}C$ et $MBE_{ENVI-Met\ 1\ m} = 1,1^{\circ}C$), à tel point qu'il sous-évalue d'un à deux niveaux le stress thermique atteint en journée. En revanche, comme pour l'UTCI, la simulation du PET nocturne fournit des résultats très convaincants ($R^2_{nocturne} > 0,97$ et $RMSE_{nocturne} < 0,7^{\circ}C$).

S'agissant du PET, les résultats de LASER/F et d'ENVI-Met possèdent donc beaucoup de points communs : sous-estimation diurne par rapport au PET issu du globe noir, excellente corrélation nocturne... Ce constat nous conduit à rappeler que les divergences entre valeurs mesurées et simulées peuvent potentiellement résulter de biais liés à la méthode de mesure de la TMRT. Cela souligne une nouvelle fois la nécessité de mener des analyses comparatives ultérieures sur les différentes expérimentations permettant d'aboutir à cette variable.

Malgré la moindre performance d'ENVI-Met et de LASER/F en termes de simulation du PET par rapport à celle de l'UTCI, les résultats restent tout de même plutôt convaincants. Parmi les rares études à avoir validé ENVI-Met à partir du PET, [Lee et al. \(2016\)](#) obtiennent des valeurs de RMSE et de R^2 très proches de celles obtenues par les deux modèles microclimatiques (respectivement $3,1^{\circ}C$ et $0,77$), ce qui est encourageant, et ceci d'autant plus pour LASER/F dont il s'agit de la toute première validation du PET.

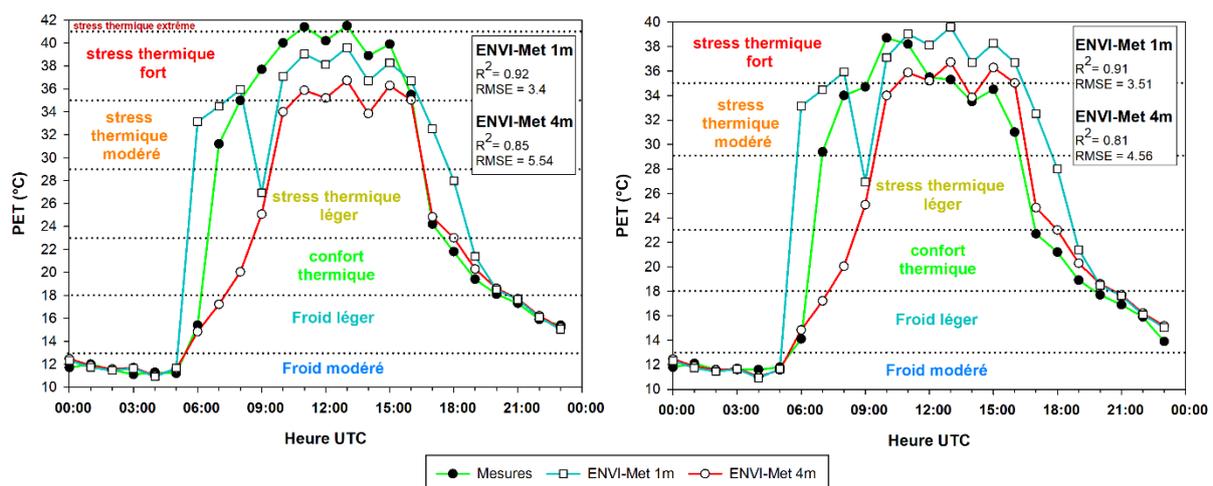


Figure 41 – PET simulé par ENVI-Met à résolutions 1m et 4m comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016.

Les différents contrôles, validations et vérifications réalisés au sein de cette partie permettent d'estimer le degré de confiance qu'il est possible d'accorder à chaque modèle microclimatique pour la simulation de paramètres allant des composantes du bilan d'énergie aux indices de confort, en passant par les variables climatiques de base. Cette phase de validation effectuée pour le site du Jardin du Palais U fournit ainsi un aperçu de la capacité des modèles à simuler le comportement d'un parc urbain, et de ce fait celui de la végétation et son rôle dans la création d'ambiances climatiques.

Dans l'ensemble, les indicateurs statistiques mettent en lumière des sorties de modèles plutôt cohérentes avec les données de terrain. De par leurs résultats respectifs, les deux modèles de micro-échelle apparaissent complémentaires : en sa qualité de modèle CFD, ENVI-Met fournit de bons résultats concernant les variables climatiques, et LASER/F en tant que modèle thermo-radiatif simule particulièrement bien les flux turbulents. En outre, LASER/F soutient la comparaison avec ENVI-Met en termes d'indices de confort, se révélant parfois même meilleur que le modèle CFD. D'ailleurs, les résultats des deux modèles indiquent que l'UTCI est mieux simulé que le PET, ce qui ne devrait toutefois

pas poser de problème dans l'étude du confort thermique à Strasbourg puisque d'après [Matzarakis et al. \(2014\)](#), les deux indices s'équivalent en termes de performance sous des climats tempérés. Quant à la résolution horizontale d'ENVI-Met, la plupart des résultats reviennent à peu près au même quelle que soit sa finesse, nous permettant de continuer les simulations avec la résolution plus grossière qui offre un gain appréciable en termes de temps de calcul.

Au vu des résultats de cette phase de validation des modèles microclimatiques, il apparaît désormais possible d'utiliser ces derniers dans la mise en place d'une chaîne de simulation, tout en gardant à l'esprit les avantages et limites propres à chacun d'eux et qui ont été exposés tout le long de cette section.

2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés

L'évaluation de LASER/F et d'ENVI-Met effectuée précédemment a montré que les deux modèles de micro-échelle obtiennent des résultats relativement convaincants. À présent, il est donc tout à fait envisageable de les utiliser à des fins de simulation sur des zones urbaines d'intérêt. C'est dans cet esprit que l'Eurométropole cherche à générer des informations sur l'ambiance climatique de plusieurs secteurs à enjeux afin d'établir des prescriptions d'urbanisme et d'aménagement.

La validation des différents modèles a également souligné l'importance de concevoir un fichier de forçage adapté aux caractéristiques des zones urbaines simulées. Cependant, cela implique de disposer, pour chacune de ces zones, de données issues de dispositifs de mesures. Or les différents secteurs urbains choisis par les services de l'EMS n'ont jamais fait l'objet d'implantation de stations météorologiques, ni de réalisation de campagne de mesures. Obtenir les fichiers de forçage des modèles microclimatiques pour ces zones nécessite de ce fait de passer par une seconde approche, qui repose sur le recours à des données issues d'un modèle de méso-échelle.

Un tel couplage entre méso et micro-échelle permettrait l'obtention de données de forçage pour l'ensemble de l'agglomération. Il serait alors possible de modéliser à l'échelle microclimatique n'importe quelle zone urbaine d'intérêt à n'importe quelle période, pourvu qu'on possède les données de géométrie et d'occupation du sol nécessaires. Dans la lignée des travaux initiés par [Kastendeuch & Najjar \(2015\)](#), cette partie se consacre donc à la mise en place, ainsi qu'à l'évaluation de la cohérence et de la qualité d'une telle chaîne de simulation multi-échelle.

2.2.1. Principe et intérêt d'un couplage entre méso et micro-échelle

En climatologie urbaine, le passage d'une échelle à une autre est essentiel : certains processus ne peuvent être analysés qu'à l'échelle de l'agglomération, tandis que d'autres nécessitent d'être appréhendés à une échelle beaucoup plus fine, comme le quartier, la rue ou même le bâtiment ([Conry et al., 2015](#)). Or réaliser un transfert d'échelles s'avère très complexe et coûteux selon une approche expérimentale. Seule la modélisation, à travers l'utilisation combinée de modèles à différentes échelles, permet de travailler à l'échelle d'une agglomération entière tout en réalisant des zooms sur un secteur particulier. En principe, la mise en place d'un couplage entre méso et micro-échelle rendrait ainsi possible la simulation d'une ville à toutes les échelles et résolutions spatiales possibles.

Le principal intérêt d'un tel couplage réside dans la génération de données nécessaires à la conception de fichiers de forçage adaptés à une zone urbaine spécifique pour les modèles microclimatiques. Ces derniers nécessitent d'être alimentés par plusieurs variables atmosphériques et radiatives (cf. annexes G et H), dont certaines ne sont pas aisées à obtenir expérimentalement. C'est notamment pour cette raison que de nombreuses analyses menées à l'aide d'ENVI-Met ne peuvent pas s'appuyer sur un forçage horaire complet adapté à la zone simulée ([Tsoka et al., 2018](#)). Générer des forçages météorologiques à partir d'un modèle de méso-échelle constitue donc une alternative intéressante à l'acquisition de données de terrain.

2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés

La chaîne de simulation proposée est présentée figure 42. La première étape est régulièrement appliquée lors de modélisations impliquant le système Més0-NH/SURFEX (Kastendeuch et al., 2010 ; Koukou-Arnaud et al., 2012 ; Lemonsu et al., 2013), et s'appuie sur le modèle global Integrated Forecasting System (IFS) du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Ce dernier génère des champs météorologiques à une résolution maximale de 16 km, qui sont ensuite utilisés pour forcer toutes les six heures le premier modèle atmosphérique Més0-NH (le modèle-père) fonctionnant à l'échelle synoptique à une résolution de l'ordre de 10 km. Le second modèle Més0-NH (le modèle-fils) prend alors le relais à l'échelle mésoclimatique : il fonctionne à une résolution kilométrique et est forcé toutes les cinq minutes par les sorties du modèle-père. Les résultats obtenus par Més0-NH servent alors de forçage météorologique à la fois à SURFEX, LASER/F et ENVI-Met.

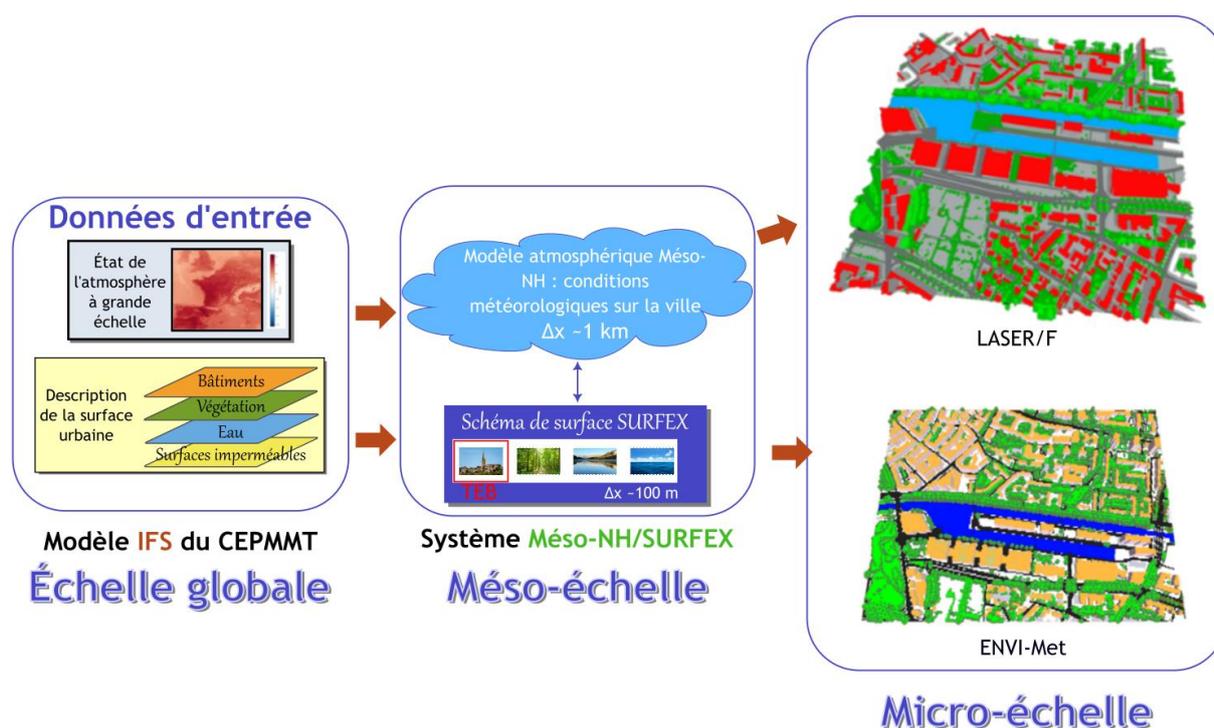


Figure 42 – Ensemble de la chaîne de simulation multi-échelle et des modèles impliqués (d'après Goret (2021)).

Une fois l'emboîtement de modèles mis en place, il suffit d'extraire les résultats atmosphériques obtenus par Més0-NH au-dessus de la zone d'intérêt, puis de les intégrer en tant que données de forçage des modèles microclimatiques. Les sorties de LASER/F et d'ENVI-Met sont ensuite comparées à celles du système Més0-NH/SURFEX sur une maille commune : il s'agit de vérifier que les résultats respectifs des modèles mésoclimatiques et microclimatiques restent cohérents à l'échelle qu'ils ont en commun (correspondant à celle du quartier), et de ce fait de prouver le bon fonctionnement de la chaîne de simulation. Les comparaisons sont effectuées pour chacune des composantes du bilan d'énergie, ainsi que pour l'UTCI.

2.2.2. Application sur une zone à l'échelle du quartier

Afin de vérifier la cohérence des sorties du modèle méso-climatique avec celles des modèles microclimatiques, la chaîne de simulation est appliquée sur une zone précise correspondant au secteur Malraux, lors de la période allant du 28 juin au 2 juillet 2015 pour laquelle nous ne disposons d'aucune mesure. Cependant, une simulation avec le système Més0-NH/SURFEX a été lancée au cours de cette période estivale caniculaire dans le cadre du projet avec l'ARS (cf. 2.1.1.1). Comparer les sorties de

Méso-NH/SURFEX avec celles de LASER/F et d'ENVI-Met afin d'éprouver la cohérence du couplage entre méso et micro-échelle, nécessitait donc de sélectionner cette période.

2.2.2.1. Présentation du site d'études

Située à moins d'un kilomètre de l'hypercentre strasbourgeois, la zone Malraux correspond à un quartier mixte établi autour du bassin d'Austerlitz (Figure 43). Ce secteur est principalement composé d'aménagements récents et fait encore l'objet de perspectives de développement, dans le cadre du projet urbain Deux Rives (Strasbourg Deux Rives, 2022) et de la démarche de la Ceinture Verte de Strasbourg (DUT, 2022).

En tant que site d'études, le secteur Malraux présente plusieurs spécificités qui en font une zone de grand intérêt scientifique. Tout d'abord, de par sa proximité avec le centre-ville, il s'agit d'une zone où l'ICU nocturne se manifeste de manière particulièrement intense, comme le montrent bien les cartographies du phénomène (cf. Figure 26). De plus, le site affiche une importante diversité de géométrie et d'occupation du sol : d'après la classification LCZ de Landes et al. (2020), dont un zoom est disponible en annexe A, la Presqu'île Malraux, le centre commercial Rivétoile et le bâtiment de l'UGC sont localisés au cœur d'une LCZ 4, tandis que les zones situées au nord du Quai des Alpes et au sud de l'Avenue du Rhin se trouvent dans des LCZ 5. Le Quai des Alpes et le Parc de l'Etoile correspondent quant à eux à des LCZ E. Ce sont donc au total trois types de LCZ que contient le secteur représenté sur la figure 43. L'appartenance des différentes zones composant le secteur à ces types de LCZ s'avère particulièrement intéressant, d'autant plus qu'il s'agit de classes pour lesquelles nous ne disposons jusqu'ici d'aucune station météorologique de référence. En outre, la présence notable de l'eau nous donne l'occasion pour la première fois d'effectuer une modeste tentative d'analyse de son rôle, encore peu étudié, dans la création de microclimats urbains.

Au-delà de l'intérêt scientifique de la zone, ce sont également des enjeux urbanistiques qui ont motivé le choix de Malraux en tant que site d'études. Ce secteur est en effet concerné par plusieurs futures opérations d'aménagement (désartificialisation de la Presqu'île Malraux, programme de végétalisation, accès renforcé à l'eau pour les citoyens...), dont le potentiel impact sur le microclimat local nécessite d'être évalué. Par ailleurs, le site Malraux correspond à une zone urbaine mixte, mêlant usages résidentiels, commerciaux, et culturels. Une telle concentration d'activités entraînant une importante fréquentation du secteur, en particulier durant la période estivale, Malraux s'avère donc être une zone où l'amélioration du confort thermique et l'atténuation de l'ICU constituent un enjeu crucial.



Figure 43 – Aperçu du site d'études Malraux et de ses principales zones d'intérêt (source : Google Maps).

2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés

Dans la section qui suit, les résultats de Més0-NH/SURFEX sont comparés avec ceux de LASER/F et d'ENVI-Met sur une maille du domaine de simulation (Figure 44). Les pourcentages d'occupation du sol, et notamment la fraction de surface végétale, des scènes des deux modèles microclimatiques ont été modifiés afin de correspondre à ceux de la maille de Més0-NH/SURFEX. La taille de la maille est fixée à 250 m de côté. Bien que le secteur Malraux soit compris dans la zone ayant bénéficié d'une résolution à 100 m lors des simulations effectuées par Météo France (Goret, 2021), il n'est malheureusement pas possible d'assigner cette taille aux mailles de LASER/F : certains bâtiments du domaine de simulation (comme l'UGC, cf. figure 43) remplissent en effet à eux seuls le contenu d'une maille de 100 m de côté. Or il est impossible pour une maille de LASER/F d'avoir une taille inférieure à la dimension des plus grands bâtiments présents en son sein. Ce constat démontre également que les paramétrisations utilisées dans Més0-NH/SURFEX, qui reposent sur un nombre minimum de rues et de bâtiments dans une configuration de type canyon urbain, atteignent leurs limites et ne sont plus valables partout au-delà d'une certaine résolution, justifiant pleinement l'intérêt des modèles microclimatiques.

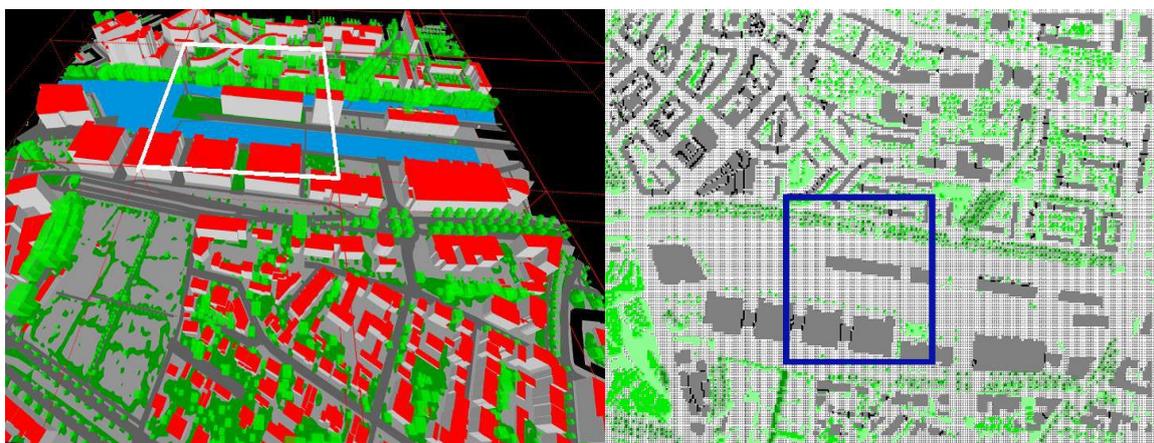


Figure 44 – Ensemble de la zone Malraux modélisée par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite). La zone délimitée en blanc pour LASER/F, et en bleu pour ENVI-Met, est la maille pour laquelle les résultats des modèles microclimatiques sont comparés avec ceux de Més0-NH/SURFEX.

Il convient de préciser que les propriétés thermo-physiques des différents éléments (surfaces, matériaux...) d'ENVI-Met et de LASER/F ont été adaptées dans la mesure du possible à celles de Més0-NH/SURFEX. Le détail de ces paramétrages est fourni en annexe M.

2.2.2.2. Résultats comparatifs entre Més0-NH/SURFEX et les modèles microclimatiques

Les différentes comparaisons effectuées dans cette section ont pour objectif de vérifier que les modèles mésoclimatiques et microclimatiques obtiennent des résultats similaires à leur échelle commune. Elles reposent donc sur les **valeurs moyennées à l'échelle de la maille** des composantes du bilan d'énergie (rayonnement net, flux de chaleur sensible, latente, et dans le sol) et de l'UTCI. À partir des sorties des différents modèles, il va également être possible de comparer les **valeurs moyennées d'un élément particulier** (par exemple les valeurs moyennes du bilan d'énergie et de l'UTCI des routes, de l'eau ou encore des toitures de la maille). D'ailleurs, les flux de chaleur d'ENVI-Met 5.0.1 étant restreints à la surface (cf. 2.1.4), les analyses des composantes du bilan d'énergie de ce modèle ne concernent que les routes contenues au sein de la maille.

Seule la période allant du 30 juin au 2 juillet 2015 est étudiée, les journées du 28 et du 29 juin 2015 étant considérées comme du spin-up. S'agissant d'ENVI-Met, les analyses se focalisent sur la seule journée du 2 juillet 2015, au regard des temps de calculs importants et de l'impossibilité de pouvoir simuler une période de plus de trois jours (spin-up compris).

➤ Rayonnement net

La comparaison commence donc avec le **rayonnement net de la maille** pour SURFEX et LASER/F (Figure 45). S'agissant de cette variable, les modèles mésoclimatique et microclimatique se rejoignent aussi bien en termes de dynamiques journalières ($R^2 \approx 1$) que de valeurs ($RMSE = 37,8 \text{ W/m}^2$). Les résultats des deux modèles restent cohérents même pour les moments les plus délicats à modéliser, comme le lever et le coucher du soleil. Une légère surestimation de LASER/F en journée par rapport à Méso-NH/SURFEX est tout de même à noter ($RMSE_{\text{diurne}} = 45,8 \text{ W/m}^2$), en particulier aux alentours de midi TU. Or selon l'équation du bilan d'énergie (cf. 2.1.2.2, équation (2)), la surévaluation d'une variable a irrémédiablement des répercussions sur les autres composantes. La surestimation diurne observée pour le RN se retrouvera donc au niveau d'autres flux.

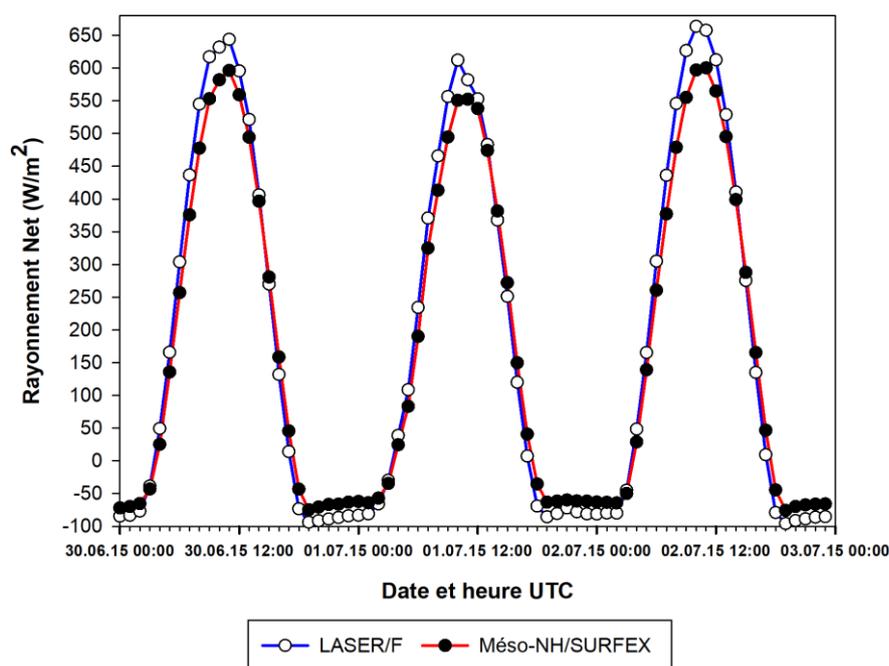


Figure 45 – Comparaison du rayonnement net simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu'île lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015.

Le constat n'est pas le même lorsqu'on cible uniquement le **rayonnement net issu des routes de la maille** (Figure 46). Non seulement les différences entre Méso-NH/SURFEX et LASER/F sont plus prononcées ($RMSE = 65,8 \text{ W/m}^2$), mais elles traduisent également un changement de comportement puisque c'est le modèle mésoclimatique qui présente cette fois les valeurs les plus élevées en journée ($RMSE_{\text{diurne}} = 82,9 \text{ W/m}^2$). À l'instar de LASER/F, ENVI-Met montre également des écarts notables avec Méso-NH/SURFEX ($RMSE = 56 \text{ W/m}^2$), et en particulier en journée ($RMSE_{\text{diurne}} = 69,3 \text{ W/m}^2$). À l'opposé, les deux modèles microclimatiques sont bien corrélés en termes de valeurs ($RMSE = 43,4 \text{ W/m}^2$) et s'accordent particulièrement sur la simulation du pic méridien. L'origine de cette distinction entre le modèle de méso-échelle et ceux de micro-échelle s'explique certainement par le fait que le premier repose sur des paramétrisations qui simplifient la géométrie de la zone simulée, tandis que les seconds en reproduisent la configuration géométrique réelle. L'analyse du rayonnement net des routes de la maille illustre ainsi déjà à lui seul l'intérêt de l'introduction de la géométrie 3D.

2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés

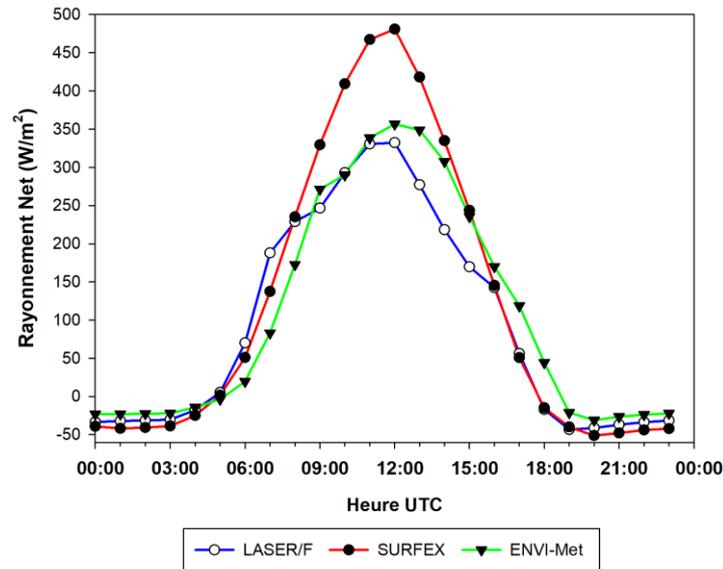


Figure 46 – Comparaison du rayonnement net simulé par LASER/F, ENVI-Met et MésO-NH/SURFEX pour les routes issues de la maille Presqu'île le 2 juillet 2015.

➤ Flux de chaleur sensible

Dans la lignée du rayonnement net, la comparaison entre les **flux de chaleur sensible** simulés respectivement par MésO-NH/SURFEX et LASER/F à l'échelle de la maille s'avère tout aussi convaincante (Figure 47). La corrélation est excellente ($R^2 = 0,99$) et l'erreur-type vraiment minime (RMSE = 12,8 W/m²). Parmi les différentes composantes du bilan d'énergie, ce n'est donc pas le flux de chaleur sensible qui explique le léger écart au plus fort de la journée du rayonnement net (cf. figure 45).

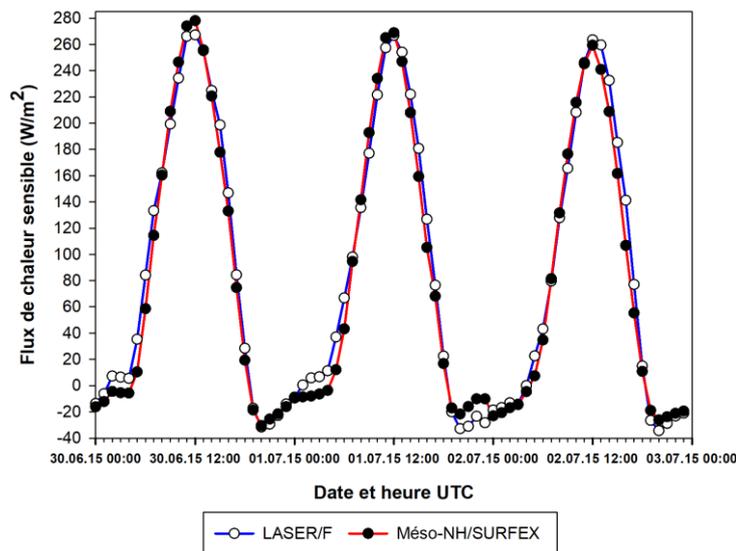


Figure 47 – Comparaison du flux de chaleur sensible simulé par LASER/F et MésO-NH/SURFEX pour la maille Presqu'île lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015.

Si les valeurs des flux de chaleur sensible simulés respectivement par MésO-NH/SURFEX et LASER/F sont extrêmement proches à l'échelle de la maille entière, ce n'est en revanche plus le cas lorsqu'on se focalise sur les résultats issus des routes (Figure 48). Bien que les deux modèles

microclimatiques affichent une très forte corrélation avec celui de méso-échelle en termes de cinétique ($R^2_{\text{LASER/F SURFEX}} = 0,99$ et $R^2_{\text{ENVI-Met SURFEX}} = 0,96$), ENVI-Met comme LASER/F présentent des valeurs nettement moins élevées que Méso-NH/SURFEX au plus fort de la journée ($\text{RMSE}_{\text{diurne LASER/F SURFEX}} = 80,6 \text{ W/m}^2$ et $\text{RMSE}_{\text{diurne ENVI-Met SURFEX}} = 66,8 \text{ W/m}^2$). En outre, le modèle méso-climatique se démarque des modèles microclimatiques en simulant des valeurs nocturnes nettement négatives ($\text{RMSE}_{\text{nocturne LASER/F SURFEX}} = 18,3 \text{ W/m}^2$ et $\text{RMSE}_{\text{nocturne ENVI-Met SURFEX}} = 20,3 \text{ W/m}^2$).

La surestimation du flux de chaleur sensible par Méso-NH/SURFEX résulte certainement des limites induites par les paramétrisations géométriques effectuées dans TEB : tous les canyons urbains simulés par le modèle méso-climatique présentent en effet une unique orientation Nord-Sud. Or cela ne correspond pas à la véritable géométrie du site d'études, qui possède des canyons d'orientations diverses (cf. figure 43). L'orientation Nord-Sud d'une chaussée entraîne un éclairage continu de cette dernière approximativement entre 9h et 15h, durée pendant laquelle le soleil se situe dans l'axe de la rue. La courbe du flux de chaleur sensible de Méso-NH/SURFEX de la figure 48 montre bien que les écarts les plus prononcés avec LASER/F et ENVI-Met surviennent au cours de cette plage horaire. Loin de constituer un problème en soi, cette divergence entre modèles de méso-échelle et de micro-échelle illustre non seulement l'importance de l'orientation du bâti dans le bilan d'énergie, mais aussi tout l'intérêt de disposer de modèles de haute résolution intégrant une géométrie 3D détaillée.

S'agissant du flux de chaleur sensible nocturne, il est possible que sa sous-estimation par Méso-NH/SURFEX par rapport aux modèles microclimatiques provienne d'une température de surface de la route nettement plus basse que la température de l'air. C'est du moins ce que laisse supposer l'analyse comparative des températures de surface de la route et de la température de l'air simulées par les trois modèles, présentée en annexe N.

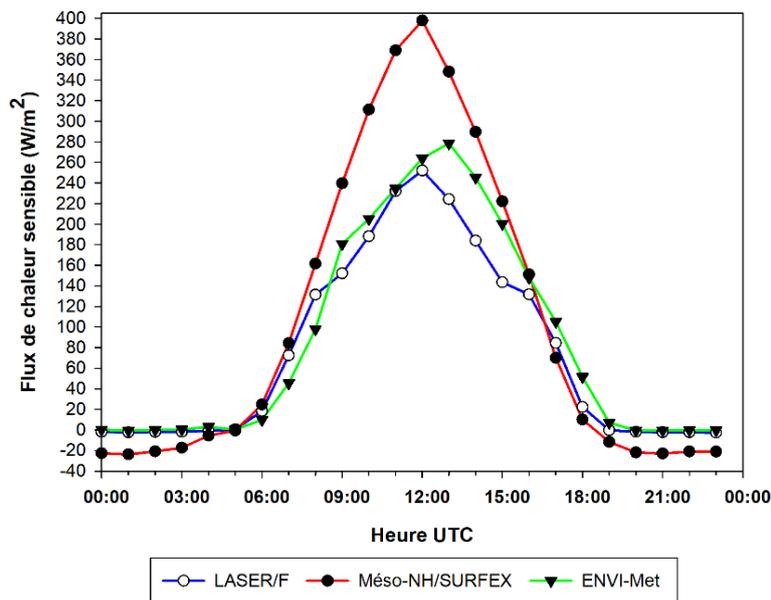


Figure 48 – Comparaison du flux de chaleur sensible simulé par ENVI-Met, LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour les routes issues de la maille Presqu’Ile le 2 juillet 2015.

➤ Flux de chaleur latente

La comparaison des résultats du **flux de chaleur latente à l'échelle de la maille** n'est effectuée que pour Méso-NH/SURFEX et LASER/F, puisque celui disponible en sortie pour ENVI-Met se restreint à la surface et n'intègre pas la végétation (cf. 2.1.2.2). La figure 49 montre que le flux de chaleur latente simulé par Méso-NH/SURFEX et LASER/F atteint des valeurs relativement faibles, avec des maxima

2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés

diurnes respectifs ne dépassant pas 80 et 45 W/m², ce qui apparaît cohérent pour une zone minérale avec peu de végétation comme le secteur Malraux.

Les écarts entre les deux modèles sont en revanche relativement marqués (RMSE = 18,4 W/m²), et notamment en journée où le flux modélisé par LASER/F peut dépasser jusqu'à 40 W/m² celui simulé par SURFEX. En période nocturne, le flux de chaleur latente de LASER/F conserve également des valeurs élevées par rapport à Méso-NH/SURFEX (RMSE_{nocturne} = 11,3 W/m²). L'origine de cette différence entre les deux modèles réside forcément dans le flux de chaleur latente de l'eau ou de la végétation, puisque pour LASER/F comme pour Méso-NH/SURFEX, seuls ces deux éléments tiennent compte de cette variable de manière significative dans leur bilan d'énergie.

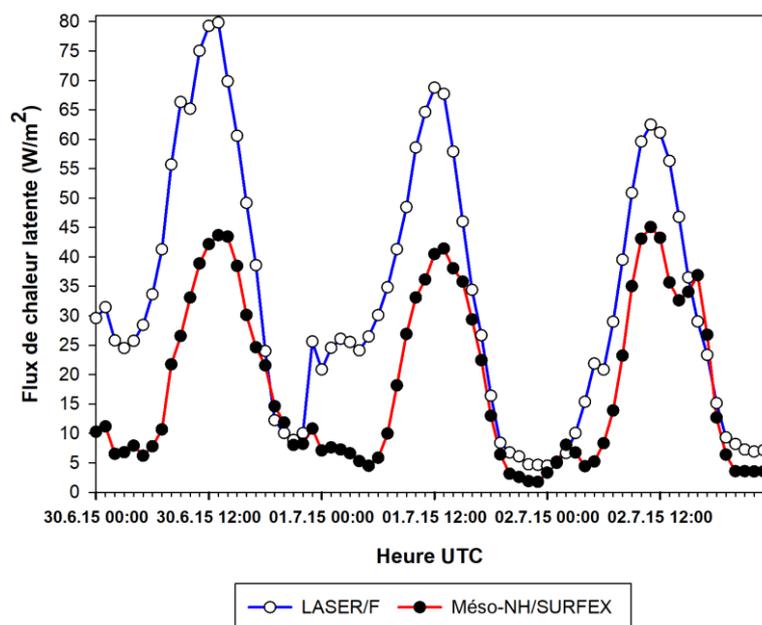


Figure 49 – Comparaison du flux de chaleur latente simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour l'ensemble de la maille Presqu'île du 30 juin au 2 juillet 2015.

Mieux cerner l'origine de la divergence entre Méso-NH/SURFEX et LASER/F nécessite d'analyser **les flux de chaleur latente relatifs à l'eau et à la végétation**. Présenté par la figure 50, l'examen des flux issus de ces deux types d'occupation du sol indique ainsi que les valeurs diurnes supérieures de LASER/F résultent d'un flux de chaleur latente de l'eau nettement plus prononcé que celui simulé par le modèle mésoclimatique (Figure 50, à gauche). L'analyse des températures de surface de l'eau en annexe N montre que cette surévaluation du flux par LASER/F découle d'une température de surface de l'eau plus élevée que celle modélisée par Méso-NH/SURFEX.

À l'opposé, la végétation modélisée par SURFEX affiche un flux de chaleur latente légèrement plus élevé que LASER/F (RMSE = 28,4 W/m²) (Figure 50, à droite). L'explication pourrait potentiellement provenir d'une surévaluation de Méso-NH/SURFEX : des travaux antérieurs effectués avec TEB avaient en effet montré que le flux de chaleur latente de la végétation était surestimé par le modèle, en particulier lorsque le sol est sec (Stavropoulos-Laffaille et al., 2021).

Même si les divergences entre flux de chaleur latente simulés respectivement par Méso-NH/SURFEX et LASER/F peuvent être expliquées, nous ne disposons cependant pas des informations nécessaires pour déterminer lequel des deux modèles fournit les valeurs les plus proches de la réalité. Nous ne pouvons en effet avoir la certitude que les résultats des modèles soient pertinents puisqu'aucune mesure n'a été réalisée sur les bassins d'eau du secteur Malraux (cf. figure 43). Sans données de terrain,

il est de ce fait impossible d’avoir une véritable idée de l’évaporation réelle de l’eau en période nocturne ou diurne. L’intérêt de réaliser des mesures ultérieures sur les zones d’eau du secteur Malraux est donc double : d’une part, de telles expérimentations de terrain aideront à mieux comprendre la dynamique de l’eau en milieu urbain, qui reste très mal connue (Manteghi et al., 2015 ; Solcerova et al., 2019). D’autre part, une meilleure connaissance du comportement de l’eau en zone urbaine permettra ensuite d’alimenter les modèles et d’en améliorer les résultats. Cet exemple illustre donc à lui seul la nécessité d’employer de manière complémentaire les approches expérimentale et numérique pour améliorer la compréhension des microclimats urbains.

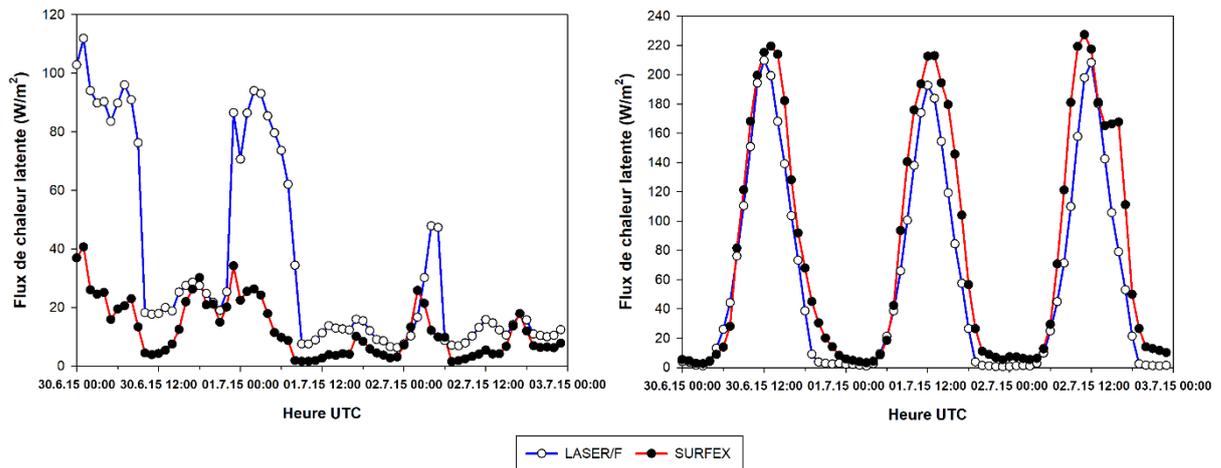


Figure 50 – Comparaison du flux de chaleur latente simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour l’eau (à gauche) et la pelouse (à droite) de la maille Presqu’île du 30 juin au 2 juillet 2015.

➤ Flux de chaleur dans le sol

Dernière composante du bilan d’énergie, le **flux de chaleur dans le sol à l’échelle de la maille** est modélisé de manière similaire par SURFEX et LASER/F (Figure 51). Les dynamiques respectives des deux modèles sont en effet très bien corrélées ($R^2 = 0,99$). Cependant, LASER/F affiche à la fois des valeurs diurnes plus élevées ($RMSE_{diurne} = 32 \text{ W/m}^2$) et des valeurs nocturnes sensiblement plus faibles ($RMSE_{nocturne} = 28,1 \text{ W/m}^2$). Cela signifie que LASER/F simule un stockage de chaleur diurne et un déstockage nocturne plus prononcés que ceux modélisés par Méso-NH/SURFEX.

Même si aucune donnée de terrain ne nous permet de déterminer quel modèle présente les résultats les plus pertinents, le fonctionnement différent des deux modèles peut nous aider à trancher : en effet, contrairement à LASER/F, le flux de chaleur dans le sol n’est pas directement simulé par SURFEX, qui le calcule à partir de la somme des autres termes du bilan d’énergie (Masson et al., 2013b). Cette variable accumule donc les erreurs de toutes les autres composantes. Ce fait nous conduit donc à accorder davantage de confiance au flux de chaleur dans le sol de LASER/F.

Malgré ces différences d’amplitude, le flux de chaleur dans le sol constitue la composante majoritaire du bilan d’énergie au plus fort de la journée au sein des deux modèles (plus de 50% du rayonnement net). Les valeurs largement négatives en période nocturne, dont l’ordre de grandeur est comparable à celui du rayonnement net (cf. figure 45), montrent que SURFEX comme LASER/F considèrent le déstockage comme étant le processus le plus influent durant la phase nocturne, ce qui est cohérent avec les mesures du bilan d’énergie déjà réalisées au sein d’un canyon urbain (Najjar, 2006).

2.2. Utilisation combinée de modèles emboîtés

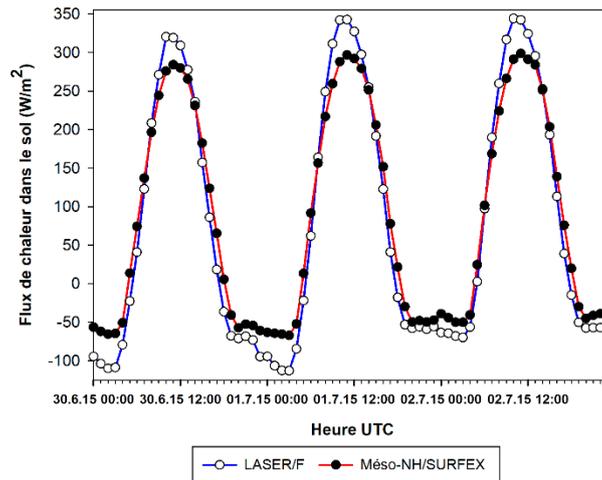


Figure 51 – Comparaison du flux de chaleur dans le sol simulé par LASER/F et Més0-NH/SURFEX pour la maille Presqu'île lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015.

Le flux de chaleur dans le sol issu des routes met en évidence la cohérence entre les sorties respectives des trois modèles (Figure 52). La dynamique de la variable simulée par le système Més0-NH/SURFEX se révèle aussi proche de celle de LASER/F ($R^2 = 0,92$) que de celle d'ENVI-Met ($R^2 = 0,93$). De plus, les écarts entre SURFEX et les modèles microclimatiques restent relativement modérés ($RMSE_{LASER/F SURFEX} = 31,9 \text{ W/m}^2$ et $RMSE_{ENVI-Met SURFEX} = 27,6 \text{ W/m}^2$). La corrélation un peu meilleure entre ENVI-Met et Més0-NH/SURFEX s'explique essentiellement par un déstockage nocturne plus prononcé simulé par LASER/F, ainsi que par un pic d'emménagement diurne plus matinal.

Contrairement à ce qui a été exposé pour le flux de chaleur sensible (cf. figure 47), le comportement du flux de chaleur dans le sol simulé par le modèle méso-climatique ne semble donc pas différer de celui des modèles microclimatiques. Néanmoins, cette variable n'étant pas calculée directement par Més0-NH/SURFEX, elle reste entièrement tributaire du flux de chaleur sensible, ce dernier s'opérant donc au détriment de la conduction thermique. La différence matinale entre ENVI-Met et LASER/F pourrait quant à elle s'expliquer par le fait que la résolution grossière du modèle CFD entraîne un rapprochement trop important des arbres situés le long du quai Jeanne Helbling (cf. figures 43 et 44), ombrant des zones qui auraient dû normalement être éclairées en matinée et diminuant de ce fait le stockage de chaleur.

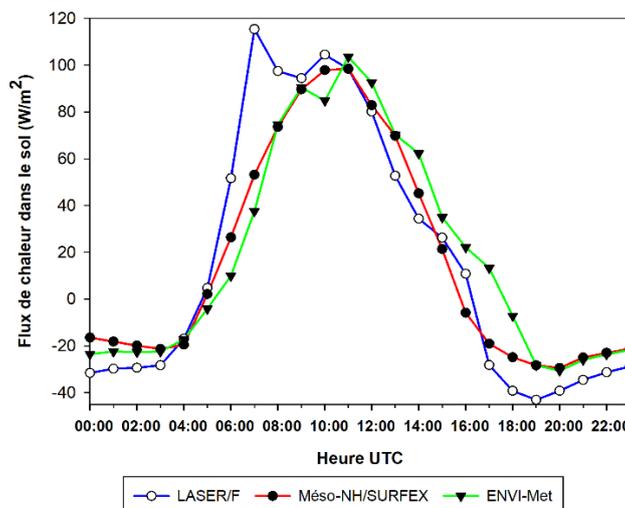


Figure 52 – Comparaison du flux de chaleur dans le sol simulé par LASER/F et Més0-NH/SURFEX pour les routes issues de la maille Presqu'île le 2 juillet 2015.

➤ UTCI

Compte tenu des risques sanitaires associés à l'ICU nocturne et au stress thermique diurne, le confort thermique constitue sans aucun doute la variable pour laquelle l'enjeu du bon fonctionnement du couplage entre méso-échelle et micro-échelle est le plus fort. Il apparaît donc essentiel d'éprouver la capacité de la chaîne de simulation à modéliser les indices de confort avec pertinence et sans perte de cohérence d'un niveau à l'autre. Parmi les indices de confort rationnels, le choix se porte sur l'UTCI puisqu'il est le seul à être simulé par les trois modèles.

Obtenu à partir de l'équation de Bröde et al. (2012), le calcul de l'UTCI à l'échelle de la maille diffère toutefois selon le modèle considéré. SURFEX détermine ainsi l'indice de confort uniquement au sein de la rue du canyon. Ce n'est pas le cas de LASER/F et d'ENVI-Met qui l'obtiennent à partir de l'ensemble des éléments constituant la maille, au-delà du canyon. En outre, trois UTCI différents sont calculés par TEB pour le milieu extérieur : le premier estime le confort thermique à l'ombre (*UTCI_OUTSHADE*), le second au soleil (*UTCI_OUTSUN*), et le troisième résulte d'une pondération entre parties ensoleillées et à l'ombre (*UTCI_MIXTE*). Or ils ne sont pas calculés de la même manière : la TMRT utilisée pour le calcul de l'UTCI au soleil s'appuie sur le rayonnement direct et diffus. À l'opposé, celle employée pour l'obtention de l'UTCI à l'ombre ne repose que sur le rayonnement diffus (Kwok et al., 2019 ; Redon et al., 2020). L'*UTCI_MIXTE* est quant à lui obtenu à partir d'une moyenne pondérée par les fractions de sol au soleil et à l'ombre. La même procédure est utilisée par LASER/F pour calculer l'UTCI à l'échelle de la maille. Enfin, l'UTCI d'ENVI-Met à l'échelle de la maille est obtenu en moyennant les valeurs de toutes les cellules composant le domaine de simulation. C'est donc l'*UTCI_MIXTE* qui a été choisi comme UTCI de référence pour Méso-NH/SURFEX.

La comparaison de l'UTCI simulé par les trois modèles à l'échelle de la maille est présentée figure 53. Les sorties de Méso-NH/SURFEX s'accordent aussi bien avec celles d'ENVI-Met que de LASER/F en termes de dynamique ($R^2 = 0,98$). Néanmoins, ENVI-Met tend à sous-estimer assez nettement l'indice de confort diurne par rapport aux deux autres modèles ($RMSE_{diurne\ SURFEX-ENVI-Met} = 1,9\ ^\circ C$). Afin de déterminer l'origine de cette différence, les variables météorologiques incluses dans la formule de calcul de l'UTCI sont analysées en annexe N pour les trois modèles : les comparaisons effectuées montrent que c'est principalement la TMRT qui explique les différences inter-modèles, aussi bien l'UTCI diurne un peu plus élevé de LASER/F que celui nettement plus faible d'ENVI-Met. À l'instar de ce qui a été montré lors de la phase de validation (cf. 2.1.4.2), les valeurs trop basses du modèle CFD proviennent donc de la surestimation de l'impact du rayonnement diffus. Les écarts demeurent cependant relativement faibles entre les modèles microclimatiques et le modèle mésoclimatique ($RMSE_{SURFEX-LASER/F} = 1,2\ ^\circ C$ et $RMSE_{SURFEX-ENVI-Met} = 1,7\ ^\circ C$), et le biais froid d'ENVI-Met ne l'empêche pas d'atteindre le même niveau maximal de stress thermique que SURFEX et LASER/F.

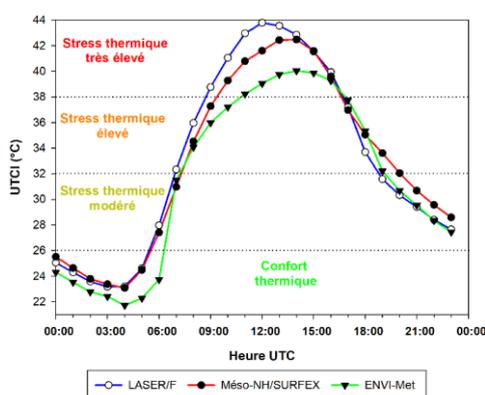


Figure 53 – Comparaison de l'indice UTCI simulé par ENVI-Met, LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu'île le 2 juillet 2015.

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

L'ensemble des comparaisons inter-modèles effectuées permettent d'illustrer à la fois la faisabilité et la pertinence de la chaîne de simulation proposée. Les résultats obtenus à l'échelle d'une maille du site Malraux démontrent ainsi que l'emboîtement de modèles s'effectue sans perte de cohérence entre les différentes échelles.

Bien entendu, cette chaîne de simulation n'est pas parfaite et certaines divergences persistent entre les modèles utilisés. Cependant, la majorité d'entre elles ne sont pas insurmontables, et aucune ne remet en cause l'intérêt de la démarche. Au contraire, la plupart des dissimilarités illustrent même pleinement l'avantage de recourir à des modèles microclimatiques, puisqu'elles s'expliquent par l'incapacité du modèle méso-climatique à atteindre un niveau de détail géométrique suffisamment haut pour distinguer l'ensemble des processus se produisant à l'échelle d'un quartier, d'une rue ou d'un bâtiment.

Les résultats de cette partie ont donc permis de démontrer la cohérence de la chaîne de simulation. Or garantir la fiabilité du couplage entre méso-échelle et micro-échelle dans la modélisation de l'ambiance climatique d'une zone urbaine ne peut se faire seulement à partir d'une analyse comparative des résultats respectifs des différents modèles. Seule la confrontation de la chaîne de simulation à des mesures permettra en effet de véritablement démontrer la pertinence de cette démarche.

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

Le principal intérêt de la chaîne de simulation réside dans la possibilité de fournir les conditions aux limites d'un modèle microclimatique à partir des sorties d'un modèle méso-climatique, et ceci pour n'importe quelle zone urbaine (Conry et al., 2015). Cependant, il faut avant tout s'assurer qu'elle fournisse des résultats en accord avec des mesures réelles. Confronter la séquence de simulation à des données de terrain revient ainsi non seulement à valider la démarche de couplage entre méso-échelle et micro-échelle, mais également à vérifier si un forçage issu d'un modèle méso-climatique est capable de soutenir la comparaison avec un forçage construit à l'aide de mesures.

La validation de la chaîne de simulation est essentielle pour la suite de ces travaux, qui réutiliseront cette démarche lors du test de scénarios d'aménagement, et notamment sur le secteur Malraux. Or ce dernier n'avait encore jamais été concerné par l'installation de stations météorologiques ou la réalisation de mesures mobiles, et aucune donnée de terrain n'était donc disponible pour ce site. C'est pour cette raison qu'une campagne de mesures a été réalisée sur l'ensemble de la zone Malraux durant le mois de juillet 2021, dans l'objectif de valider les différents modèles emboîtés et de fournir des informations sur les ambiances climatiques de ce secteur à enjeux.

C'est dans cet esprit que cette partie se focalise sur la validation de la chaîne de simulation à travers l'exploitation de la campagne de mesures menée en juillet 2021 sur la zone Malraux. La procédure de modélisation décrite lors de la section précédente est appliquée une nouvelle fois durant cette période. Ses résultats sont comparés à la fois avec les mesures et les sorties d'une simulation reposant sur un forçage construit grâce à des données de terrain.

2.3.1. Présentation de la campagne de mesures 2021

La campagne de mesures menée par l'équipe TRIO au cours de l'été 2021 a concerné le secteur englobant la Presqu'île Malraux, le centre commercial Rivétoile et la place Jeanne Helbling. Le quai des Alpes et l'Avenue du Rhin délimitent respectivement ses bordures nord et sud (cf. figure 43). L'expérimentation s'est déroulée en plusieurs étapes et s'est appuyée sur l'utilisation de dispositifs de mesures variés répartis sur l'ensemble de la zone (Figure 54).



Figure 54 – Localisation des différents dispositifs de mesures météorologiques utilisés pour la campagne de mesures estivale 2021 sur le site Malraux. La disposition des chariots mobiles correspond à celle mise en place pour la journée du 21 juillet 2021. Les configurations utilisées lors des journées du 19 et 20 juillet 2021 sont disponibles en annexe A.

Les stations météorologiques fixes ont été installées sur des mâts d'éclairage localisés le long du Quai Jeanne Helbling et au cœur de la Presqu'Ile (Figure 54, repères bleus). Il s'agit des seuls appareils de mesures ayant fonctionné sur une période étendue, allant du 2 juillet à 10h TU au 6 septembre à 6h TU inclus. Le choix de leur emplacement a certes été conditionné par la présence de mâts d'éclairage, mais a également été motivé par la proximité d'éléments urbains particuliers (cascade artificielle installée temporairement, arbres le long du quai, bâtiments...). Au nombre de cinq, les stations sont chacune munies d'une sonde de température de l'air et d'humidité relative, ainsi que de capteurs de type globe noir et globe gris déterminant la température ambiante (Figure 55, en haut à droite).

Les autres appareils ont quant à eux été mis en place uniquement durant la période de mesures intensive allant du 19 au 22 juillet, qui représente une des rares successions de journées de beau temps répertoriées au cours de l'été 2021. Parmi eux, des dispositifs de mesures montés sur roues ont été placés à plusieurs endroits clés de la zone Malraux, tous situés à proximité de l'eau (Figure 54, repères blancs). Comme les stations fixes, ces trois chariots sont chacun équipés d'une sonde de température de l'air et d'humidité relative, ainsi que d'un globe gris (Figure 55, en haut à gauche). En outre, ils disposent d'un capteur de rayonnement et d'un anémomètre, constituant ainsi le seul dispositif mesurant l'ensemble des variables nécessaires au calcul des indices de confort. Seul l'emplacement du chariot n°1 n'a pas été modifié durant la campagne. Les deux autres ont plusieurs fois changé de localisation au cours de la période d'observation afin de mieux cerner le rôle de certains paramètres (proximité d'une eau courante ou plutôt à caractère stagnant, présence ou non de végétation...) dans la création d'ambiances climatiques.

En plus des dispositifs fixes, plusieurs mesures itinérantes ont été réalisées lors de la période d'observation intensive. Deux circuits distincts ont ainsi été effectués à pied toutes les deux heures en journée, au sein de deux rues d'orientation Est-Ouest. Le premier s'est déroulé le long du Quai des Alpes (Figure 54, repères verts), dont le côté sud est bordé par un alignement de platanes. Le second a été réalisé le long de l'Avenue du Rhin (Figure 54, repères orange), beaucoup plus minéralisée et très peu ombragée. Lors de ces circuits, la température de l'air et l'humidité relative ont été mesurées à l'aide d'une sonde fixée à une perche afin d'être aisément transportable (Figure 55, au centre). Ces deux transects ont été effectués dans le but d'estimer les différences de comportement en termes de température de l'air et d'humidité relative entre une rue végétalisée et une artère beaucoup plus minérale.

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

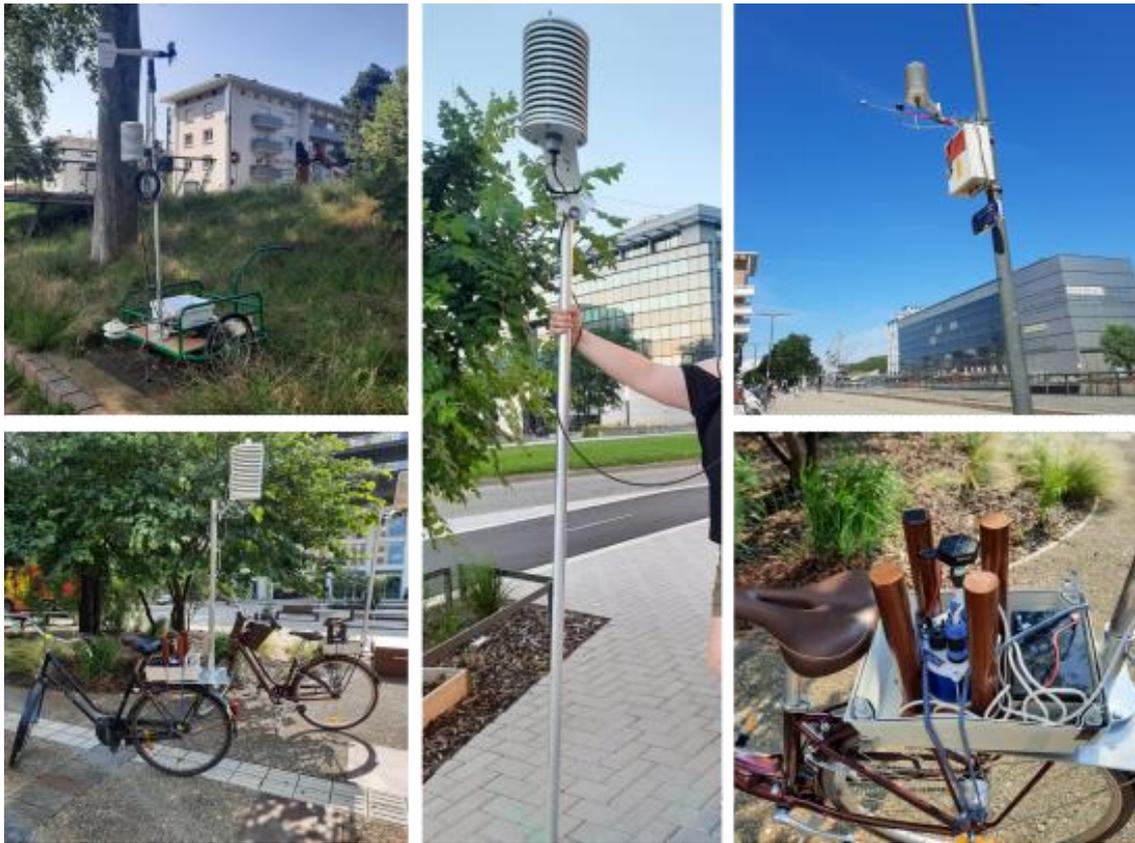


Figure 55 – Ensemble du dispositif de mesures utilisé lors de la campagne Malraux 2021. Chariot mobile équipé de l'appareillage nécessaire à la mesure d'indices de confort (en haut à gauche, exemple du chariot 3 le 21 juillet 2021). Station météorologique fixe (en haut à droite, exemple de la station Helbling). Perche portable (au centre). Vélos équipés (en bas à gauche) et leurs centrales électroniques d'acquisition des données comprenant une batterie d'alimentation et une antenne GPS (en bas à droite).

Deux autres transects ont été effectués à vélo pour mesurer la température de l'air et l'humidité relative sur une zone comprenant le secteur Malraux, mais également plusieurs quartiers alentours (Figure 56). Ces itinéraires ont été réalisés à l'aide d'un dispositif de mesures original conçu par l'équipe TRIO : la position de chaque vélo équipé était enregistrée en temps réel grâce à un système couplant une antenne GPS et les capteurs météorologiques à une centrale électronique d'acquisition des données. Les transects permettent ainsi d'obtenir un aperçu du comportement des deux variables météorologiques sur un secteur étendu et de placer la zone Malraux dans l'environnement voisin.



Figure 56 – Tracés des transects à vélo Place Austerlitz – Parc du Heyritz (à gauche) et Rue Blaise Pascal – Place du Marché Neudorf (à droite).

L'ensemble des stations météorologiques, ainsi que les différents emplacements des chariots, sont présentés de manière détaillée en annexe A.

2.3.2. Comparaison des sorties des modèles microclimatiques avec les données de terrain

Les données de l'expérimentation vont permettre d'estimer la pertinence des résultats fournis par les modèles microclimatiques forcés à partir des sorties du modèle méso-climatique. Deux simulations sont ainsi réalisées avec LASER/F et ENVI-Met sur la zone Malraux les 20 et 21 juillet 2021 à partir de deux fichiers de forçage distincts, présentés dans leur intégralité en annexe I.

Le premier forçage repose donc sur les sorties atmosphériques de Més0-NH/SURFEX obtenues sur le secteur à résolution 100 m, à l'image de ce qui a été effectué lors de la section précédente. Le second forçage a quant à lui été conçu à partir de données météorologiques issues du site de la DRIRE (cf. chapitre 1 et annexe A) qui est, parmi les stations encore en activité, celle située le plus près de la zone Malraux. Les données du rayonnement direct, diffus et IR nécessaires au forçage de LASER/F et d'ENVI-Met sont obtenues à l'aide d'une procédure s'appuyant sur les données des stations d'Entzheim et de l'IPC B et détaillée en annexe I. Il s'agit dès lors de vérifier si les résultats obtenus à partir du forçage Més0-NH/SURFEX soutiennent la comparaison avec ceux issus du forçage construit via des données de terrain, en termes de cohérence avec les mesures.

2.3.2.1. Les variables climatiques

Dans cette partie, la plupart des analyses sont réalisées pour le 20 juillet 2021 du fait qu'il s'agit de la journée comportant le plus grand nombre de transects. La comparaison entre variables climatiques mesurées et simulées n'est réalisée que pour ENVI-Met, étant donné que ces grandeurs sont moyennées à l'échelle de la maille dans LASER/F (cf. 2.1.3). L'étude des données de terrain permettra cependant d'éprouver la validité des paramétrisations effectuées par le modèle thermo-radiatif.

➤ Température de l'air

Les différentes mesures effectuées pour les variables climatiques de base permettent de couvrir une large partie du secteur Malraux (Figure 57). En premier lieu, force est de constater que la variabilité spatiale de la température de l'air est plutôt faible, aussi bien en journée (Figure 57, en haut) qu'en tout début de période nocturne (Figure 57, en bas). Ainsi, sur une zone dont la superficie équivaut à environ 0,2 km², l'écart-type ne dépasse pas 0,44°C à 11h TU, et atteint à peine 0,25°C à 19h TU.

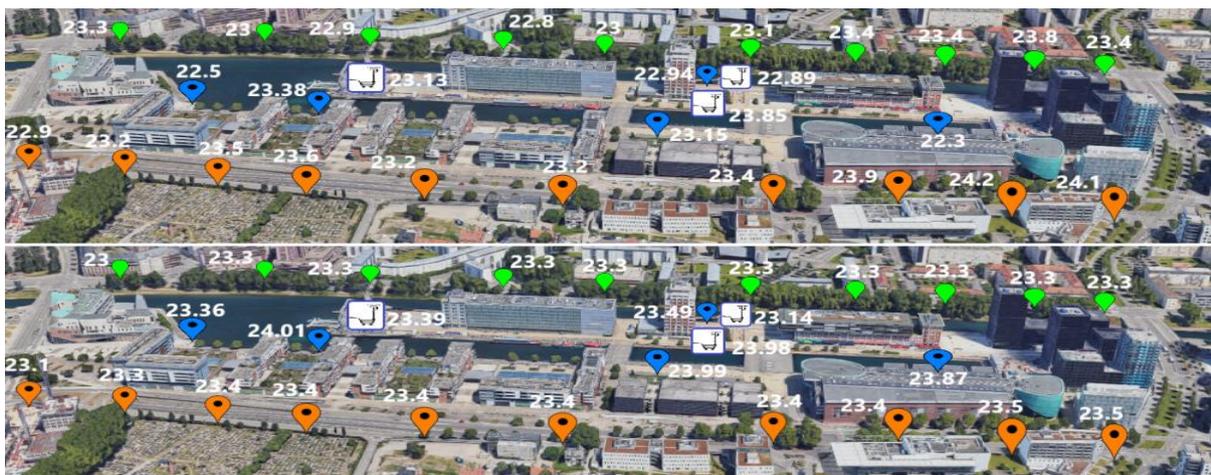


Figure 57 – Températures de l'air relevées sur Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas).

La température de l'air reste relativement homogène sur l'ensemble du secteur. Par conséquent, l'avenue du Rhin et le Quai des Alpes (repères orange et verts, respectivement) affichent des valeurs extrêmement similaires malgré leurs nettes différences en termes de présence de végétation arborée. En journée, les stations UGC et Cascade (cf. figure 54) présentent tout de même des températures

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

légèrement plus basses. L'analyse de la température de l'air sur l'ensemble de la journée, présentée en annexe O, montre que ces deux stations tendent à être systématiquement plus fraîches que les autres en période diurne. S'agissant du site UGC, cela pourrait éventuellement s'expliquer soit par le fait que les capteurs restent à l'ombre du bâtiment entre 9h et 16h TU, soit par des vitesses de vent réduites, et donc par un brassage d'air moins important. Concernant la station Cascade, la seule caractéristique la différenciant nettement des autres sites est la proximité d'une cascade artificielle de douze mètres de hauteur entraînant une émission supplémentaire de vapeur d'eau. L'effet rafraîchissant provoqué par l'émission de vapeur d'eau en journée ayant déjà été mis en évidence au sein de plusieurs études (Ulpiani et al., 2019 ; Di Giuseppe et al., 2020), c'est sans doute cet apport qui est à l'origine de la température de l'air diurne légèrement plus basse de la station Cascade. La situation particulière des sites UGC et Cascade souligne donc l'importance du rôle de l'eau, ainsi que de la configuration géométrique dans laquelle se situent les stations.

Loin d'être surprenants, ces résultats s'accordent au contraire très bien avec le principe d'homogénéité de la température de l'air à l'intérieur d'une même LCZ (cf. chapitre 1.3.1.3). D'après la classification de Landes et al. (2020), l'ensemble de cette zone se trouve en effet au sein d'une LCZ 4 (cf. figure 19 et annexe A). Ces températures de l'air plutôt homogènes démontrent non seulement la cohérence de la classification LCZ, mais soulignent aussi qu'à l'échelle du quartier, cette variable ne représente pas celle étant la plus pertinente dans l'étude des ambiances climatiques.

Les températures relevées à l'aide des transects à vélo concernent une zone allant au-delà du secteur Malraux, englobant plusieurs quartiers et recouvrant différents types de LCZ. Chacun des trajets de la journée du 20 juillet a duré une demi-heure aller-retour. Les températures de l'air présentées ci-dessous ont été obtenues pour chaque point composant l'itinéraire via une moyenne effectuée sur cet aller-retour.

La figure 58 illustre à nouveau la relative faible variabilité spatiale de la température de l'air, avec des écarts-types compris entre 0,1 et 0,3°C pour les deux itinéraires. En effet, ces derniers montrent bien qu'en journée, la température l'air conserve des valeurs homogènes sur l'ensemble de la zone. Il est cependant intéressant de noter que des différences notables peuvent tout de même survenir entre les différents points composant les transects, et notamment en tout début de soirée : par exemple, l'écart entre les points Heyritz 2 et Austerlitz atteint près de 1,2°C à 17h TU (Figure 58, à gauche), et 0,8°C entre les points Blaise Pascal et Marché Neudorf (Figure 58, à droite). Les écarts entre ces points, qui appartiennent à des LCZ différentes, permettent ainsi de mettre en évidence des taux de refroidissement différents en fonction des LCZ.

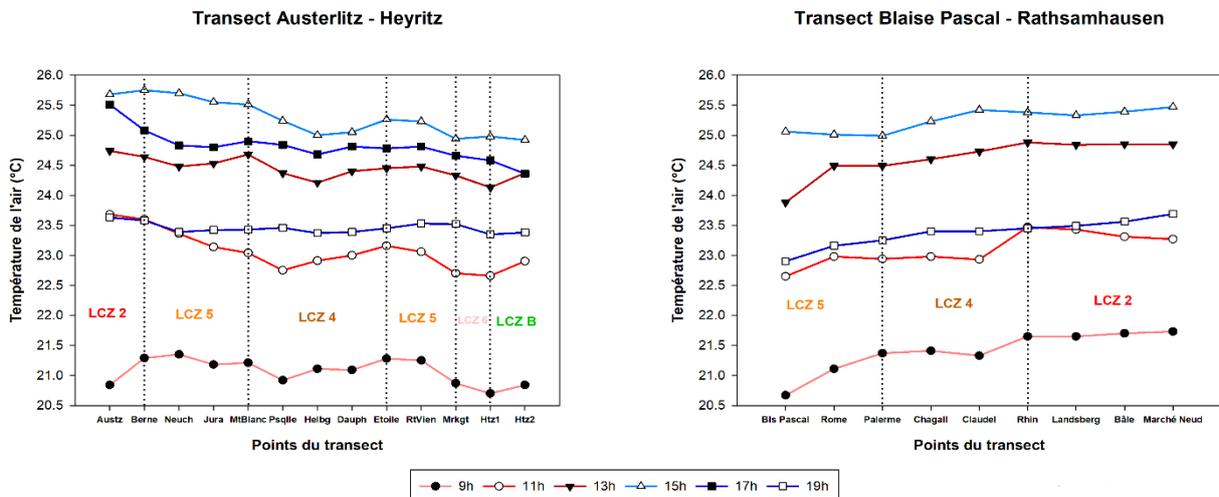


Figure 58 – Températures de l'air (en °C) relevées au cours des transects à vélo A-H (à gauche) et B-R (à droite) lors de la journée du 20 juillet 2021. Les heures sont données en TU.

L'étude des transects permet surtout de souligner des points déjà exposés lors du chapitre précédent (variabilité inter-LCZ plus prononcée que celle intra-LCZ, LCZ 2 plus chaudes...), et notamment l'homogénéité de la température de l'air diurne presque partout en ville, au-delà de la zone d'étude. Cet aspect a été particulièrement mis en évidence par le biais des transects à vélo, ce qui prouve qu'il est possible de faire confiance au dispositif de mesures portatif mis en place par l'équipe TRIO (cf. figure 55). Cette campagne de mesures aura donc contribué à mettre au point une nouvelle méthode expérimentale qui permettra à terme d'appréhender davantage le rôle des LCZ dans la variabilité spatiale de la température de l'air, et notamment en période nocturne.

En outre, certaines particularités, comme les transects nocturnes globalement plus chauds que les diurnes, relèvent de la situation météorologique du 20 juillet 2021, détaillée en annexe O et durant laquelle les températures de l'air matinales se sont avérées plus fraîches que celles en début de période nocturne.

Désormais, il s'agit d'une part de vérifier que les résultats d'ENVI-Met sont en accord avec les données de terrain, et d'autre part d'évaluer les différences entre les deux forçages utilisés. Les cartes de la figure 59 montrent que quelle que soit la simulation considérée, la température simulée par le modèle CFD varie globalement peu sur l'ensemble de la zone. Le forçage issu des données de terrain (en bas) aboutit cependant à un écart interquartile (IQ) un peu plus élevé que celui du forçage Mésos-NH/SURFEX (en haut), avec respectivement $IQ_{\text{Forçage DRIRE}} = 0,68 \text{ °C}$ et $IQ_{\text{Forçage Mésos-NH/SURFEX}} = 0,54 \text{ °C}$. Ce dernier apparaît extrêmement proche de l'IQ calculé à partir des données mesurées ($IQ_{\text{mesures}} = 0,52 \text{ °C}$), soulignant la bonne capacité d'ENVI-Met à simuler le comportement de la température de l'air.

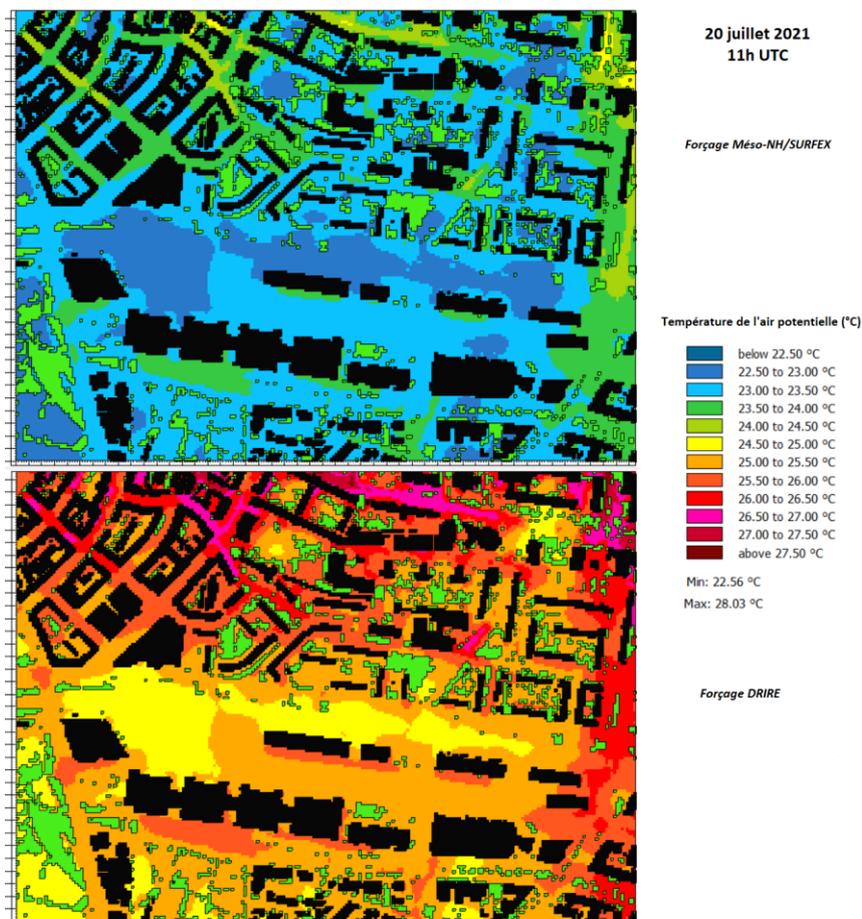


Figure 59 – Cartes de la température de l'air simulée sur le secteur Malraux par ENVI-Met le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Mésos-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas).

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

Par ailleurs, si les valeurs de la température de l'air obtenues via Méso-NH/SURFEX restent proches de celles mesurées, celles simulées à partir des données de la station DRIRE sont nettement plus élevées. Ceci transparaît particulièrement au niveau des coupes verticales passant respectivement par l'Avenue du Rhin (Figure 60) et le Quai des Alpes (Figure 61) : en ce qui concerne l'Avenue du Rhin, la simulation reposant sur le forçage Méso-NH/SURFEX (Figure 60, en haut) présente ainsi des écarts très faibles avec les données de terrain (RMSE = 0,36°C), tandis que celle s'appuyant sur le forçage DRIRE (Figure 60, en bas) en affiche de beaucoup plus importants (RMSE = 1,83°C).

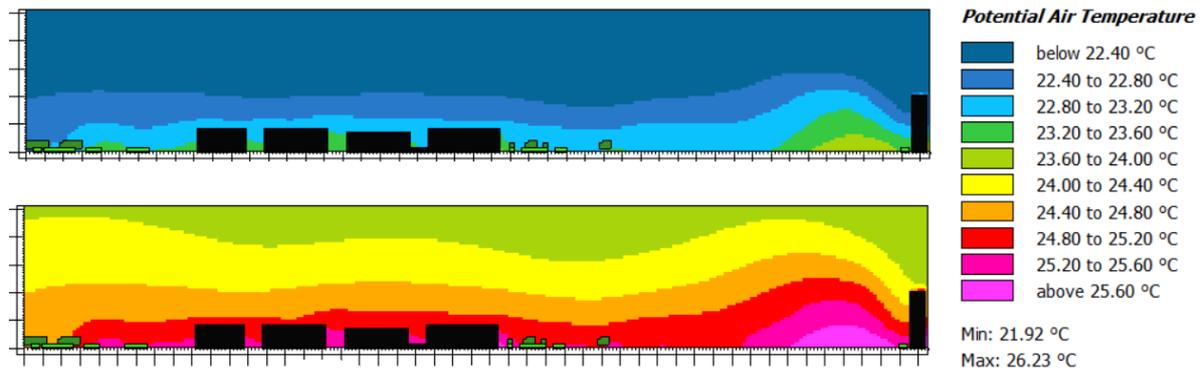


Figure 60 – Coupe verticale Ouest-Est de la température de l'air passant par l'Avenue du Rhin et le centre commercial Rivétoile (au centre) le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas).

Il en va de même pour la température de l'air du Quai des Alpes : celles simulées à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (Figure 61, en haut) se rapprochent bien plus des mesures que celles modélisées via le forçage DRIRE (Figure 61, en bas), avec des RMSE respectives de 0,32°C et 1,9°C. Cette surestimation n'a rien d'étonnant étant donné que la DRIRE est située sur le toit d'un bâtiment (cf. chapitre 1.2.1 et annexe A). Cependant, quelle que soit la simulation, les températures modélisées pour le Quai des Alpes ne diffèrent quasiment pas de celles de l'Avenue du Rhin, à l'image de ce qui avait été observé lors de la campagne de mesures (cf. Figure 57). Ces résultats illustrent donc pleinement la capacité d'ENVI-Met à reproduire la relative homogénéité de la température de l'air à l'échelle d'un quartier.

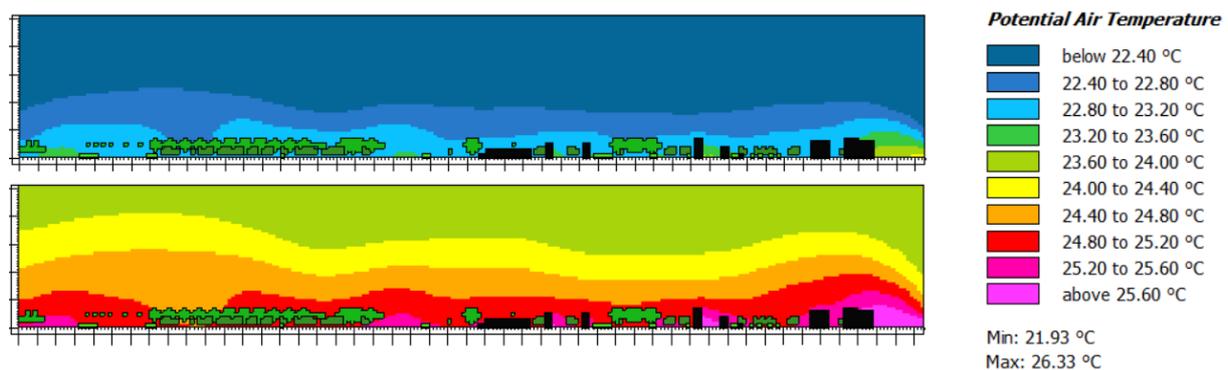


Figure 61 – Coupe verticale Ouest-Est de la température de l'air passant par le Quai des Alpes le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas).

Le constat diffère toutefois lorsque le domaine de simulation est plus étendu et comprend plusieurs secteurs aux morphologies distinctes : la comparaison des mesures réalisées lors du transect Austerlitz-Heyritz avec les valeurs simulées par ENVI-Met révèle de moins bons résultats du modèle CFD (Figure 62). Comme prévu, les écarts avec les températures de l'air modélisées par la simulation s'appuyant sur le forçage DRIRE sont globalement plus importants qu'avec celles simulées à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (RMSE_{Forçage DRIRE} comprises entre 0,2 et 2,1°C, contre des RMSE_{Forçage Méso-NH/SURFEX}

comprises entre 0,27 et 1,42°C), du fait de la situation particulière de la station météorologique. Néanmoins, aucune des deux simulations ne parvient à reproduire le comportement des points les plus éloignés de ceux appartenant au secteur Malraux (R^2 compris entre 0,01 et 0,22). Ce résultat n'est pas étonnant, compte tenu du fait que le forçage Més0-NH/SURFEX a été spécialement conçu pour le secteur Malraux et n'est de ce fait plus forcément adapté au-delà de ce dernier. Il s'agira dès lors de prendre les résultats d'une autre maille de Més0-NH/SURFEX comme données de forçage pour simuler le comportement des zones voisines.

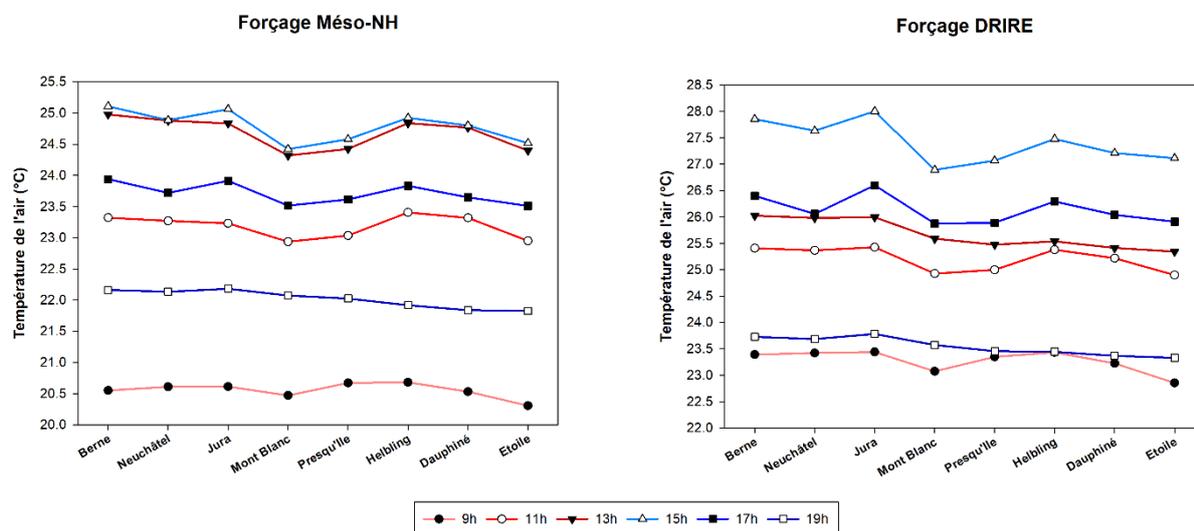


Figure 62 – Températures de l'air simulées par ENVI-Met sur le transect A-H à partir du forçage Més0-NH/SURFEX (à gauche) et du forçage DRIRE (à droite) pour la journée du 20 juillet 2021.

Ces résultats sont difficilement comparables à ceux issus d'autres analyses, très peu d'études ayant à notre connaissance tenté la réalisation d'un couplage entre modèles de méso-échelle et de micro-échelle (Johansson et al., 2013 ; Conry et al., 2015 ; Wong et al., 2021). Néanmoins, tout comme au sein des travaux de Conry et al. (2015), qui ont recours à un couplage entre le modèle méso-climatique WRF (Skamarock et al., 2008) et ENVI-Met, le forçage issu de la chaîne de simulation fournit globalement de meilleurs résultats que celui obtenu à partir des données d'observation, tendant à mettre en évidence l'inadéquation des températures de la DRIRE comme données de forçage. Même si celle-ci est relativement proche du secteur Malraux (cf. figure 1), les résultats montrent bien que cette station située en toiture ne constitue pas une station représentative du site d'études. Cela prouve que le critère de proximité d'une station ne peut absolument pas être utilisé dans la constitution d'un fichier de forçage à partir de données de terrain. Lorsqu'il n'existe aucune station météorologique pouvant être considérée comme représentative de la zone d'étude, il vaut ainsi mieux concevoir le forçage atmosphérique à partir des sorties d'un modèle de méso-échelle.

➤ Humidité relative

Tout comme la température de l'air, l'humidité relative semble relativement homogène sur l'ensemble du secteur Malraux (Figure 63) : l'écart-type n'atteint en effet que 1,94 % et 1,13 % à respectivement 11h TU et 19h TU, ce qui n'est pas si éloigné de la marge d'erreur des dispositifs de mesure ($\pm 0,8$ %). En outre, les valeurs d'humidité relative diurnes restent extrêmement proches de celles relevées en début de période nocturne : cette particularité résulte des conditions météorologiques de la journée du 20 juillet 2021, durant laquelle les températures de l'air en début de soirée se sont révélées équivalentes à celles mesurées en matinée (cf. annexe O).

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

Malgré la faible variabilité spatiale de l'humidité relative, il semble important de noter le comportement distinct de certains sites : le Quai des Alpes (Figure 63, repères verts) apparaît ainsi toujours légèrement plus humide que l'Avenue du Rhin (Figure 63, repères orange). Bien entendu, c'est particulièrement le cas en journée, lorsque l'évapotranspiration des arbres présents au niveau du Quai des Alpes atteint ses valeurs maximales. Par conséquent, par rapport à la température de l'air (cf. figure 57), l'humidité relative permet de mieux souligner les différences entre une rue très végétalisée et une autre beaucoup plus minérale.

En outre, l'humidité obtenue pour le chariot n°3 (cf. figure 54), et dans une moindre mesure celle relevée au niveau de la station Cascade, présentent systématiquement des valeurs plus élevées que les autres sites. En ce qui concerne la station Cascade, cette humidité accrue résulte sans aucun doute de la présence de la cascade artificielle, qui entraîne une émission supplémentaire de vapeur d'eau. S'agissant du chariot n°3, la proximité immédiate de l'eau pourrait fournir une partie de l'explication : en effet, contrairement au chariot n°2 qui se trouve au bord d'un bassin d'eau quasiment fermé, le chariot n°3 se situe près d'un long bras d'eau connecté au bassin d'Austerlitz (cf. figure 43). L'écoulement de l'eau y est donc possible, ce qui n'est pas le cas pour le bassin près duquel est localisé le chariot n°2. Cette différence pourrait potentiellement expliquer l'écart entre les chariots n°2 et 3, l'évaporation d'une eau courante étant plus prononcée que celle d'une eau stagnante (Hathway & Sharples, 2012).

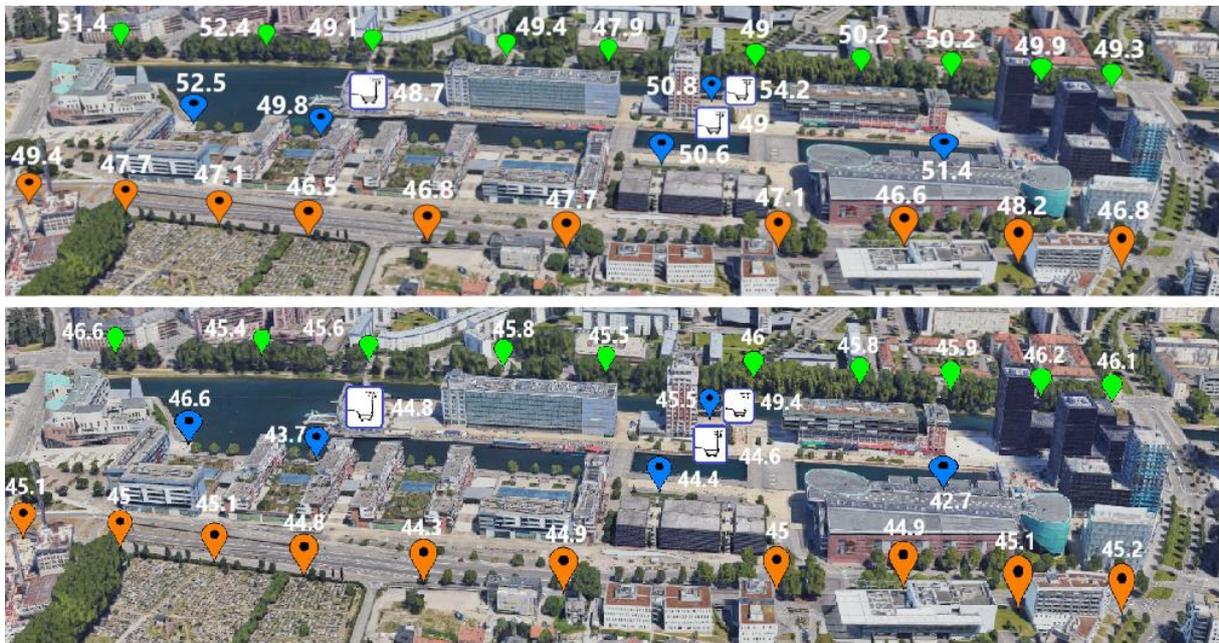


Figure 63 – Humidités relatives relevées sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas).

Les itinéraires effectués à vélo confirment la faible variabilité spatiale de l'humidité relative, et notamment en période nocturne (Figure 64). Les écarts-types relevés au niveau des deux transects ne dépassent pas 1,6 %, et affichent des valeurs particulièrement basses pour l'itinéraire réalisé à 19h TU (respectivement 0,38 et 0,86 % pour les transects A-H et BP-R). En période diurne, il est tout de même possible d'observer une augmentation progressive de l'humidité relative au fur et à mesure qu'on s'éloigne des LCZ les plus densément bâties. Ceci est particulièrement visible pour le transect A-H (Figure 64, à gauche), où le point *Heyritz Forêt*, situé au sein d'une LCZ B, présente systématiquement les valeurs les plus hautes : l'écart entre ce point et le point *Austerlitz* atteint jusqu'à 5 % à 13h TU, alors qu'il est quasiment nul en période nocturne (19h TU), moment où l'évapotranspiration s'arrête.

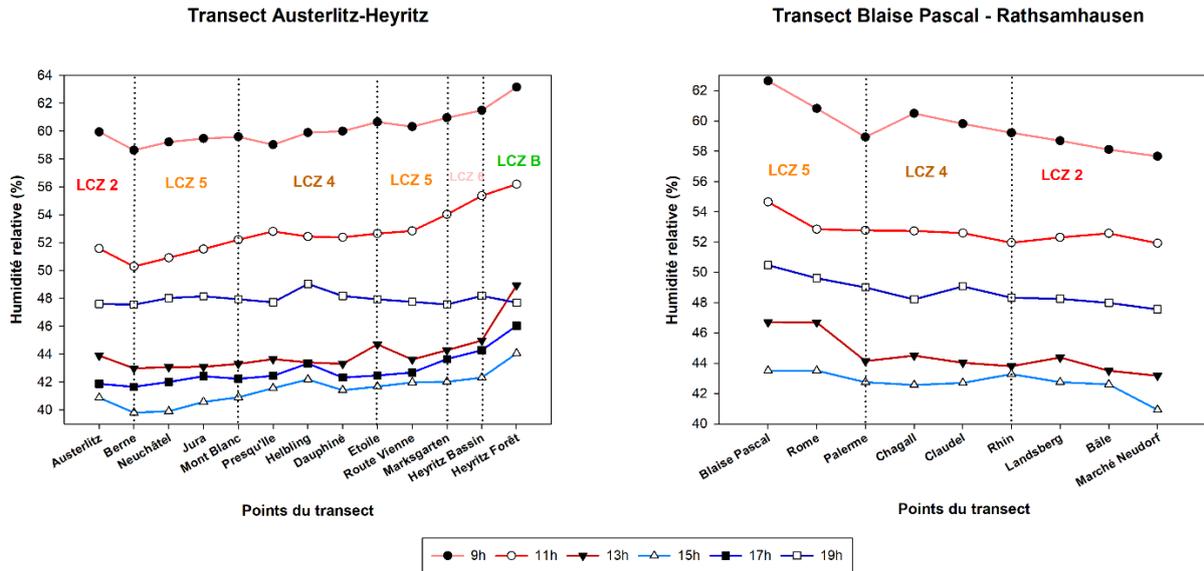


Figure 64 – Humidité relative (en %) relevée au cours des transects à vélo A-H (à gauche) et B-R (à droite) lors de la journée du 20 juillet 2021. Les heures sont données en TU.

À l’instar de la température de l’air, l’humidité relative varie donc relativement peu à l’échelle microclimatique, bien qu’elle soit influencée en journée par la présence de végétation. Les cartes de la figure 65 démontrent qu’ENVI-Met parvient à reproduire cette homogénéité de manière satisfaisante : les écarts interquartiles issus des simulations ($IQ_{\text{Forçage Més0-NH/SURFEX}} = 3,2\%$ et $IQ_{\text{Forçage DRIRE}} = 3,8\%$) sont ainsi très proches de celui obtenu à partir des données d’observation ($IQ_{\text{mesures}} = 2,8\%$).



Figure 65 – Cartes de l’humidité relative simulée sur le secteur Malraux par ENVI-Met le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Més0-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas).

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

Compte tenu de ce qui avait été constaté pour la température de l'air, le recours au forçage construit à partir des données de la DRIRE conduit sans surprise à des valeurs d'humidité relative plus basses que celles obtenues via l'utilisation du forçage issu de Mésos-NH/SURFEX. L'étude des valeurs simulées par ENVI-Met au niveau des points composant le transect A-H mène aux mêmes conclusions (Figure 66) : les écarts entre valeurs modélisées et mesurées sont plus prononcés pour la simulation s'appuyant sur le forçage DRIRE ($RMSE_{\text{Forçage DRIRE}}$ comprises entre 1,9 et 6,8 %, contre des $RMSE_{\text{Forçage Mésos-NH/SURFEX}}$ comprises entre 2,1 et 3,9 %). En ce qui concerne la corrélation entre mesures et données simulées, aucun des deux forçages ne parvient à obtenir des R^2 corrects (R^2 compris entre 0,01 et 0,52).

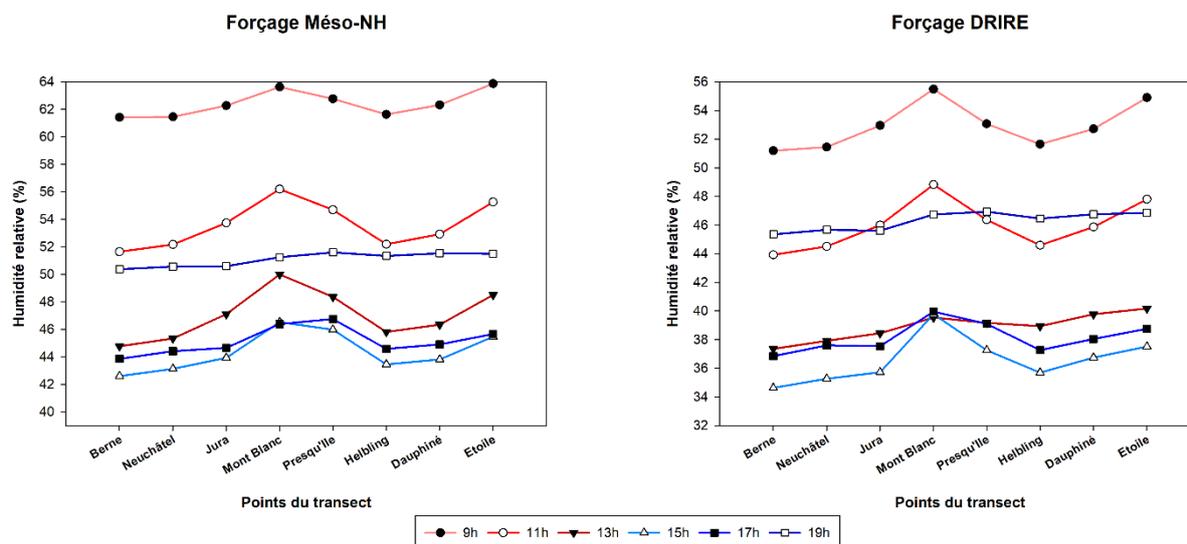


Figure 66 – Humidités relatives simulées par ENVI-Met sur le transect A-H à partir du forçage Mésos-NH/SURFEX (à gauche) et du forçage DRIRE (à droite) pour la journée du 20 juillet 2021.

Bien que pour la plupart convaincants, les résultats concernant l'humidité relative démontrent à quel point il est essentiel de procéder à des contrôles des différentes variables climatiques.

➤ Vitesse du vent

La vitesse du vent est mesurée par les trois chariots répartis sur la Presqu'île Malraux (cf. figure 54 et annexe A). Comme les dispositifs n°2 et 3 ont changé d'emplacement au cours de la campagne de mesures, la comparaison avec les simulations ENVI-Met est effectuée pour les journées du 20 et du 21 juillet 2021 (Figure 67).

Quelle que soit la journée considérée, les vitesses de vent simulées apparaissent légèrement plus faibles que celles mesurées, en particulier pour le chariot n°1, et plus généralement lors du recours au forçage construit à partir des données de la DRIRE. Les RMSE sont comprises entre 0,47 et 1,03 m/s pour le forçage Mésos-NH/SURFEX, et entre 0,72 et 1,13 m/s pour le forçage DRIRE. Ces résultats sont très similaires à ceux exposés par [Alsaad et al. \(2022\)](#), qui tout comme nous ont été contraints d'imposer une vitesse de vent constante au sein de leur fichier de forçage afin d'éviter une instabilité de la simulation (cf. 2.1.2). De tels écarts restent cependant relativement faibles, montrant que cette concession nécessaire au bon déroulement des simulations avec ENVI-Met n'entraîne pas de conséquences trop importantes sur les valeurs de vitesse du vent.

S'agissant de la dynamique de la vitesse du vent, aucune corrélation significative n'est relevée entre valeurs simulées et mesurées, et ceci quels que soient la simulation et le chariot considérés ($R^2 < 0,35$). Ce constat rejoint celui émis par plusieurs autres études. En effet, même si très peu de travaux ont comparé la vitesse du vent avec des mesures ([Acero & Arrizabalaga, 2016](#) ; [Zhang et al., 2017](#) ; [Ayyad](#)

& Sharples, 2019 ; Alsaad et al., 2022), toutes cependant s'accordent sur la difficulté d'ENVI-Met à reproduire le comportement de cette variable, quelle que soit la version du modèle utilisée. De telles divergences entre vitesses de vent simulées et mesurées risquent d'avoir des répercussions sur la simulation du confort thermique.

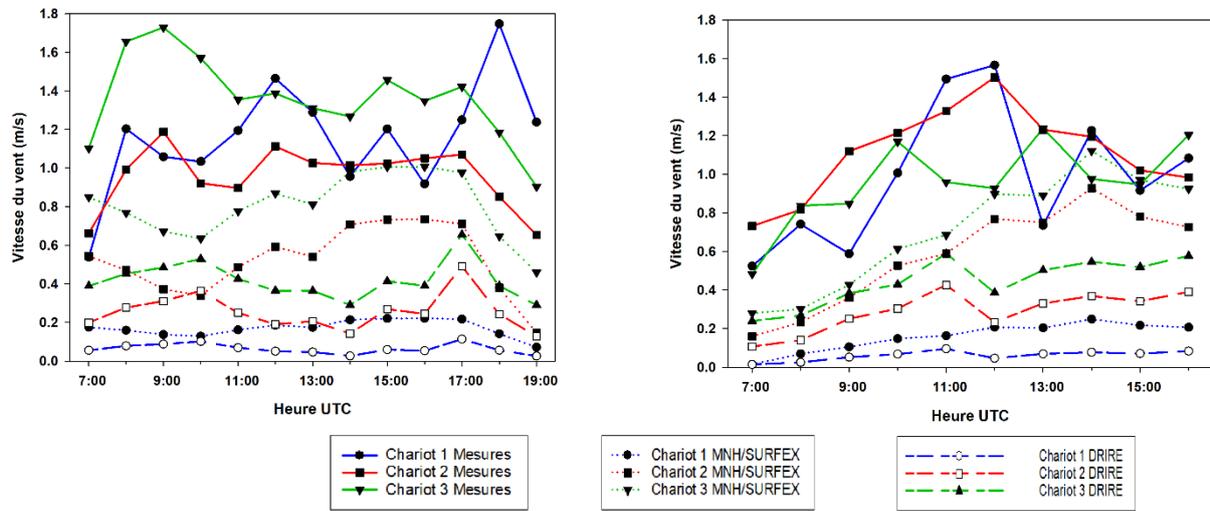


Figure 67 – Comparaison des vitesses du vent mesurées par les chariots avec celles obtenues à partir des deux simulations ENVI-Met sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 (à gauche) et le 21 juillet 2021 (à droite).

Globalement, la chaîne de simulation parvient à bien reproduire le comportement des variables climatiques, en particulier celui de la température de l'air. Quelques différences notables persistent, mais ces divergences proviennent pour la plupart soit des limites inhérentes à la procédure de couplage (fichier de forçage correspondant à une seule maille particulière du domaine de simulation), soit du modèle microclimatique lui-même (nécessité d'adapter les vitesses de vent au sein du fichier de forçage). En outre, les résultats de la campagne de mesures menée sur le secteur Malraux montrent qu'à l'échelle d'une maille, la température de l'air et l'humidité relative varient relativement peu, ce qui permet de justifier les paramétrisations effectuées dans LASER/F pour ces variables. À présent, il reste à éprouver la chaîne de simulation sur l'indice de confort UTCI, dont le calcul dépend en partie des variables climatiques précédemment analysées.

2.3.2.2. L'indice de confort UTCI

Au sein de cette section, l'ensemble des analyses sont réalisées pour les modèles microclimatiques ENVI-Met et LASER/F. Bien que tous deux simulent désormais le PET, seul l'UTCI est utilisé pour l'étude. Ce choix se justifie par le fait que LASER/F ne fournit pas encore de cartes pour le PET, mais aussi parce que la phase de validation a montré que les modèles affichent de meilleurs résultats pour l'UTCI (cf. 2.1.3.2 et 2.1.4.2). Seuls les chariots et les stations météorologiques fixes disposent de capteurs de type globe mesurant la température ambiante, indispensable au calcul de la TMRT et donc à celui de l'UTCI. Étant donné que les chariots possèdent uniquement un globe noir, les comparaisons seront effectuées uniquement pour les UTCI calculés à partir de ce capteur.

Contrairement à ce qui a été exposé pour la température de l'air et l'humidité relative, l'UTCI présente des valeurs plutôt hétérogènes sur le secteur Malraux (Figure 68), en particulier en période diurne. À 11h TU (Figure 68, en haut), les niveaux atteints de l'échelle de stress de l'UTCI (cf. annexe L) vont ainsi du confort thermique ($UTCI < 26^{\circ}C$) à un fort stress thermique ($UTCI \geq 32^{\circ}C$). D'emblée, la répartition des valeurs de l'UTCI permet d'illustrer l'influence prédominante de l'exposition au rayonnement sur l'indice de confort : ce dernier atteint en effet ses valeurs les moins hautes au niveau

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

de la station UGC, site bénéficiant de l'ombre procurée par le bâtiment adjacent durant une grande partie de la journée. Cet apport d'ombre génère un UTCI inférieur d'un niveau, voire deux sur l'échelle de stress par rapport aux autres sites. Ces derniers n'affichent pas pour autant des valeurs uniformes : certaines stations restent effectivement exposées à un stress thermique modéré, tandis que d'autres arrivent à un fort stress thermique. Ces nuances résultent essentiellement des caractéristiques géométriques du site considéré : par exemple, la station MIE est située dans un large canyon d'orientation Nord-Sud. À 11h TU, le site est donc pleinement éclairé, ce qui explique le haut niveau de stress thermique relevé. Pourtant localisé à proximité de la station, le chariot n°3 présente une valeur d'UTCI plus basse de 2°C, car il bénéficie d'une partie de l'ombre prodiguée par le bâtiment situé à l'Est.

En début de période nocturne, les valeurs d'UTCI se révèlent nettement plus homogènes qu'au cours de la journée (Figure 68, en bas), où le rayonnement permet de mettre en évidence le rôle crucial de la géométrie urbaine sur l'indice de confort. La présence, ou au contraire l'absence d'ombre n'explique cependant pas à elle seule le comportement thermique de tous les sites : les stations Cascade et Helbling sont par exemple toutes deux très exposées au rayonnement au même moment, pourtant la première subit un moindre stress thermique que la seconde, étant même à un niveau inférieur sur l'échelle de l'UTCI. Cette différence entre les deux sites met ainsi en évidence l'influence de la cascade artificielle, qui se manifeste également en période nocturne : le maintien d'un UTCI plus faible au niveau de la station Cascade, y compris en l'absence de tout rayonnement, souligne bien l'effet rafraîchissant occasionné par la structure d'eau qui agit comme un brumisateur artificiel.

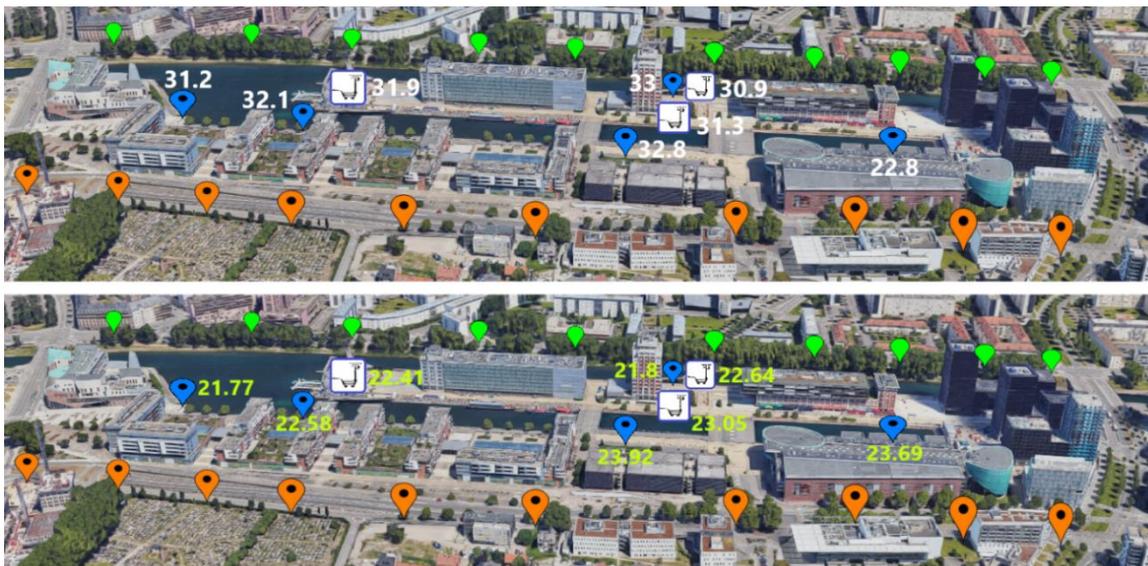


Figure 68 – UTCI relevés sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas).

Ces premiers résultats de l'expérimentation menée sur le secteur Malraux révèlent une certaine opposition entre des valeurs d'UTCI diurnes hétérogènes (écart-type de 3,1°C), très dépendantes de l'exposition au rayonnement solaire et de ce fait de la géométrie du site considéré, et des valeurs nocturnes plus homogènes (écart-type de 0,8°C). Dès lors, il s'agit de vérifier si la chaîne de simulation, à travers les modèles microclimatiques, parvient à reproduire la diversité d'ambiances climatiques présente au sein de la zone Malraux, ainsi que les différents niveaux de stress thermique atteints.

Les cartes de l'UTCI simulé à 11h TU illustrent la capacité de LASER/F à simuler l'indice de confort sur l'ensemble du secteur Malraux (Figure 69). L'introduction de la géométrie 3D à un haut niveau de détail permet de distinguer aisément les diverses ambiances climatiques existantes au sein de la zone. L'apport de la végétation arborée ressort particulièrement bien au niveau du Quai des Alpes, la quasi-totalité de la voie affichant des valeurs d'UTCI correspondant à une situation de confort thermique

grâce à l'ombre continue procurée par les alignements d'arbres. À l'opposé, l'Avenue du Rhin présente des valeurs d'UTCI pouvant dépasser les 38°C et de ce fait atteindre un stress thermique très élevé, soit trois niveaux de plus que le Quai des Alpes. Les données de terrain indiquent pourtant que les deux rues sont très similaires en termes de températures de l'air, soulignant la nécessité de recourir à un indice de confort pour cerner les différences d'ambiances climatiques à micro-échelle.

Quelle que soit la simulation LASER/F considérée, la répartition spatiale de l'UTCI est exactement la même puisque l'écoulement de l'air n'est pas modélisé. Néanmoins, le recours au forçage construit à partir des données de la DRIRE induit des valeurs d'UTCI significativement plus élevées que celles obtenues via le forçage Méso-NH/SURFEX, rejoignant les constatations précédemment émises à propos des variables climatiques (cf. section 2.3.2.1). La comparaison avec les données de terrain relevées au sein de la figure 68 met encore plus en évidence la nette surévaluation de l'indice obtenu avec le forçage DRIRE : ce dernier entraîne des UTCI pouvant être surestimés de deux niveaux de stress thermique.

Les coupes mettent également en évidence un problème commun aux deux simulations : hormis les mailles au sein desquelles se situent le centre commercial Rivétoile et la Presqu'île Malraux qui sont identifiées comme des LCZ 4, l'ensemble de la zone est considérée comme étant constituée de LCZ 5. Si cette appartenance respecte la classification LCZ de [Landes et al. \(2020\)](#), elle induit toutefois une absence de calcul de la température canyon dans les mailles concernées (cf. section 2.1.3). Cela peut déboucher sur des UTCI plus faibles, expliquant alors les valeurs nettement plus basses survenant sans transition entre mailles classées en LCZ 4 (traitées comme des canyons urbains) et celles en LCZ 5.

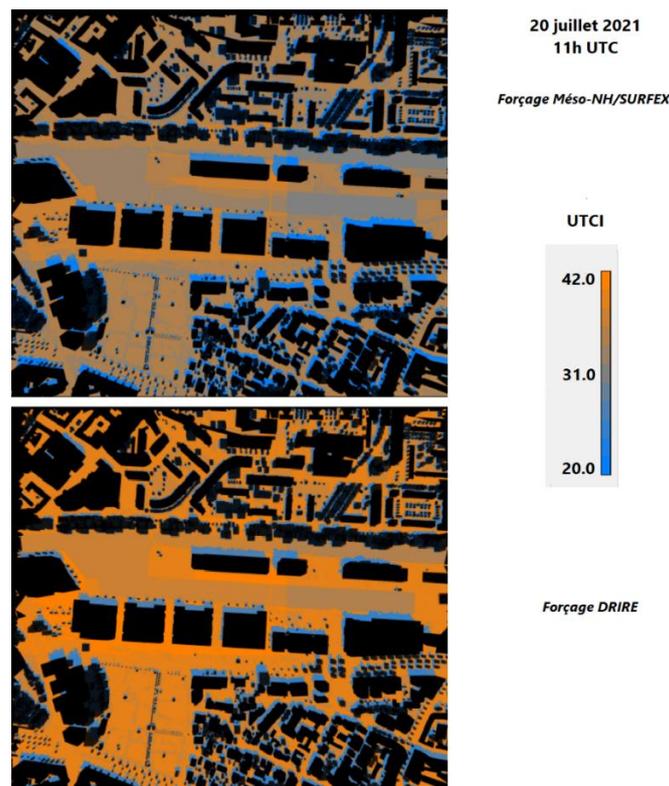


Figure 69 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé sur le secteur Malraux par LASER/F le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas).

Les cartes de l'UTCI à 11h TU issues d'ENVI-Met affichent également une forte hétérogénéité en termes de stress thermique ressenti (Figure 70). Au-delà de la prise en compte du degré d'exposition au rayonnement solaire, commune aux deux modèles microclimatiques, l'utilisation de la CFD fournit une représentation plus fine de la répartition spatiale de l'UTCI grâce à la simulation de la trajectoire du vent

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

dans les rues. D'ailleurs, ce sont les valeurs de vitesse et de direction du vent, propres à chaque forçage, qui expliquent les légères différences de motifs entre les deux simulations. À l'instar de ce qui a été observé pour LASER/F, le forçage issu de la DRIRE entraîne également des valeurs d'UTCI plus prononcées. À l'opposé, les UTCI simulés à partir du forçage Méso-NH/SURFEX semblent plutôt faibles : sur le secteur Malraux, l'indice de confort ne dépasse ainsi que très rarement les 30°C, alors que la campagne de mesures indique ce seuil est quasi systématiquement atteint à cette heure de la journée (cf. figure 68). L'explication réside à nouveau dans la sous-estimation de la TMRT au sein de la version 5.0.1.

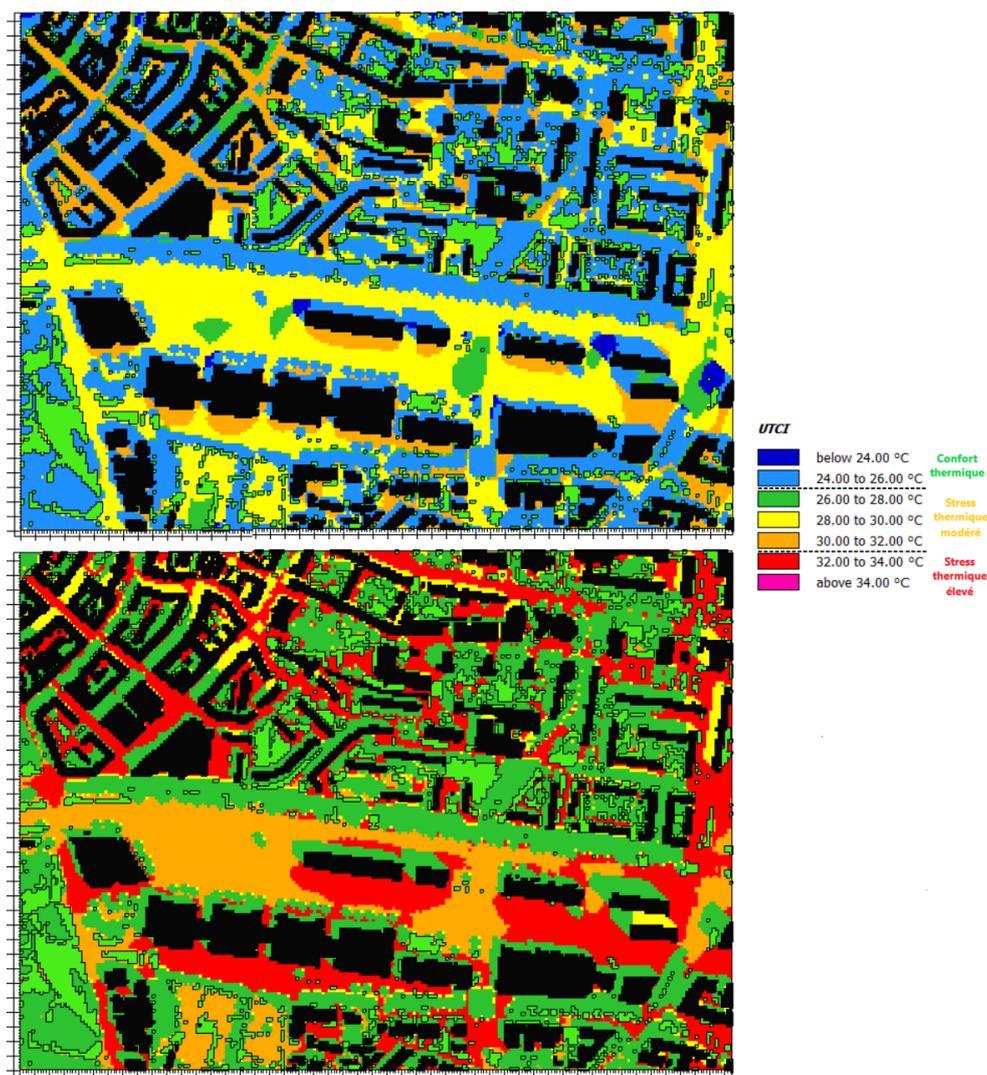


Figure 70 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé sur le secteur Malraux par ENVI-Met le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas).

La comparaison entre les cartes de LASER/F et d'ENVI-Met soulève également le problème du niveau de détail de la géométrie 3D : bien que permettant une réduction considérable des temps de calcul, l'utilisation de la résolution 4 m occasionne quelques soucis de représentativité spatiale de par sa grossièreté, et notamment un rapprochement trop important des couronnes d'arbres (cf. exemple figure 28). Déjà remarqué en section 2.2.2.2, ce problème se manifeste ici par une surestimation de l'ombre portée procurée par les arbres, conduisant à l'établissement d'un diagnostic erroné de confort thermique. Ceci est particulièrement visible pour le Quai Helbling, qui dispose d'une zone d'ombre continue engendrée des arbres trop proches les uns des autres dans ENVI-Met, au contraire de LASER/F

où l'ombre procurée par la végétation arborée est limitée aux environs immédiats de cette dernière. Pour chaque simulation, il est donc essentiel d'aboutir à un compromis entre temps de calcul et finesse du détail géométrique requis pour les objectifs de la simulation.

Évaluer le degré de performance de la chaîne de simulation en termes de modélisation des indices de confort implique de confronter directement les UTCI simulés avec ceux mesurés. Par conséquent, une comparaison entre sorties des modèles microclimatiques et données de terrain est effectuée pour quatre des huit sites du secteur Malraux durant les journées du 20 et 21 juillet 2021. Ces sites ont été sélectionnés car ils sont situés dans des mailles LASER/F au sein desquelles l'hypothèse du canyon urbain est appliquée (cf. 2.1.3).

Les résultats obtenus pour la station fixe Rivétoile corroborent certaines observations précédemment réalisées (Figure 71). Sans surprise, l'UTCI modélisé par LASER/F à partir du forçage Mésos-NH/SURFEX est ainsi nettement plus cohérent avec les mesures que celui obtenu à partir du forçage DRIRE (RMSE Forçage Mésos-NH/SURFEX = 1,8°C et RMSE Forçage DRIRE = 3,4°C), qui surestime l'indice de confort aussi bien de jour que de nuit. Forcé par les sorties de Mésos-NH/SURFEX, le modèle thermo-radiatif simule les mêmes niveaux de stress thermique que ceux atteints lors des mesures, et parvient donc à reproduire le comportement de l'UTCI de la station aussi bien du point de vue de ses valeurs que de sa dynamique ($R^2 = 0,94$).

Les sorties d'ENVI-Met souffrent quant à elles de la sous-estimation systématique de la TMRT diurne engendrée par la surévaluation de l'impact du rayonnement diffus (Figure 71, à droite). C'est particulièrement le cas pour l'UTCI obtenu à partir du forçage Mésos-NH/SURFEX (RMSE diurne Forçage Mésos-NH/SURFEX = 3,1°C) : ENVI-Met ne parvient effectivement pas à reproduire l'intensité maximale du stress thermique atteinte au cours de la journée, puisque même les valeurs les plus chaudes de l'UTCI modélisé ne dépassent pas le niveau de stress thermique modéré. La surestimation associée au forçage construit à partir des données de la DRIRE permet paradoxalement de compenser en partie le bug d'ENVI-Met affectant la TMRT. Les valeurs de l'UTCI simulé se rapprochent alors davantage de celles mesurées (RMSE diurne Forçage DRIRE = 2,1°C). Ce constat laisse supposer une possible amélioration des sorties d'ENVI-Met une fois le bug de la TMRT résolu, d'autant plus que le modèle CFD présente de bons résultats concernant la cinétique de l'UTCI ($R^2 = 0,94$ pour les deux forçages).

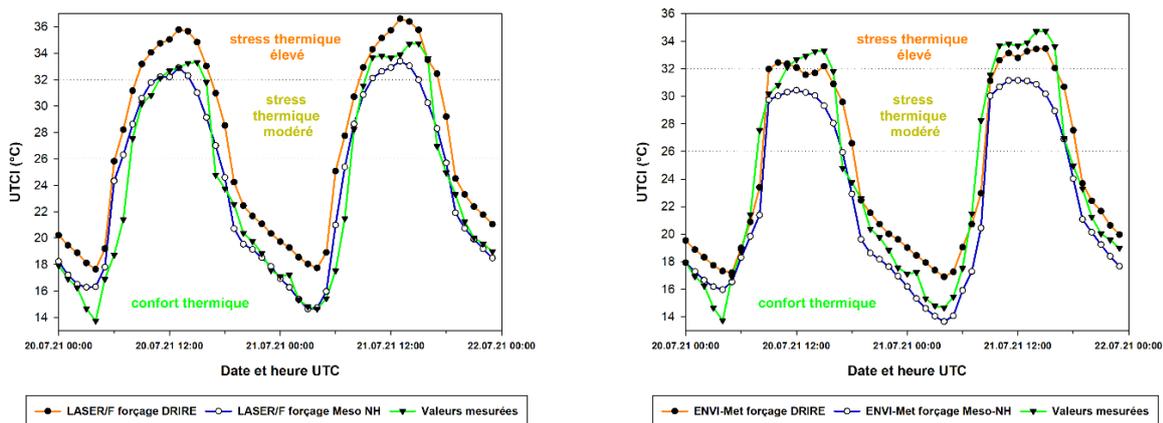


Figure 71 – Comparaison de l'UTCI de la station Rivétoile simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.

L'analyse de la station Cascade permet de mettre indirectement en évidence l'influence de la structure artificielle installée à proximité du dispositif de mesures (Figure 72). À l'instar de ce qui a été montré par les mesures (cf. figure 68), le site affiche en effet des valeurs d'UTCI plutôt modérées par rapport à d'autres stations malgré sa forte exposition au rayonnement solaire, le niveau de stress

2.3. Confrontation de la chaîne de simulation à un cas réel

thermique élevé étant tout juste atteint pendant une période relativement courte de la journée. Pourtant, LASER/F tend à surestimer l'UTCI diurne pour ce site, même lorsqu'il est forcé à partir de Mésos-NH/SURFEX (Figure 72, à gauche). Les valeurs des indicateurs statistiques restent toutefois excellentes ($R^2_{\text{forçage Mésos-NH}} = 0,9$ et $RMSE_{\text{forçage Mésos-NH}} = 2 \text{ °C}$). Il est de ce fait possible que cette surévaluation résulte principalement de la non-prise en compte de la cascade artificielle dans le domaine de simulation. La diffusion de vapeur d'eau à la manière d'un brumisateur permettrait ainsi, dans une certaine mesure, d'atténuer le stress thermique ressenti, à l'image des conclusions issues des travaux de [Ulpiani et al. \(2019\)](#) et [Di Giuseppe et al. \(2020\)](#).

S'agissant d'ENVI-Met, les résultats rejoignent ceux obtenus pour la station Rivétoile, avec un UTCI simulé constamment sous-estimé par rapport à la mesure (Figure 72, à droite). Cette fois en revanche, même l'utilisation du forçage DRIRE ne parvient pas à compenser la sous-évaluation de la TMRT diurne ($RMSE_{\text{diurne forçage Mésos-NH}} = 5,8 \text{ °C}$ et $RMSE_{\text{diurne forçage DRIRE}} = 4,1 \text{ °C}$). Cette très forte sous-estimation, équivalente à un niveau entier de stress thermique dans le cas de la simulation issue du forçage Mésos-NH/SURFEX, pourrait résulter une fois de plus du bug affectant la TMRT d'ENVI-Met couplé à une résolution horizontale trop grossière surestimant l'étendue de l'ombre procurée par les arbres situés aux alentours.

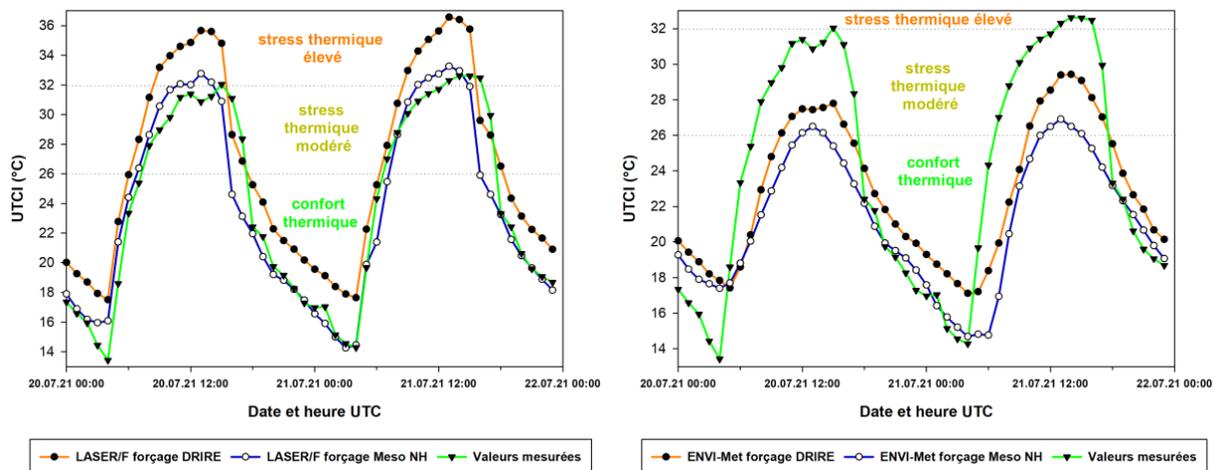


Figure 72 – Comparaison de l'UTCI de la station Cascade simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.

Concernant la comparaison avec les mesures du chariot 1, relevées uniquement de 7h TU à 19h TU inclus, il en ressort que les résultats issus de LASER/F forcé à partir des sorties de Mésos-NH/SURFEX s'accordent très bien avec les données de terrain (Figure 73, à gauche), tant sur la cinétique de l'UTCI que sur ses valeurs ($R^2_{\text{forçage Mésos-NH}} = 0,94$ et $RMSE_{\text{forçage Mésos-NH}} = 0,8 \text{ °C}$). Ces résultats permettent de faire confiance au modèle sur la pertinence de l'UTCI modélisé pour l'ensemble de la période.

Le constat n'est pas du tout le même pour les sorties d'ENVI-Met (Figure 73, à droite) : non seulement les valeurs de l'UTCI simulé sont une fois de plus affectées par la TMRT trop faible ($RMSE_{\text{forçage Mésos-NH}} = 5,4 \text{ °C}$ et $RMSE_{\text{forçage DRIRE}} = 3,8 \text{ °C}$), mais la dynamique de l'indice simulé diffère radicalement de celle de l'UTCI mesuré ($R^2_{\text{forçage Mésos-NH}} = 0,09$ et $R^2_{\text{forçage DRIRE}} = 0,12$). Une telle différence est difficilement explicable : la géométrie des environs ne présente pourtant pas de configuration particulière (cf. figure 54). De plus, par précaution, plusieurs capteurs fictifs avaient été installés sur la Presqu'île afin de correspondre au mieux à l'emplacement réel du dispositif de mesures, sans qu'aucun ne parvienne à reproduire la cinétique de l'UTCI mesuré. Le problème affectant ENVI-Met pour ce site reste donc à ce jour non-résolu.

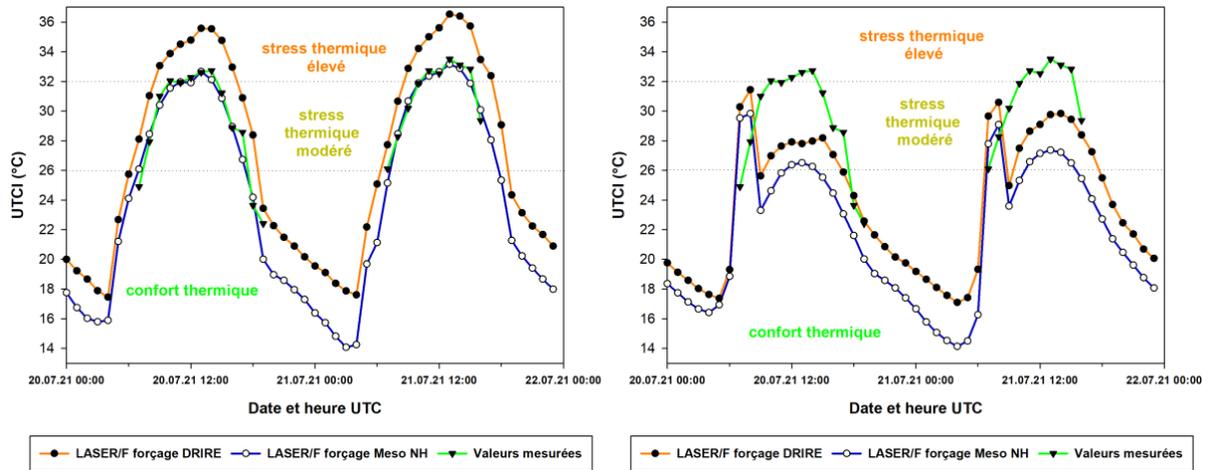


Figure 73 – Comparaison de l’UTCI du chariot n°1 simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.

Les UTCI simulés pour la station UGC vont à l’encontre de ce qui a été précédemment exposé (Figure 74) : quel que soit le modèle ou le forçage considéré, les résultats mettent en évidence des difficultés à modéliser l’UTCI de ce site, et ceci aussi bien en termes de valeurs (RMSE comprises entre 3,2 et 3,6 °C) que de reproduction de sa dynamique très particulière (R^2 compris entre 0,55 et 0,66).

S’agissant de LASER/F, la sous-estimation des deux pics diurnes, ainsi que de l’UTCI nocturne, s’explique par le fait que la station UGC se situe au sein d’une maille n’étant pas considérée comme un canyon urbain (cf. figure 69 et section 2.1.3). En revanche, les différences de cinétique relèvent sans doute davantage d’un problème de morphologie : le bâtiment près duquel la station est située présente en effet une configuration géométrique particulièrement complexe (cf. figure 43 et annexe A), difficile à reproduire. Ces résultats soulignent davantage encore la nécessité de recourir à un très haut niveau de détail géométrique lors d’une modélisation à micro-échelle. En outre, ils confirment que la résolution 4 m d’ENVI-Met s’avère trop grossière pour simuler de manière cohérente le comportement de certains sites présentant une géométrie complexe. Enfin, ils démontrent que dans LASER/F, l’hypothèse du canyon urbain devrait s’appliquer à l’ensemble du secteur Malraux, au-delà de la maille Presqu’Ile.

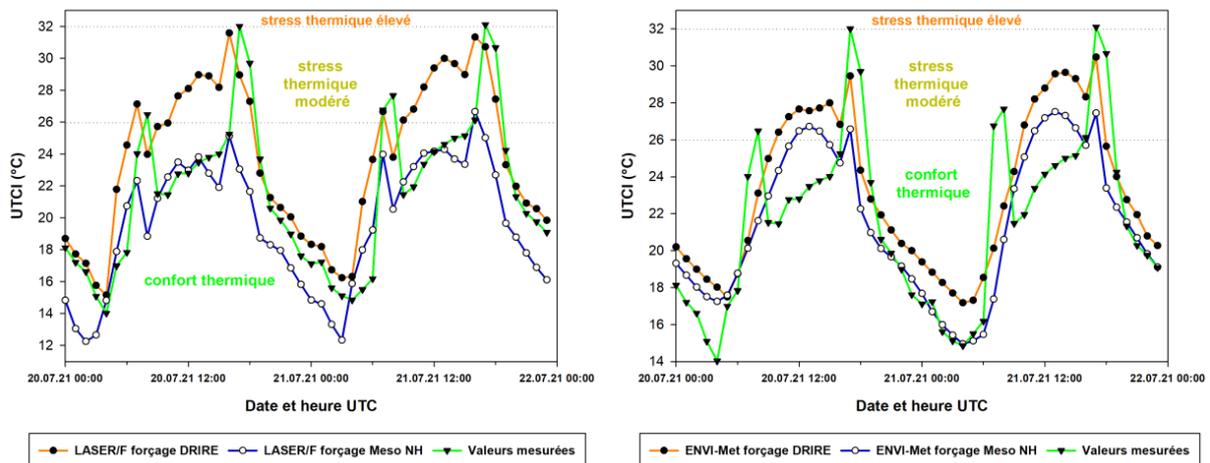


Figure 74 – Comparaison de l’UTCI de la station UGC simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.

2.4. Conclusion du chapitre 2

Faisant suite aux travaux de [Kastendeuch & Najjar \(2015\)](#), un couplage entre méso et micro-échelles a été proposé au sein de ce chapitre. Le principal objectif de la démarche consistait à générer des fichiers de forçage à l'aide des sorties d'un modèle méso-climatique, et ceci afin d'alimenter des modèles microclimatiques. Il serait alors possible de simuler une agglomération entière tout en réalisant des zooms sur un secteur particulier, sans être limité par l'absence de données de terrain.

La première partie du chapitre a donc traité de la validation des différents modèles constituant la chaîne de simulation. Le système Méso-NH/SURFEX a été employé comme modèle de méso-échelle, tandis que LASER/F et ENVI-Met ont été utilisés en tant que modèles microclimatiques. Les résultats de ces derniers ont été confrontés aux données du site du Jardin du Palais Universitaire. L'ensemble des contrôles, vérifications et validations effectués ont permis d'évaluer la pertinence des sorties de LASER/F et d'ENVI-Met aussi bien pour des composantes du bilan d'énergie que pour les variables climatiques et les indices de confort. Les deux modèles se sont révélés complémentaires : LASER/F fournit ainsi des résultats très convaincants pour les flux de chaleur turbulents, tandis qu'ENVI-Met modélise de manière cohérente les principales variables climatiques. S'agissant des indices de confort, les modèles parviennent tous deux à les simuler avec un haut degré de pertinence, en particulier l'UTCI.

La seconde partie a porté sur l'application du couplage entre méso et micro-échelles sur le quartier Malraux de la ville de Strasbourg. Après que le principe et l'intérêt de la démarche ont été présentés, plusieurs comparaisons ont été effectuées sur un grand nombre de variables entre les sorties de SURFEX et celles de LASER/F et d'ENVI-Met à l'échelle d'une maille commune, afin de vérifier que la chaîne de simulation conserve une certaine cohérence entre les différentes échelles. La plupart des résultats répondent à cette exigence, soulignant de ce fait la faisabilité de la démarche et son intérêt. De plus, aucune des quelques divergences persistantes entre les modèles ne remet en question la pertinence du couplage inter-échelles, certaines d'entre elles permettant même au contraire de mieux mettre en évidence son intérêt.

La période à laquelle les simulations ayant été réalisées dans la section précédente ne disposant pas de données de terrain pour le quartier Malraux, la dernière partie du chapitre s'est par conséquent consacrée à la comparaison des sorties de la chaîne de simulation avec des valeurs mesurées. Une campagne de mesures a ainsi été spécialement réalisée au cours de l'été 2021 dans le but de valider le couplage entre méso et micro-échelles. Afin de démontrer tout l'intérêt de l'utilisation d'un forçage obtenu à partir des sorties d'un modèle méso-climatique, deux simulations différentes ont été réalisées avec LASER/F et ENVI-Met : la première a été forcée à l'aide du fichier obtenu via les résultats de Méso-NH/SURFEX, alors que le forçage ayant alimenté la seconde a été construit à partir des données issues de la station de la DRIRE, située sur le toit d'un bâtiment relativement proche de Malraux. Les comparaisons ont été effectuées pour les principales variables climatiques, ainsi que pour l'UTCI. Dans l'ensemble, les résultats de LASER/F alimenté par les sorties de Méso-NH/SURFEX soutiennent la comparaison avec ceux issus de la simulation forcée par les données de la DRIRE, s'avérant même fréquemment plus pertinents que ces derniers. En outre, la campagne de mesures réalisée sur Malraux permet de mettre en évidence la contribution de certains facteurs à l'ambiance climatique locale, notamment le rôle de la géométrie urbaine et celui de l'eau. Ce dernier nécessite toutefois de mener de futures investigations, et notamment des expérimentations de terrain, afin d'être véritablement compris.

La chaîne de simulation proposée dans ce chapitre s'est donc révélée à la fois faisable et pertinente en termes de résultats fournis. Son intérêt réside aussi dans sa capacité à pouvoir anticiper les conséquences d'un projet urbain ou d'un aménagement sur l'ambiance climatique locale. C'est donc dans cette optique que nous pouvons désormais aborder l'utilisation du couplage entre méso-échelle et micro-échelle dans l'évaluation de l'impact de scénarios sur l'ICU et le confort thermique.

Chapitre 3 : Étude de la contribution de facteurs influençant le confort thermique urbain

Nous avons démontré dans le chapitre précédent que le couplage d'un modèle de méso-échelle avec un modèle de micro-échelle offrait de nouvelles perspectives en permettant de simuler n'importe quelle zone de l'Eurométropole de Strasbourg, y compris celles pour lesquelles il n'existe aucune donnée de terrain. Or tout l'intérêt de la modélisation réside également dans la capacité de tester l'impact d'aménagements sur l'ICU et le stress thermique : de ce fait, elle constitue un moyen d'anticiper les conséquences d'un projet urbain sur l'ambiance climatique d'une zone donnée, ou encore d'évaluer le potentiel de certaines solutions d'atténuation en termes d'amélioration du confort thermique.

Nombreuses sont les solutions d'atténuation ayant déjà été appliquées et éprouvées via des analyses menées dans diverses villes du globe (Gago et al., 2013 ; Aleksandrowicz et al., 2017, Taleghani, 2018). Parmi elles, celles reposant sur la végétation font partie des plus plébiscitées (Bowler et al., 2010 ; Demuzere et al., 2014 ; Hami et al., 2019). D'autres consistent à modifier les propriétés physico-thermiques des matériaux de construction (Gaitani et al., 2011 ; Wang et al., 2016 ; Tsoka et al., 2017), ou encore à agir sur la géométrie urbaine via la hauteur et la densité du bâti (Taleghani et al., 2015 ; Straka & Sodoudi, 2019 ; Vukovic et al., 2019). Les résultats de toutes ces études visent essentiellement à alimenter des préconisations à destination des urbanistes et aménageurs (Oke et al., 2017). Or même si cet objectif est mentionné en introduction ou en conclusion de la quasi-totalité des analyses consacrées à l'élaboration de scénarios, très peu de travaux s'y adaptent du point de vue opérationnel. En effet, la plupart des scénarios testés s'avèrent difficilement applicables, certains d'entre eux pouvant même être complètement irréalistes, comme la plantation massive d'arbres sans aucune prise en compte des spécificités de la zone concernée (Santamouris et al., 2017). Il en résulte que les services d'urbanisme et d'aménagement des collectivités se retrouvent souvent dans l'incapacité de tirer profit des conclusions auxquelles ces études aboutissent.

La conception de scénarios réalistes nécessite donc de prendre en considération les contraintes auxquelles sont confrontées les agglomérations. En premier lieu, la diversité des unités urbaines (quartier, îlot, rue...) implique d'adapter les solutions potentielles d'atténuation aux spécificités propres à chacune de ces échelles spatiales, ce qui est impossible à réaliser avec un seul type de modèle. Par ailleurs, en plus de la lutte contre l'ICU et le stress thermique, les collectivités territoriales doivent tenir compte de problématiques supplémentaires, aussi bien environnementales qu'économiques ou urbanistiques. Parmi ces dernières, la politique de densification urbaine en cours au sein de l'EMS cherche ainsi à répondre conjointement aux enjeux de production de logements et de lutte contre l'étalement urbain. Elle constitue néanmoins un facteur d'aggravation de l'ICU nocturne (Oke, 1981 ; Lemonsu et al., 2015 ; Yin et al., 2018) : il apparaît de ce fait nécessaire d'en évaluer l'impact exact sur le confort thermique afin de parvenir au meilleur compromis possible. Enfin, il semble essentiel de pouvoir mettre en place des solutions d'atténuation adaptées aussi bien à des zones au bâti existant, au sein desquelles les marges de manœuvre restent limitées, qu'à des projets urbains en cours de conception, pour lesquels les possibilités sont plus étendues.

Ce chapitre vise donc à établir la faisabilité de huit scénarios proposés par les services d'urbanisme de l'EMS, qui tiennent compte du contexte urbanistique et cherchent à diminuer au maximum l'impact sur le confort thermique. Après un bref résumé du cadre réglementaire et des politiques publiques à l'œuvre au sein de l'EMS, les résultats de deux premiers scénarios sont comparés à méso et micro échelles afin de souligner la complémentarité des deux échelles dans l'évaluation de solutions d'atténuation. L'impact de la densification verticale sur le confort thermique est ensuite estimé à l'aide de trois scénarios d'aménagement impliquant une surélévation du bâti. Enfin, le chapitre se termine par l'évaluation de l'impact climatique d'un projet d'aménagement en cours de réalisation au sein de l'EMS.

3.1. Contexte urbanistique et réglementaire autour de l'enjeu climatique

Avant tout, il est essentiel de choisir des scénarios qui tiennent compte des politiques publiques actuelles et s'y intègrent, afin que leurs conclusions puissent être pleinement exploitables par les services d'urbanisme et d'aménagement de l'EMS. Par conséquent, cette partie se propose de résumer succinctement le cadre réglementaire et les enjeux urbanistiques qui ont conduit à leur élaboration. Les politiques publiques nationales d'urbanisme et de développement durable, ainsi que leur transposition à l'échelle locale, sont brièvement exposées afin d'appréhender le contexte à l'origine des scénarios et les demandes auxquelles ils devront répondre.

3.1.1. Politiques publiques à l'échelle nationale

Engagées dès le début des années 2000, les politiques urbaines de densification concernent actuellement l'ensemble des villes françaises (Fonticelli, 2018). En cherchant principalement à lutter contre l'étalement urbain initié lors des décennies précédentes (Touati, 2010), elles s'inscrivent dans une logique de développement durable tout en permettant de maintenir la production de logements neufs (Bouchet-Blancou, 2020).

C'est également dans cet esprit que les lois actuellement mises en place incitent à la poursuite de ce mouvement de densification urbaine. Ainsi, la première loi en sa faveur est celle relative à la **Solidarité et au Renouveau Urbain** (SRU, 13.12.2000) : non seulement elle encourage à ne pas consommer d'espaces non urbanisés supplémentaires, mais elle supprime également le Plafond Légal de Densité (PLD) qui encadrait fortement la densification (Touati, 2010 ; Fonticelli, 2018 ; Bouchet-Blancou, 2020). Ce cadre réglementaire est encore renforcé par la loi de **l'Engagement National pour l'Environnement** (ENE ou « Grenelle II », 2010), qui vise à davantage enrayer la consommation d'espaces naturels et agricoles, puis par la loi pour **l'Accès au Logement et un Urbanisme Renoué** (ALUR, 24.03.2014) qui supprime le Coefficient d'Occupation des sols (COS) et donne plus d'importance au Plan Local d'Urbanisme (PLU). Enfin, la loi pour **l'Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique** (ELAN, 23.11.2018) incite à construire davantage de logements tout en simplifiant les normes et procédures (Bouchet-Blancou, 2020).

En plus de cet ensemble de règles promouvant la densification, la loi **Climat & Résilience** (22.08.2021) intègre également un volet consacré à l'urbanisme. Ce dernier comprend notamment l'objectif **Zéro Artificialisation Nette** (ZAN) qui repose sur une double échéance, en visant tout d'abord la division par deux du rythme d'artificialisation des sols d'ici 2031, puis son arrêt complet à l'horizon 2050. Il s'agit d'atteindre un équilibre entre création ou extension effective d'espaces urbains, et la renaturation de sols actuellement urbanisés (ATD Haute-Garonne, 2021). Bien qu'il ne soit précisé nulle part quel mode de densification doit être privilégié, la nécessité de préserver les espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF) induit de facto une limitation de la densification horizontale, qui implique forcément une artificialisation supplémentaire. Par ailleurs, la rareté du foncier encore disponible au sein des communes contraint fortement la densification intra-muros (Bouchet-Blancou, 2020). De ce fait, ces contraintes aussi bien réglementaires que pratiques orientent davantage les politiques urbaines vers une densification verticale, celle-ci pouvant s'effectuer par le biais de la surélévation⁶. Cette dernière représente donc un compromis intéressant entre production de logements neufs et lutte contre l'étalement urbain, d'autant plus qu'un décret publié récemment (8.03.2023) permet désormais aux constructions exemplaires sur le plan environnemental de déroger aux règles de hauteur définies dans le PLU (Légi France, 2023).

⁶ Surélévation : ajout d'un ou plusieurs étages au-dessus d'un bâtiment existant (Bouchet-Blancou, 2020).

S'agissant des politiques d'atténuation de l'ICU et du stress thermique d'une agglomération, elles ne sont pas directement mentionnées au sein du cadre législatif : dans les lois Climat & Résilience et **Énergie et Climat** (EC, 8.11.2019), les aspects consacrés à l'adaptation au changement climatique se focalisent en effet surtout sur le volet énergétique. À l'échelle territoriale, la loi ENE rend toutefois obligatoire, depuis 2018, l'adoption d'un **Plan Climat Air Énergie Territorial** (PCAET) pour tout **Établissement Public de Coopération Intercommunale** (EPCI) de plus de 20 000 habitants, catégorie à laquelle appartient l'Eurométropole de Strasbourg.

3.1.2. Déclinaison à l'échelle de l'Eurométropole de Strasbourg

Le contenu des lois énoncées ci-dessus est obligatoirement pris en compte dans les différents documents d'urbanisme et de planification régissant les politiques publiques d'une collectivité. Parmi eux, le **Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires** (SRADDET) correspond à un document d'aménagement s'appliquant à une région et fixant des objectifs et règles se rapportant à plusieurs domaines, dont la lutte contre le changement climatique et les politiques urbaines (Cerema, 2020). À l'échelle d'une collectivité territoriale, ces deux sujets sont essentiellement intégrés par le PCAET et le PLU, respectivement. Le premier présente les objectifs opérationnels et le programme d'actions à réaliser en vue d'adapter le territoire au changement climatique. Le second fixe les règles d'usage des sols de l'ensemble de la collectivité et définit les orientations majeures d'urbanisme et d'aménagement pour la ville à moyen terme (EMS, 2021a). Tous deux doivent prendre en compte les objectifs du SRADDET et être compatibles avec ses règles.

Voté en 2019, le SRADDET Grand Est vise à intégrer à la fois les enjeux d'atténuation de l'ICU et de réduction de l'étalement urbain dans l'aménagement des territoires. Plusieurs règles y mentionnent ainsi explicitement la lutte contre l'ICU en tant qu'objectif prioritaire, notamment celles consacrées à l'adaptation au changement climatique et à la préservation de la Trame Verte et Bleue (TVB). Cet objectif se retrouve dans le PCAET de l'EMS, adopté fin 2019 pour une durée de six ans : ce dernier souligne ainsi ouvertement la nécessité d'améliorer le confort thermique des habitants à travers une meilleure connaissance de l'ICU, une identification des potentielles oasis de fraîcheur et un renforcement de la place du végétal en ville (EMS, 2019a). Concernant les politiques urbaines, le SRADDET impose de définir, à l'échelle du PLU, les conditions permettant de réduire la consommation foncière d'au moins 50% à l'horizon 2030. Le PLU est également tenu d'identifier les secteurs présentant un potentiel de densification important, et de privilégier ce mode d'urbanisation à l'étalement urbain (Région Grand Est, 2019). Par conséquent, la construction de 3 000 logements par an sur le territoire, prévue par le PLU de l'EMS jusqu'à l'horizon 2030 (EMS, 2021b), devra s'effectuer majoritairement via la densification.

À ces documents cadres, non négociables, s'ajoutent également plusieurs démarches participatives incluant parmi leurs objectifs la lutte contre l'ICU et l'amélioration du confort thermique, notamment à travers des stratégies de végétalisation. Établi en 2020, le **Plan Canopée** constitue ainsi une déclinaison opérationnelle du PCAET de la Ville de Strasbourg. Il vise à renforcer la protection du patrimoine arboré existant tout en plantant 10 000 arbres supplémentaires d'ici 2030 (Ville de Strasbourg, 2020). La Ceinture Verte représente un large réseau d'espaces végétalisés et recouvre un périmètre d'environ 900 ha situé sur les bans communaux de Strasbourg et Schiltigheim. Elle constitue désormais un dispositif réglementaire et fait l'objet d'une Orientation d'Aménagement et de Programmation (OAP). Bien que quelques extensions de son périmètre soient prévues, elle s'inscrit plutôt dans une volonté de préservation de l'existant. Enfin, un avenant portant sur la santé environnementale a été ajouté au Contrat Local de Santé 2015-2020 (CLS) lors d'une délibération du Conseil de l'EMS en mars 2019 (EMS, 2019b) : celui-ci permet d'intégrer la préservation du confort thermique en tant qu'enjeu sanitaire et de lancer l'étude menée par Météo France (Goret, 2021) sur la modélisation de l'ICU à méso-échelle (cf. chapitre 2.1).

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

Exposées précédemment, les politiques publiques actuelles soulignent formellement la nécessité de construire la ville sur elle-même, et donc de densifier l'existant. Dès lors, il apparaît nécessaire de déterminer dans quelle mesure il est possible de limiter l'ICU et le stress thermique dans un contexte urbain préexistant, dont ni la morphologie, ni la voirie ne peuvent être modifiées. Cela implique de ce fait de recourir à des solutions d'atténuation s'adaptant au possible aux contraintes de l'existant. La végétalisation et la modification des paramètres thermo-radiatifs des matériaux de construction (albédo, émissivité⁷) constituent des actions prometteuses : non seulement leur effet rafraîchissant a déjà été montré dans la littérature (Norton et al., 2015 ; Santamouris et al., 2017 ; Tsoka et al., 2018, Mittermüller et al., 2021), mais il s'agit aussi de solutions de moindre coût et pouvant être appliquées relativement aisément, y compris au sein de zones déjà densément bâties. Il semble donc intéressant d'évaluer le potentiel d'atténuation de ces deux paramètres à travers la modélisation de scénarios d'aménagement au sein d'un site urbain au bâti existant, et qui plus est concerné par de fortes intensités d'ICU.

Deux scénarios, basés respectivement sur une augmentation du pourcentage de surface végétale et sur une hausse de l'albédo et de l'émissivité du bâti, ont déjà été modélisés à méso-échelle sur tout le territoire de l'EMS par Météo France (Goret, 2021). Ils permettent donc de déterminer l'impact de ces scénarios sur l'ICU et le stress thermique à une échelle allant de l'agglomération entière jusqu'au quartier. Or certains détails géométriques, dont la prise en compte apporte des informations supplémentaires (cf. 2.2.2.2 et 2.3.2.2), ne sont pas accessibles par le biais de la modélisation à méso-échelle. De ce fait, analyser les répercussions d'un scénario à une résolution plus fine requiert l'utilisation de modèles microclimatiques, qui peuvent simuler un quartier, une rue ou même un bâtiment. Les deux types de modèles ont ainsi en commun l'échelle du quartier, ce qui permet de comparer leurs résultats respectifs à ce niveau de simulation et donc de s'assurer de leur bon fonctionnement.

L'objectif de cette partie est donc double : il s'agit en effet d'estimer l'efficacité de la végétalisation et de la modification des paramètres thermo-radiatifs des matériaux comme solutions d'atténuation de l'ICU et du stress thermique, tout en vérifiant que les modèles méso et microclimatiques obtiennent les mêmes résultats à une échelle commune. Pour ce faire, les scénarios simulés à méso-échelle par l'étude de Météo France (Goret, 2021) sont également testés sur le quartier Malraux à l'échelle microclimatique. Des préconisations sont ensuite établies à partir de ces résultats et de leur comparaison avec ceux obtenus à méso-échelle.

3.2.1. Contexte de la zone d'étude et scénarios d'adaptation proposés

Le périmètre sur lequel nous allons nous focaliser pour tester les différents scénarios est constitué du secteur Malraux (cf. 2.2.2.1), qui a été étendu en y intégrant les quartiers situés au nord et au sud afin de tenir compte d'une certaine variété en termes de configuration urbaine (cf. figure 43). Les caractéristiques de ces sites, ainsi que celles des scénarios d'aménagement qui vont y être appliqués, sont décrites dans la partie qui suit.

⁷ Émissivité : capacité d'un corps ou d'une surface à absorber de l'énergie et à la réémettre par rayonnement. Elle varie entre 0 pour les corps n'absorbant ou n'émettant aucun rayonnement, et 1 pour ceux absorbant et réémettant la totalité de l'énergie reçue.

3.2.1.1. Présentation des différents secteurs composant la zone d'étude

La cartographie de l'ICU maximal moyen (cf. chapitre 1.3.2) met en évidence l'exposition du secteur Malraux à de fortes intensités d'ICU, ces dernières y atteignant en effet plus de 5°C (Figure 75). Les mesures réalisées lors de l'expérimentation de terrain de l'été 2021 (cf. chapitre 2.3) ont permis de corroborer ces résultats : des intensités maximales d'ICU supérieures à 5°C ont en effet été relevées lors de la belle période du 18 au 22 juillet 2021 pour les cinq stations fixes (cf. annexe O). La zone d'étude Malraux s'avère donc être un secteur particulièrement exposé à l'ICU, d'où la nécessité d'éviter d'y aggraver davantage le phénomène.

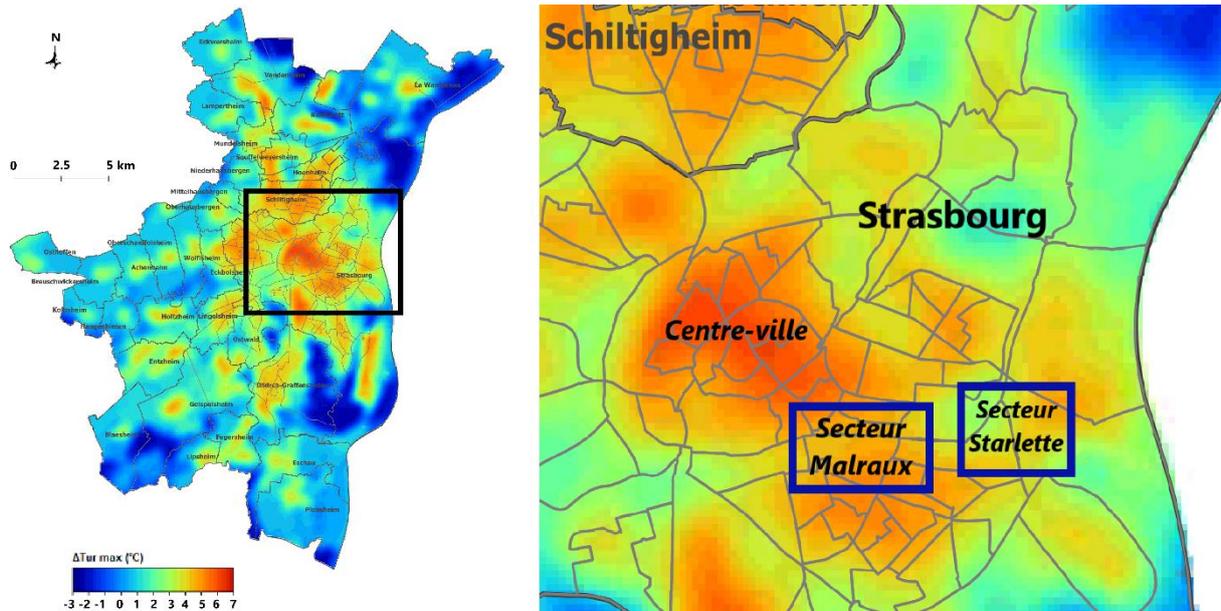


Figure 75 – Cartographie de l'ICU maximal moyen lors de journées de beau temps de l'été 2015 pour les secteurs Malraux et Starlette.

Par ailleurs, la zone d'étude Malraux comprend quatre quartiers (Figure 76). À chacun d'eux correspondent une **LCZ**, un **IRIS** (Îlot Regroupé pour l'Information Statistique)⁸ et une catégorie de **zone PLU**, qui permettent d'identifier leurs caractéristiques démographiques, morphologiques et réglementaires.

Le quartier Malraux se situe au cœur d'une **LCZ 4**, et présente donc un tissu urbain relativement ouvert, mais au bâti plutôt haut. S'agissant du zonage PLU⁹, il est classé en zone **UD**, autrement dit d'usage mixte (habitat, commerces, services...). La présence de nombreux établissements commerciaux et de loisirs fait que la population résidente y est relativement peu nombreuse (1 700 habitants). Le quartier Esplanade appartient quant à lui à une **LCZ 5**, correspondant à un bâti peu dense et de hauteur moyenne. Également affecté à une zone **UD**, il est réparti sur deux IRIS de 7 300 habitants au total (INSEE, 2017). La classification en **UD** signifie que les règles d'urbanisme s'appliquant sur ces deux

⁸ IRIS (Îlot Regroupé pour l'Information Statistique) : unité spatiale constituant la brique de base en matière de diffusion de données infra-communales, et présentant des caractéristiques démographiques et géographiques relativement homogènes (INSEE, 2016). L'EMS en compte 195, dont 116 pour la seule ville de Strasbourg.

⁹ Zonage PLU : il sert à catégoriser un territoire en zones urbaines (**U**), à urbaniser (**AU**), agricoles (**A**) et naturelles (**N**). Les zones urbaines se répartissent ensuite en plusieurs types, dont les zones **UAB** (zone d'usage mixte identifiant les bâtis anciens des quartiers strasbourgeois), **UB** (zone d'usage mixte au bâti hétérogène) et **UD** (zones mixtes se rapportant aux grands ensembles d'immeubles collectifs et aux secteurs de renouvellement urbain) (EMS, 2021a).

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

secteurs restent relativement souples en termes d'implantation du bâti ou d'occupation du sol (EMS, 2021a) : cela permet donc d'envisager, plus facilement qu'ailleurs, la conduite d'actions et d'aménagements en faveur de l'amélioration du confort thermique.

À l'opposé, le quartier Krutenau appartient à une **LCZ 2**, ce qui équivaut à un tissu urbain densément bâti. Il s'agit d'un site **UAB**, donc essentiellement résidentiel (3 100 habitants (INSEE, 2017)) et comportant de nombreux bâtiments présentant un fort intérêt patrimonial. Le règlement y est par conséquent particulièrement encadré et a pour principal objectif de préserver les formes architecturales et urbaines de ces quartiers (EMS, 2021a). Les aménagements possibles au sein de ce secteur s'avèrent donc limités.

Enfin, le quartier Neudorf relève d'une **LCZ 5**. Il s'agit d'une zone **UB**, qui regroupe principalement les faubourgs de l'agglomération. On y trouve une importante diversité de formes urbaines, avec des habitats très denses côtoyant des zones plus pavillonnaires. À l'instar de la zone Krutenau, Neudorf est un secteur plutôt résidentiel (3 100 habitants (INSEE, 2017)), et comporte certains bâtiments patrimoniaux. Néanmoins, les règles d'urbanisme relatives à ce type de zone sont plus souples que celles s'appliquant aux zones UAB, et permettent d'envisager une densification et des aménagements maîtrisés (EMS, 2021a).

Les quatre quartiers composant le domaine de simulation présentent donc chacun un contexte urbain particulier, auquel il est nécessaire d'adapter les scénarios d'atténuation, afin que leurs conclusions puissent être exploitables par les services d'urbanisme et d'aménagement de la collectivité.

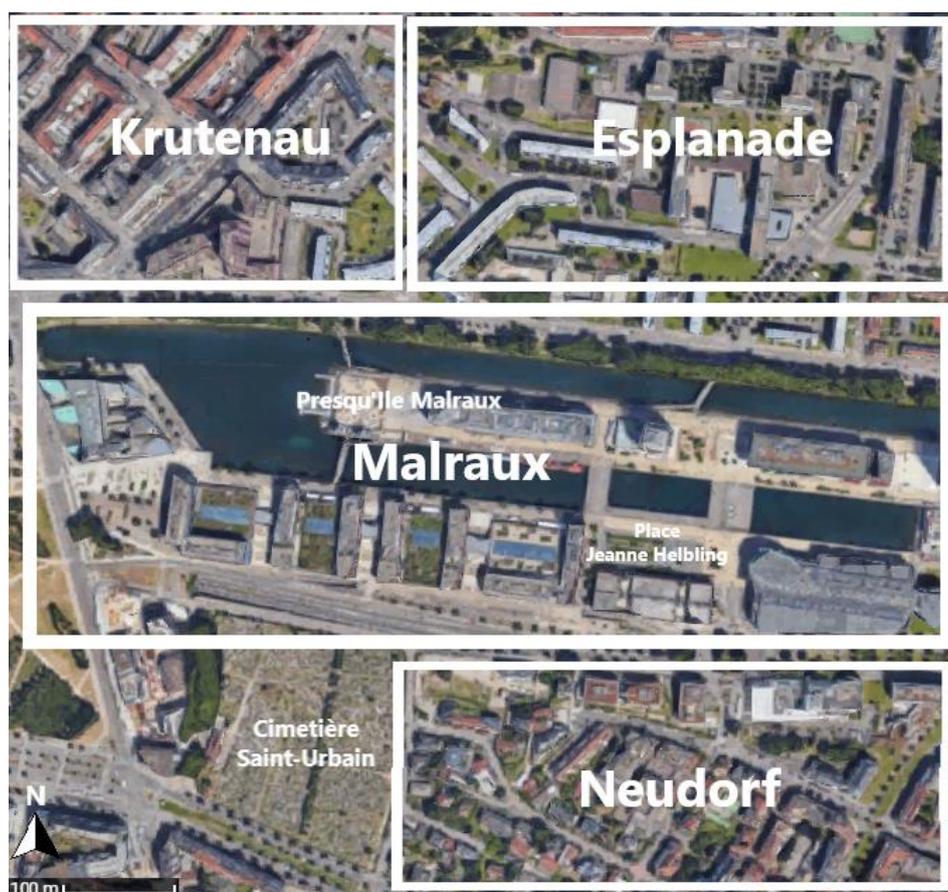


Figure 76 – Découpage sous forme de rectangles de la zone d'étude en quatre secteurs : Krutenau, Esplanade, Malraux et Neudorf (source : Google Maps).

3.2.1.2. Description des scénarios

Dans le cadre de l'étude réalisée par Météo France (Goret, 2021), deux scénarios ont été testés avec le système Més0-NH/SURFEX à résolution 100 m sur le secteur Malraux. La situation météorologique type est la même que celle utilisée lors du chapitre précédent (cf. 2.2.2), à savoir la période caniculaire allant du 30 juin au 2 juillet 2015. Le premier scénario simule une **hausse de la fraction végétale de 20%** dans chaque maille. Cet ajout est composé de 50% de végétation arborée et 50% de végétation herbacée, toutes deux irriguées afin d'assurer leur capacité d'évapotranspiration. Parvenir à + 20% de fraction végétale dans le secteur Malraux, très minéral et plutôt densément bâti, a toutefois nécessité de végétaliser des parkings, des trottoirs et même des routes. Or modéliser un tel scénario, délibérément exacerbé, permet de se faire une idée de l'effet d'atténuation maximal de la végétation, à l'image des études réalisées par Ng et al. (2012) et Ouyang et al. (2020).

Le second scénario **combine la végétalisation déjà effectuée** pour le scénario précédent, à **l'utilisation de matériaux réfléchissants pour les murs et les toits** des bâtiments : l'albédo et l'émissivité de ces derniers augmentent ainsi sensiblement, atteignant les valeurs des revêtements réfléchissants utilisés pour les toitures et les façades (Cool Roof France, 2021). Par la suite, ce scénario sera nommé « VégAlbédo ».

Ces deux scénarios ont également été simulés à l'échelle microclimatique pour la même période. Compte tenu du bug d'ENVI-Met 5.0.1 affectant la TMRT et des temps de calcul importants (cf. 2.3.2), toutes ont été réalisées uniquement avec le modèle LASER/F (Figure 77). Le forçage météorologique du modèle microclimatique est le même que celui utilisé lors du couplage entre méso et micro-échelles dans le chapitre précédent (cf. 2.2.2). Étant donné qu'à cette échelle nous disposons de la configuration réelle de la zone, l'augmentation de la fraction végétale dans LASER/F a été adaptée aux contraintes imposées par le tissu urbain (Figure 77, à droite). La voirie a ainsi été conservée en l'état, et la végétalisation de la zone a été réalisée en priorité dans des lieux où de telles opérations sont en cours ou à l'état de réflexion : c'est le cas du cimetière Saint-Urbain et de la place Jeanne Helbling, ou encore de la Presqu'île Malraux. Les arbres supplémentaires ont d'ailleurs été exclusivement plantés sur ces deux derniers sites. Par conséquent, la prise en compte de ces limites induit une végétalisation nettement moins importante que celle réalisée avec Més0-NH/SURFEX (+3,85% de surface végétale sur l'ensemble du secteur). L'utilisation de la micro-échelle permet ainsi de focaliser la végétalisation sur des zones où elle s'avère réalisable, rendant cette approche complémentaire à celle de la méso-échelle.



Figure 77 – Maquette 3D de la zone Malraux représentée par LASER/F selon les scénarios *État initial* et *Albédo* (à gauche) et les scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* (à droite).

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

Afin de mettre en évidence le rôle joué par l'albédo et l'émissivité, un troisième scénario a également été modélisé à micro-échelle, dans lequel l'augmentation de ces deux grandeurs est la seule modification effectuée. Les différents scénarios appliqués, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 2, visent à déterminer le potentiel d'atténuation respectif de ces deux facteurs – pris individuellement, puis de leur combinaison.

Scénario	Albédo Mur	Émissivité Mur	Albédo Toit	Émissivité Toit	Surface végétale (%)
<i>État initial</i>	0,30	0,90	0,25	0,80	8,37
<i>Végétation</i>	0,30	0,90	0,25	0,80	12,22 (soit environ + 50% par rapport à l'existant)
<i>Albédo</i> (LASER/F uniquement)	0,83	0,91	0,90	0,90	8,37
<i>VégAlbédo</i>	0,83	0,91	0,90	0,90	12,22

Tableau 2 – Grandeurs modifiées dans le cadre des scénarios de végétalisation et d'augmentation de l'albédo appliqués à la zone Malraux. Les chiffres du pourcentage de surface végétale ne concernent que le modèle LASER/F : lors des simulations avec MésO-NH/SURFEX, cette part est augmentée de + 20%.

3.2.2. Application des scénarios à méso et micro-échelles

La comparaison de MésO-NH/SURFEX et LASER/F à une échelle commune vise à s'assurer que leurs résultats respectifs restent cohérents. Or elle pose également la question de l'indicateur le plus approprié dans l'évaluation de leur potentiel d'atténuation. Plusieurs études cherchent avant tout à réduire l'effet d'ICU nocturne et utilisent de ce fait la température de l'air comme principale paramètre d'évaluation (Soudoudi et al., 2014 ; Peron et al., 2015 ; Cortes et al., 2022 ; Battista et al., 2023). Cependant, cette variable ne permet pas de déterminer à elle seule le niveau de stress thermique ressenti, et ne suffit donc pas à éprouver l'efficacité d'un scénario. L'amélioration du confort thermique représente en effet l'enjeu principal dans la lutte contre l'ICU, dont les répercussions les plus néfastes sont avant tout d'ordre sanitaire (Heaviside et al., 2016 ; Paravantis et al., 2017). Ces conséquences résultant d'un couplage délétère entre ICU nocturne et températures excessives diurnes (Laaidi et al., 2012), il est par ailleurs primordial d'analyser l'effet des scénarios sur le confort thermique aussi bien de jour que de nuit. Cette section se consacre donc essentiellement à l'étude de l'impact des scénarios sur l'UTCI, la température de l'air étant uniquement utilisée dans la comparaison des résultats de MésO-NH/SURFEX et LASER/F à l'échelle d'une maille de simulation.

La figure 78 illustre l'impact des scénarios d'adaptation modélisés par MésO-NH/SURFEX sur la température de l'air de la maille qui contient la Presqu'Ile Malraux (cf. figure 44). En premier lieu, la végétalisation et l'augmentation de l'albédo conduisent toutes deux à une légère diminution de la variable (Figure 78, à gauche). D'une part, des valeurs élevées d'albédo réduisent en effet la quantité de rayonnement absorbé par les matériaux au cours de la journée, entraînant de facto une diminution du flux de chaleur dans le sol et donc un déstockage de chaleur amoindri durant la nuit (Santamouris, 2013 ; Errell et al., 2014). D'autre part, le remplacement de surfaces minérales par de la végétation permet non seulement de diminuer le stockage de chaleur, mais également de bénéficier du phénomène

d'évapotranspiration qui augmente le flux de chaleur latente (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003 ; Bowler et al., 2010).

À lui seul, le scénario *Végétation* entraîne ainsi une réduction de la température de l'air pouvant aller jusqu'à $-0,4^{\circ}\text{C}$ (Figure 78, à droite). L'augmentation de l'albédo et de l'émissivité du bâti au sein du scénario *VégAlbédo* accentue cet effet, la diminution maximale atteignant alors $-0,5^{\circ}\text{C}$. Même si l'ajout de matériaux réfléchissants permet dès lors de réduire la température de l'air de $0,1$ à $0,2^{\circ}\text{C}$ supplémentaires au cours de la journée, l'atténuation de la variable est donc essentiellement portée par la végétalisation. En outre, l'importante similarité des motifs des deux courbes de ΔT_{air} ($R^2 = 0,84$) montre que c'est la végétation qui contrôle la cinétique : les fractions initiales de surfaces bâtie et végétale étant respectivement de 23% et 19% dans la maille, l'augmentation de 20% de la part de végétation induit par les scénarios rend l'impact de cette dernière prédominant par rapport à celui de l'albédo.

En se basant sur ces résultats, force est de constater que la réduction de la température de l'air induite par l'application des deux scénarios reste relativement modérée : lors des deux premières nuits de la période d'étude, aucun des scénarios ne permet par exemple d'augmenter la durée pendant laquelle la variable se maintient sous le seuil des 20°C^{10} (Figure 78, à gauche). Néanmoins, dans une zone urbaine où l'ICU atteint des intensités pouvant dépasser 5°C (cf. figure 75 et annexe O), une diminution de plus de $0,4^{\circ}\text{C}$ représente tout de même une amélioration appréciable.

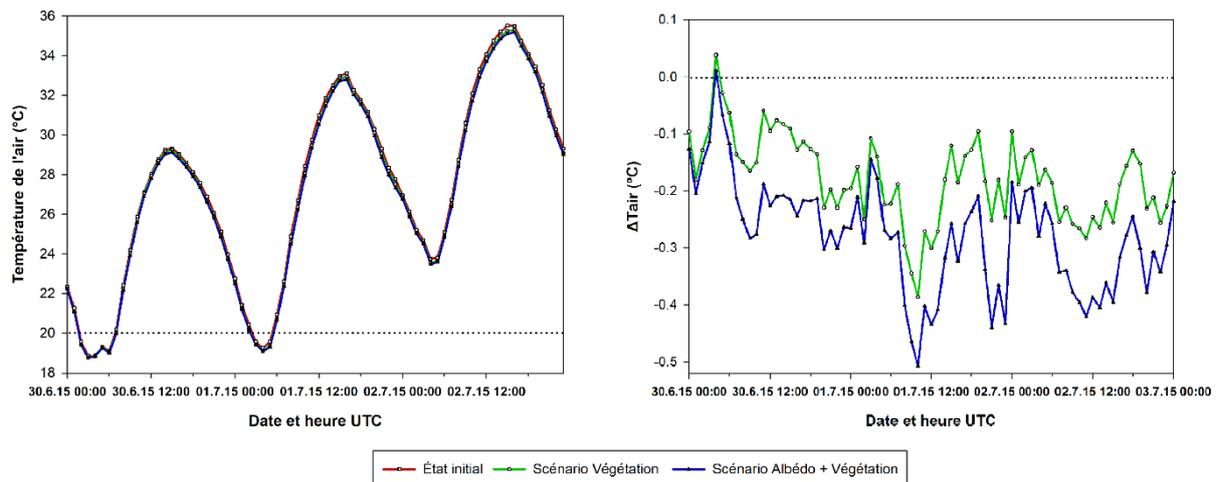


Figure 78 – Évolution de la température de l'air (à gauche) et des écarts horaires de température de l'air (à droite) entre l'état initial et les différents scénarios simulés par MésO-NH/SURFEX sur la Presqu'Ile Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Le constat est plus nuancé s'agissant de l'UTCI (Figure 79) : certes, le scénario *Végétation* engendre une diminution du stress thermique sur l'ensemble de la journée. Cette réduction de l'UTCI ne dépasse toutefois pas $-0,4^{\circ}\text{C}$ (Figure 79, à droite). Cependant, étant donné que le système MésO-NH/SURFEX ne simule pas l'ombre créée par la végétation haute (Goret, 2021), l'impact réel de ce scénario est très certainement sous-estimé par le modèle de méso-échelle. En période nocturne, l'application du scénario *VégAlbédo* renforce cet effet d'atténuation et permet de réduire l'UTCI de $0,1$ à $0,5^{\circ}\text{C}$ supplémentaires. Bien que modérées, de telles diminutions s'avèrent suffisantes pour à la fois réduire l'occurrence d'un niveau de stress thermique élevé et gagner une heure en plus de confort thermique au cours de la nuit du 1^{er} juillet (Figure 79, à gauche).

¹⁰ Sous nos latitudes, le maintien d'une température minimale nocturne au-dessus de 20°C définit une nuit tropicale et correspond au déclenchement de la vigilance Canicule (Météo France, 2020).

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

L'impact du scénario *VégAlbédo* diffère en période diurne : par rapport à la situation initiale, ce scénario induit en effet une augmentation de l'UTCI pouvant atteindre jusqu'à 1°C supplémentaire (Figure 79, à droite). Cette hausse suffit à entraîner une survenue précoce du niveau de stress thermique modéré en matinée (Figure 79, à gauche). Une telle diminution du confort thermique diurne n'est pas observée lors de l'application du scénario *Végétation* : elle résulte donc uniquement de l'augmentation de l'albédo des bâtiments. Celle-ci entraîne en effet une hausse du rayonnement réfléchi par les murs, et par conséquent une augmentation du rayonnement reçu par les piétons, ce qui les expose à un stress thermique accru. Mis en évidence au sein de nombreux autres travaux (Erell et al., 2014 ; Lee et al., 2016 ; Mohammad et al., 2021), cet effet montre que l'impact positif d'un scénario sur la température de l'air peut tout de même être contrebalancé par ses répercussions négatives sur le confort thermique.

L'impact préjudiciable des matériaux réfléchissants sur le confort thermique diurne tend néanmoins à s'amenuiser au fil des jours. À l'opposé, le potentiel d'atténuation de l'UTCI nocturne augmente au fur et à mesure de la période, jusqu'à atteindre près de -0,8°C au début de la nuit du 2 juillet 2015. Cette baisse progressive du stress thermique diurne pourrait potentiellement s'expliquer par une légère diminution du rayonnement solaire incident au cours de la période d'étude (courbes disponibles en annexe I).

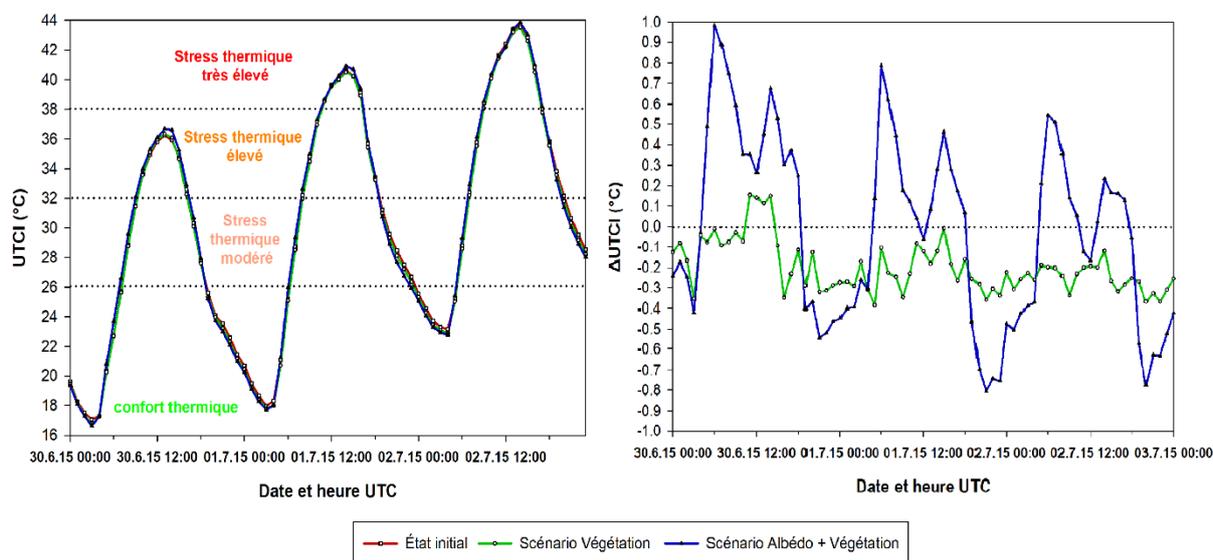


Figure 79 – Évolution de l'UTCI (à gauche) et des écarts horaires d'UTCI (à droite) entre l'état initial et les différents scénarios simulés par Mésos-NH/SURFEX sur la Presqu'île Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Les résultats obtenus à l'aide de Mésos-NH/SURFEX sur une maille de 100 m par 100 m laissent entrevoir l'effet de la végétalisation et des matériaux réfléchissants sur le stress thermique et la température de l'air à l'échelle d'un quartier. Il est à présent nécessaire de s'assurer que les résultats du modèle microclimatique LASER/F sont en accord avec ceux du modèle mésoclimatique à l'échelle qu'ils ont en commun. Par ailleurs, le fait que Mésos-NH/SURFEX ne reproduise ni la géométrie 3D, ni l'ombre procurée par les arbres, limite l'accès à certaines informations et ne permet pas d'estimer de manière précise l'impact réel des solutions d'atténuation employées. Au-delà de vérifier la cohérence entre les deux modèles, la comparaison des résultats de Mésos-NH/SURFEX et LASER/F vise donc également à estimer dans quelle mesure l'utilisation de la micro-échelle fournit des précisions supplémentaires sur l'impact de scénarios d'adaptation.

La figure 80 représente l'effet des scénarios modélisés par LASER/F sur la température de l'air. Sans surprise, on observe le même comportement de la variable que celui déjà exposé pour Mésos-NH/SURFEX (cf. figure 78) : la végétalisation et l'utilisation de matériaux réfléchissants permettent

toutes deux de diminuer la température de l'air, et ceci d'autant plus lorsqu'elles sont combinées. Néanmoins, à l'image des résultats obtenus par Méso-NH/SURFEX, les écarts entre cas initial et scénarios simulés par LASER/F restent très faibles (Figure 80, à gauche) : ils se situent en effet entre $-0,25$ et $0,05^{\circ}\text{C}$ (Figure 80, à droite), soit du même ordre de grandeur que ceux simulés par le modèle mésoclimatique qui sont quant à eux compris entre $-0,5$ et $0,05^{\circ}\text{C}$. Ces résultats mettent donc en évidence la cohérence entre les simulations du modèle LASER/F et celles du système Méso-NH/SURFEX.

Quelques différences subsistent toutefois entre modèles mésoclimatique et microclimatique. À micro-échelle, les scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* entraînent ainsi une réduction maximale de température d'environ $-0,2^{\circ}\text{C}$, soit une atténuation deux fois moins importante que celle obtenue à méso-échelle pour ces mêmes scénarios. Cet impact réduit sur la température de l'air résulte de la végétalisation plus faible dans LASER/F, celle-ci ayant dû en effet être adaptée à la morphologie de la Presqu'île Malraux et à la présence de voiries (routes et trottoirs).

À l'opposé, l'application du scénario *Albédo* montre que l'effet des matériaux réfléchissants ne varie quasiment pas d'un modèle à l'autre : l'impact de ce scénario uniquement modélisé par LASER/F est effectivement compris entre $-0,2^{\circ}\text{C}$ et $0,2^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond plus ou moins à la différence entre les scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* simulés par Méso-NH/SURFEX. Ce constat n'est pas étonnant, étant donné que la fraction de bâti est la même pour SURFEX que pour LASER/F (cf. 3.2.1.2).

Le scénario *Albédo* entraîne également l'occurrence de ΔT_{air} positifs allant jusqu'à $0,2^{\circ}\text{C}$ et se produisant aux alentours de 16h TU. Il s'agit effectivement du moment où la façade ouest du bâtiment de la Presqu'île Malraux est pleinement éclairée (cf. figure 77). Même s'il est aussi associé à une hausse du pouvoir réfléchissant des matériaux, le scénario *VégAlbédo* ne présente pourtant pas de ΔT_{air} aussi élevés : ce scénario implique en effet la présence de quelques arbres supplémentaires situés dans l'axe du bâtiment (cf. figure 77), et qui font donc légèrement obstacle au rayonnement solaire. Ces informations ne sont pas accessibles à méso-échelle, le modèle Méso-NH/SURFEX ne tenant compte ni de la géométrie réelle de la zone, ni de l'ombre créée par les arbres. Ces différences inter-modèles contribuent ainsi à illustrer la complémentarité des deux approches.

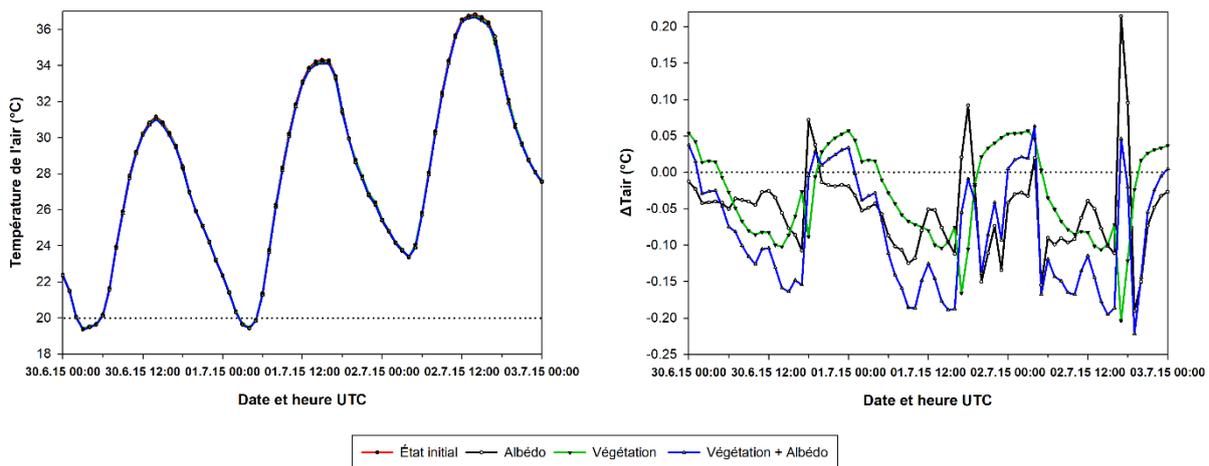


Figure 80 – Évolution de la température de l'air (à gauche) et des écarts horaires de température de l'air (à droite) entre l'état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F sur la Presqu'île Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

L'effet des scénarios modélisés par LASER/F sur l'UTCI rejoint celui déjà constaté pour les simulations avec Méso-NH/SURFEX (Figure 81) : tous les scénarios entraînent ainsi une légère réduction de l'UTCI nocturne, tandis que ceux associés à l'utilisation de matériaux réfléchissants

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

conduisent à une aggravation du stress thermique diurne. En outre, les Δ UTCI se situent entre $-0,3$ et $0,6^\circ\text{C}$ pour le modèle de micro-échelle, et entre $-0,8$ et 1°C pour celui de méso-échelle : là encore, les résultats obtenus par LASER/F s'avèrent donc être cohérents avec ceux de Méso-NH/SURFEX.

À l'instar de ce qui a été montré pour la température de l'air, les impacts des scénarios sur l'UTCI sont donc plus prononcés pour Méso-NH/SURFEX que pour LASER/F. Cela s'explique essentiellement par la végétalisation plus importante effectuée à méso-échelle : le scénario *Végétation* modélisé par Méso-NH/SURFEX conduit ainsi à une diminution maximale de l'UTCI atteignant $-0,4^\circ\text{C}$, soit deux fois plus que celui simulé par LASER/F. En outre, l'effet du scénario *VégAlbédo* sur l'UTCI nocturne ne dépasse pas $-0,15^\circ\text{C}$. Il se révèle ainsi nettement plus faible que celui modélisé par Méso-NH/SURFEX, qui peut atteindre jusqu'à $-0,8^\circ\text{C}$. Cette différence provient certainement de l'importante réduction de la surface occupée par la voirie dans le modèle mésoclimatique, suite à son remplacement par de la végétation herbacée. Les trottoirs et routes étant constitués de matériaux à faible pouvoir réfléchissant comme le béton ou l'asphalte, elles emmagasinent davantage de chaleur que les matériaux réfléchissants dont sont constitués les bâtiments. Or ces derniers renvoient une partie du rayonnement réfléchi vers la surface : les routes laissées en l'état de LASER/F situées à proximité du bâti vont donc accumuler une quantité plus importante de chaleur qu'elles déstockeront la nuit, limitant le potentiel des scénarios *Albédo* et *VégAlbédo* modélisés à l'échelle microclimatique. Cette hypothèse permet également d'expliquer pourquoi le scénario *VégAlbédo* de Méso-NH/SURFEX présente un plus faible impact sur les mailles de l'agglomération ayant une forte proportion de routes (Goret, 2021).

Enfin, quel que soit le scénario considéré, on peut également noter que les valeurs de l'UTCI diffèrent légèrement entre Méso-NH/SURFEX et LASER/F (Figure 81, à gauche) : l'indice de confort simulé par LASER/F est en effet systématiquement plus élevé au plus fort de la journée, tandis qu'il est plus prononcé pour Méso-NH/SURFEX en période nocturne (cf. figure 79). Ces différences inter-modèles ont été traitées au cours du chapitre précédent et s'expliquent essentiellement par le comportement de la TMRT et de la température de surface (cf. chapitre 2.2.2.2 et annexe N).

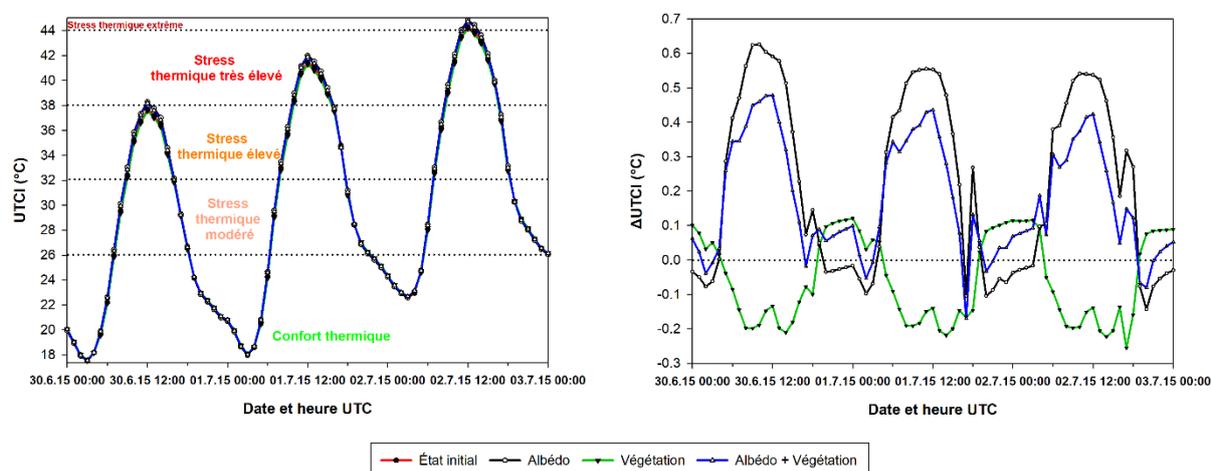


Figure 81 - Évolution de l'UTCI (à gauche) et des écarts horaires d'UTCI (à droite) entre l'état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F sur la Presqu'île Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

À l'issue de cette analyse, il semble possible d'affirmer que d'une part, à l'échelle d'une maille de simulation, Méso-NH/SURFEX et LASER/F obtiennent des résultats **similaires** et **cohérents**. D'autre part, même si des différences subsistent entre les deux modèles, elles sont essentiellement dues aux caractéristiques propres à la méso-échelle et à la micro-échelle, illustrant de ce fait la **complémentarité** entre Méso-NH/SURFEX et LASER/F.

Les résultats exposés dans cette partie rejoignent ceux obtenus au sein de nombreuses autres études mettant en évidence le rôle positif de la végétation sur la température de l'air ou le confort thermique (Bowler et al., 2010 ; Martins et al., 2016 ; De Munck et al., 2018), sur la dégradation du confort thermique diurne occasionnée par une hausse de l'albédo (Alchapar & Correa, 2016 ; Mohammad et al., 2021), ou encore sur le potentiel d'atténuation renforcé des stratégies impliquant une combinaison des matériaux réfléchissants et de la végétalisation (Wang et al., 2016 ; Salata et al., 2017 ; Fahed et al., 2020). Ils permettent déjà d'émettre plusieurs préconisations concernant la mise en place de solutions d'atténuation de l'ICU et du stress thermique.

Avant tout, l'utilisation de scénarios impliquant une hausse de l'albédo démontre que l'effet d'une mesure d'adaptation ne sera pas forcément le même en fonction de la variable qu'on cherche à atténuer. Les solutions induisant une réduction de la température de l'air ne conduisent ainsi pas nécessairement à une amélioration du confort thermique, et inversement. Bien que la température de l'air définisse le phénomène d'ICU, cette variable ne suffit cependant absolument pas à traduire l'ambiance climatique ressentie au sein d'un lieu donné, et donc le confort thermique extérieur. Ce dernier constitue l'enjeu majeur de lutte contre l'ICU nocturne et les pics de chaleur diurnes : il est de ce fait recommandé de combiner les solutions impliquant une atténuation du stress thermique avec celles entraînant une réduction de la température de l'air, en priorisant toutefois les mesures qui permettent de diminuer l'UTCI.

Par ailleurs, l'ambivalence de certaines solutions se manifeste également en fonction du moment de la journée : certaines mesures n'auront effectivement pas le même effet en période diurne que nocturne. C'est notamment le cas de l'utilisation de matériaux réfléchissants, qui peuvent exacerber le stress thermique diurne tout en réduisant la température de l'air nocturne. Lors de la mise en place de solutions d'atténuation, il y a donc nécessité de parvenir à un compromis améliorant au possible le confort thermique aussi bien diurne que nocturne, par exemple en limitant éventuellement la mise en place de matériaux réfléchissants au niveau de façades situées le long de rues très piétonnes.

Parmi les différentes mesures d'atténuation éprouvées au sein de cette section, la végétation apparaît comme ayant systématiquement un impact positif, tant sur la température de l'air que sur le confort thermique extérieur. En outre, elle présente l'avantage d'atténuer ces deux variables aussi bien en journée qu'en période nocturne, ce qui fait d'elle une mesure pouvant être envisagée partout à partir du moment où les caractéristiques morphologiques et l'usage de la zone considérée le permettent.

Enfin, il convient de garder à l'esprit qu'aussi efficace qu'elle soit, toute solution finit par atteindre une certaine limite en termes d'atténuation du stress thermique ou de la température de l'air. Ceci est mis en évidence par Ng et al. (2012) et Ouyang et al. (2020) qui montrent qu'au-delà d'un certain seuil de couverture végétale arborée (fixé à 30% selon Ouyang et al., 2020), le potentiel d'atténuation de la végétation atteint son niveau optimal et n'augmente plus. Un exemple est présenté avec le scénario *VégAlbédo* modélisé par LASER/F : celui-ci induit une augmentation du pourcentage de surface végétale de la Presqu'île Malraux de 3,85% (cf. 3.2.1), ce qui aboutit à une diminution maximale de la température de l'air de 0,25°C. Le même scénario simulé par Méso-NH/SURFEX repose sur un ajout de végétation bien plus conséquent (+20 %) et conduit pourtant à une réduction maximale de 0,5°C seulement, soit un impact à peine doublé pour une végétalisation pourtant cinq fois plus importante.

Le fait que Méso-NH/SURFEX et LASER/F obtiennent des résultats similaires à leur échelle commune montre qu'il est désormais possible de faire suffisamment confiance au modèle microclimatique pour acquérir de nouvelles informations détaillées sur l'impact de scénarios d'aménagement, inaccessibles à méso-échelle car nécessitant l'intégration de la géométrie réelle en 3D des éléments urbains.

3.2.3. Impact des scénarios sur la variabilité spatiale du confort thermique à micro-échelle

L'utilisation de la température de l'air à elle seule ne présente aucun intérêt dans l'évaluation de l'impact des scénarios à micro-échelle sur le confort thermique : d'une part, l'expérimentation de terrain réalisée en 2021 sur le secteur Malraux a démontré que cette variable conservait des valeurs très homogènes à l'échelle d'un quartier (cf. chapitre 2.3.2.1). D'autre part, la détermination du confort thermique repose sur d'autres facteurs que la seule température de l'air, ceux-ci étant aussi bien climatiques que physiologiques. C'est pour ces raisons que l'impact des scénarios à l'échelle microclimatique sera uniquement évalué par le biais de l'UTCI au sein de cette section.

Les cartes de l'UTCI obtenues le 2 juillet 2015 à 13h TU pour chaque scénario mettent en évidence l'importante **variabilité diurne** de l'indice de confort au sein de la zone Malraux (Figure 82). En cette journée, la plus chaude de la période estivale caniculaire simulée, trois niveaux distincts de stress thermique sont ainsi atteints simultanément sur le site d'étude, allant du stress thermique élevé au stress thermique extrême. En outre, l'utilisation de la micro-échelle permet d'illustrer l'importante étendue de l'UTCI pour la maille Presqu'île : en effet, l'indice de confort se situe dans un intervalle compris entre 36°C et près de 49°C, là où Méso-NH/SURFEX ne fournit qu'une unique valeur d'UTCI de 43°C. Il convient cependant de préciser qu'en raison de l'attribution d'un type de LCZ à chaque maille en fonction de ses caractéristiques, il peut se produire des transitions assez abruptes et peu réalistes entre deux mailles voisines, constituant une des limites du modèle LASER/F.

L'impact respectif des différents scénarios ressort clairement sur ces cartes. Le scénario *Albedo* conduit ainsi à une exacerbation du stress thermique à proximité immédiate des bâtiments. Ceci est particulièrement visible au sein de mailles densément bâties comme Krutenau ou Neudorf (cf. figure 76). Au sein de ces secteurs, l'UTCI déjà extrêmement élevé peut dès lors augmenter jusqu'à 2°C supplémentaires, y compris au sein de zones auparavant relativement épargnées. Bordé d'arbres au houppier large et développé, le Quai des Alpes voit également l'UTCI se dégrader légèrement au niveau de sa partie située le plus à proximité du bâti. L'utilisation de matériaux réfléchissants apparaît donc ici particulièrement problématique : associée au mieux à une stagnation du stress thermique, au pire à son aggravation, l'application de ce scénario doit dans tous les cas impérativement éviter les rues et zones piétonnes très fréquentées.

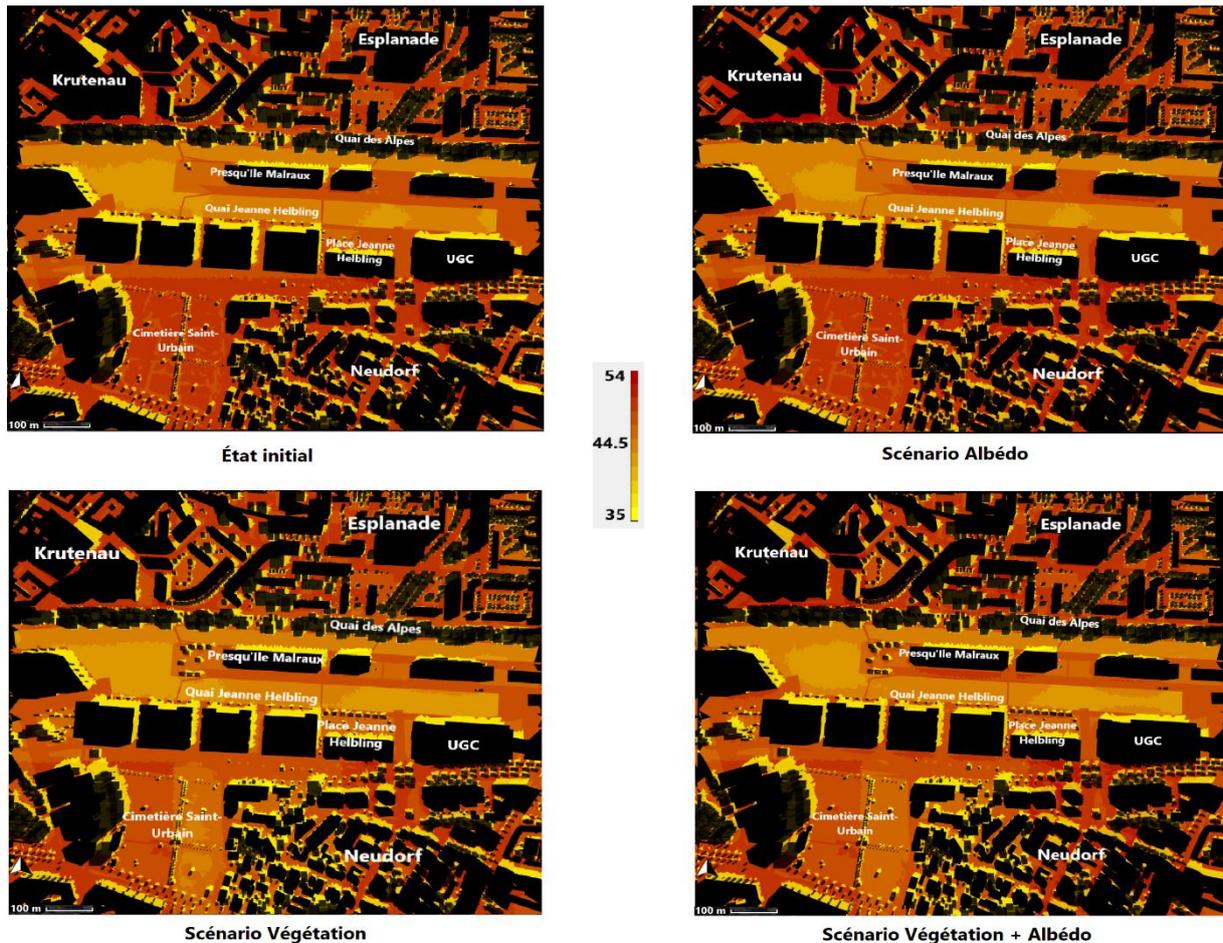


Figure 82 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 13h TU en fonction des quatre scénarios.

À l'opposé, les scénarios impliquant une végétalisation de la zone engendrent des améliorations localisées du confort thermique : l'ajout de végétation herbacée au niveau du cimetière Saint-Urbain et de la Place Jeanne Helbling (cf. figure 77) peut en effet réduire à lui seul l'UTCI de plus de 2°C. De par l'ombre qu'ils dispensent, les arbres plantés au sein de la place Jeanne Helbling et de la Presqu'île Malraux offrent quant à eux la possibilité de diminuer localement le stress thermique de près de 9°C, et de ce fait d'atteindre les plus bas niveaux d'UTCI de la zone. Ils permettent dès lors de créer une zone relativement épargnée par les plus hauts niveaux de stress thermique le long du quai Helbling et de la Presqu'île Malraux, améliorant nettement l'ambiance climatique d'une zone très fréquentée en période estivale en raison de ses nombreuses activités commerciales et culturelles.

L'effet des scénarios est nettement moins visible en **période nocturne**, bien que l'intervalle dans lequel se situe l'UTCI recouvre deux niveaux de stress thermique (Figure 83). À nouveau, le scénario *Albédo* génère une aggravation du stress thermique autour des bâtiments (cf. 3.2.2), dans une bien moindre mesure cependant qu'en période diurne : les canyons urbains des zones densément bâties voient ainsi l'UTCI y étant relevé augmenter d'environ 0,6°C. Néanmoins, le fait que ces secteurs soient essentiellement résidentiels implique d'éviter toute augmentation de l'UTCI, même minime, afin de préserver dans la mesure du possible le confort thermique nocturne des habitants.

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

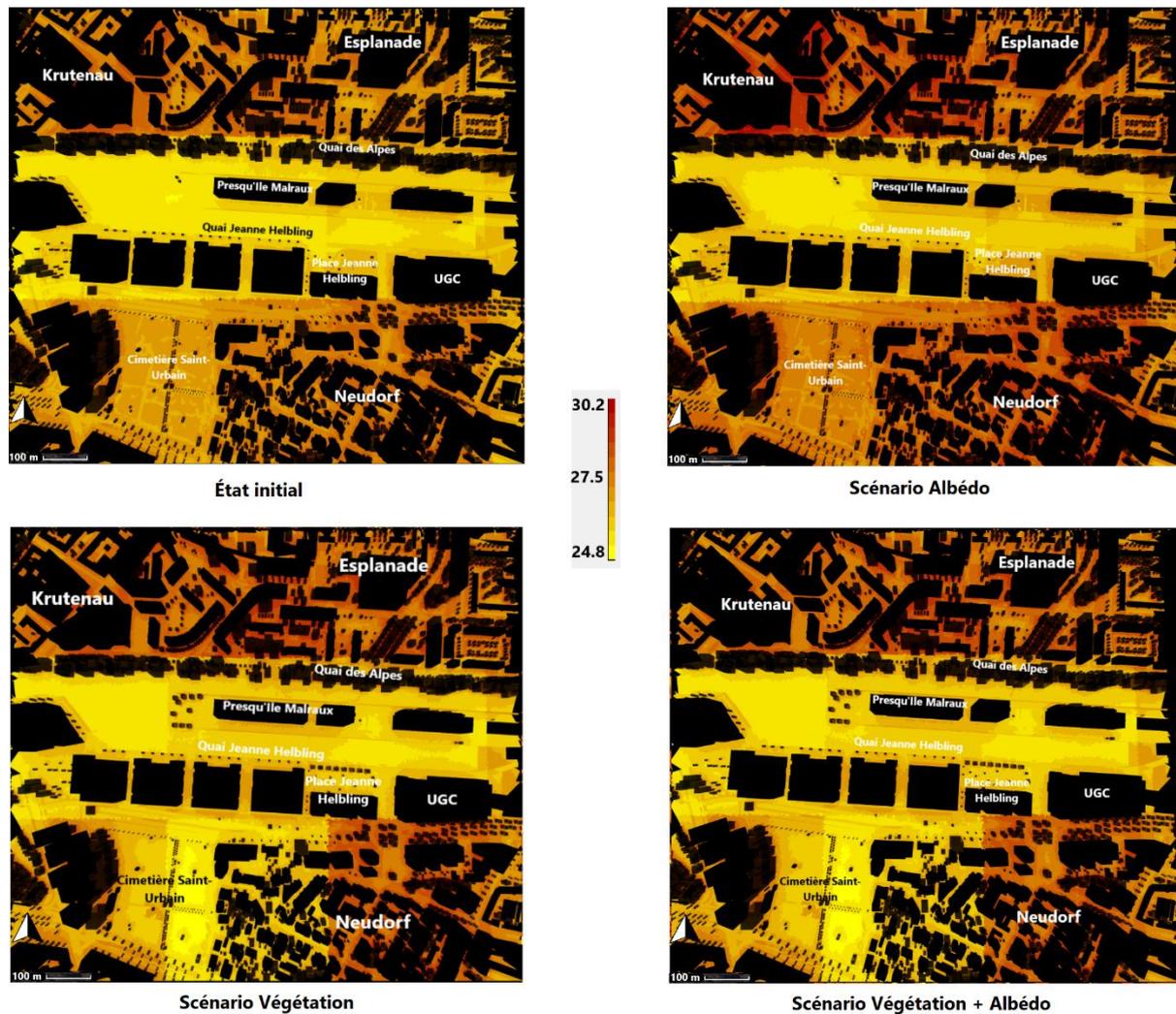


Figure 83 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 23h TU en fonction des trois scénarios d'adaptation.

L'impact de la végétalisation effectuée lors des scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* transparaît surtout au niveau des zones directement concernées par le verdissement. Malgré l'absence d'ombre portée et d'évapotranspiration en période nocturne, l'UTCI simulé au niveau du cimetière Saint-Urbain et de la Place Jeanne Helbling décroît d'environ 1 à 1,5°C par rapport à celui modélisé pour l'état initial et le scénario *Albédo*, offrant la possibilité de pouvoir atteindre localement l'état de confort thermique. Le faible emmagasinement de chaleur des surfaces végétales au cours de la journée permet effectivement de diminuer le flux de chaleur dans le sol, limitant par conséquent le déstockage nocturne. Ce constat tend à souligner le rôle important joué par la végétation herbacée, dont l'effet positif se manifeste ainsi aussi bien en période nocturne que diurne.

Bien que les effets respectifs des différents scénarios soient déjà nettement perceptibles à l'échelle de l'îlot ou de la rue, c'est en toute logique au niveau d'un point précis que leur impact sera le plus prononcé. La figure 84 montre ainsi l'évolution de l'UTCI sur l'ensemble de la période simulée pour les sites Helbling et UGC utilisés lors de la campagne de mesures présentée au sein du chapitre précédent (cf. figure 54 et chapitre 2.3.1).

Le site Helbling bénéficie pleinement du verdissement de la place réalisé dans le cadre des scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* (Figure 84, à gauche). L'ombre apportée par les arbres situés à proximité du site permet à ce dernier de diminuer l'UTCI de près de 5°C durant l'ensemble de l'après-midi, et par

conséquent de ne pas dépasser le niveau de stress thermique élevé au plus fort de la journée. Le potentiel d'atténuation du stress thermique diurne des scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* diminue tout de même progressivement au fur et à mesure de l'avancée de la période caniculaire. Cette baisse d'efficacité s'explique par l'assèchement progressif du sol durant la simulation : la pelouse surchauffe au soleil et est de moins en moins irriguée, entraînant une diminution du flux de chaleur latente, et par conséquent un amoindrissement du flux d'évapotranspiration et du pouvoir de régulation thermique associé. Pour que le potentiel de rafraîchissement de la végétation puisse s'exercer, il est de ce fait essentiel que cette dernière soit bien irriguée (Tsoka et al., 2018). S'agissant du scénario *Albédo*, la proximité de certains bâtiments au sud du site suffit à faire augmenter l'UTCI diurne et à l'exposer à un niveau de stress thermique très élevé dès le deuxième jour de la période estivale caniculaire. Néanmoins, ce scénario contribue également à une légère amélioration de l'UTCI nocturne, la réduction pouvant tout de même atteindre $-1,2^{\circ}\text{C}$. Le site Helbling reste sans doute trop éloigné des bâtiments pour subir des répercussions négatives sur le confort thermique de nuit.

Le site UGC est quant à lui beaucoup trop proche du bâtiment dont il porte le nom pour éviter l'impact néfaste des matériaux réfléchissants sur l'UTCI diurne (Figure 84, à droite). L'aggravation du stress thermique atteint ainsi $1,7^{\circ}\text{C}$ autour de midi. Étant donné que les environs du site ne sont que peu concernés par la végétalisation, le scénario *VégAlbédo* ne permet pas de contrebalancer autant l'effet négatif de la hausse de l'albédo sur l'UTCI que pour la station Helbling. Très fréquenté de par sa proximité avec le quai Helbling et le cinéma, le site de l'UGC représente ainsi un exemple où l'utilisation de matériaux réfléchissants s'avère peu profitable, l'impact sur le confort thermique nocturne demeurant quant à lui insignifiant.

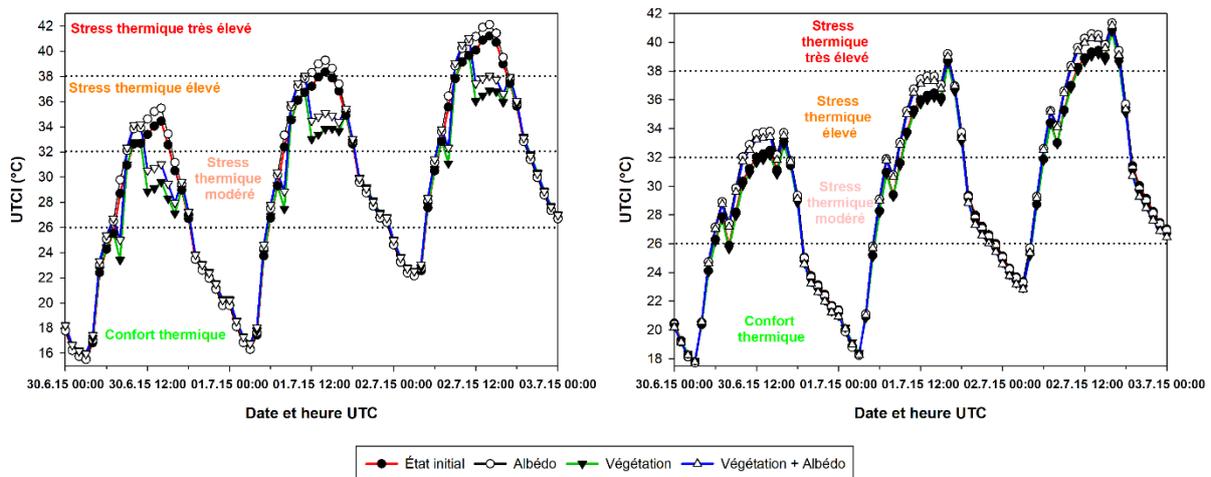


Figure 84 – Comparaison de l'UTCI simulé par LASER/F pour les sites Helbling (à gauche) et UGC (à droite) en fonction des quatre scénarios lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Une solution de remédiation efficace n'induit pas forcément d'atteindre un état de confort thermique en tout point d'une zone et à tout moment de la journée, cet objectif apparaissant irréaliste dans un contexte de vagues de chaleur de plus en plus longues, fréquentes et intenses. Dès lors, il s'agit plutôt de réduire au maximum la durée d'exposition d'un individu aux niveaux de stress thermique les plus élevés. C'est pourquoi il semble important de s'intéresser à ce critère pour estimer le potentiel d'une solution d'atténuation.

Les durées d'exposition horaires aux différents niveaux de l'UTCI des sites Helbling et UGC sont présentées au sein de la figure 85 pour l'ensemble de la période simulée. Pour le site Helbling (Figure 85, à gauche), l'application du scénario *Végétation* permet de gagner une heure de confort thermique supplémentaire, mais surtout de réduire de six heures la durée d'exposition au niveau de stress thermique très élevé au plus fort de la journée, ces dernières étant converties en heures de stress thermique élevé

3.2. Réalisation de scénarios d'adaptation à différentes échelles

ou modéré. Au contraire, le scénario *Albédo* entraîne non seulement la perte d'une heure de confort thermique, mais aussi une augmentation de quatre heures de la durée d'exposition à un stress thermique très élevé. C'est également ce scénario qui présente pour le site UGC l'effet le plus négatif (Figure 85, à droite), avec une perte d'une heure de confort thermique et l'augmentation de respectivement quatre heures de stress thermique élevé et une heure de stress thermique très élevé par rapport à la situation initiale au plus fort de la journée. En outre, l'ajout de végétation herbacée à proximité du bâtiment de l'UGC, effectué dans le cadre du scénario *Végétation*, permet tout de même d'y diminuer l'occurrence du niveau de stress thermique élevé de deux heures. Enfin, le scénario *VégAlbédo* présente des résultats intermédiaires, mais dont l'impact diffère en fonction de la station considérée : pour le site Helbling, son effet positif sur la durée d'exposition au stress thermique est ainsi légèrement inférieur à celui du scénario *Végétation* tandis que pour le site UGC, l'impact négatif résultant de la hausse de l'albédo du bâti est légèrement compensé par l'ajout de végétation.

Plus que le fait de parvenir à un confort thermique permanent, c'est donc bien la diminution de l'exposition aux niveaux les plus délétères de stress thermique qui semble être un objectif réaliste et atteignable dans le cadre de la mise en place de solutions de remédiation.

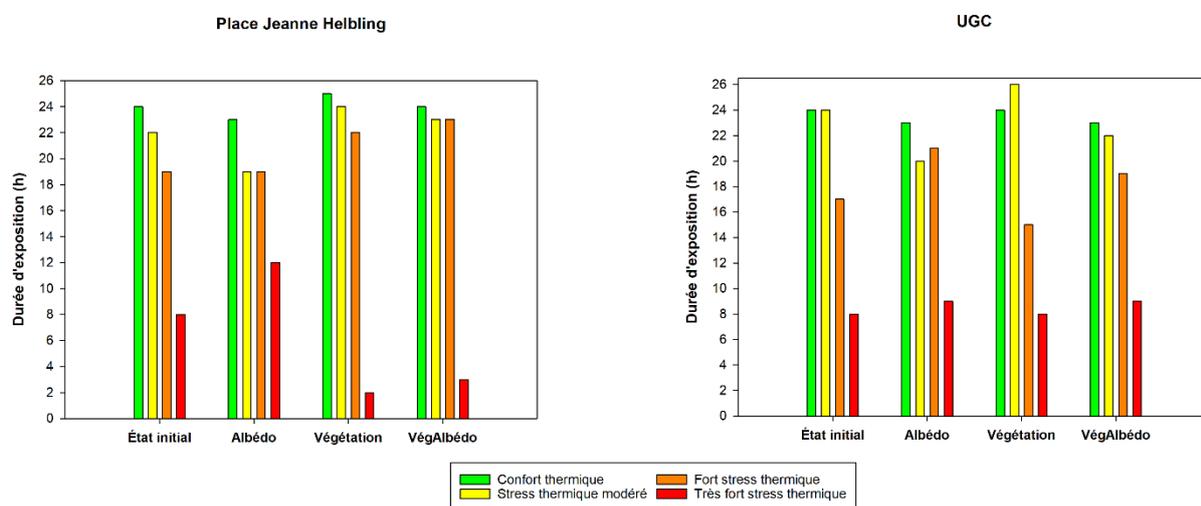


Figure 85 – Durées d'exposition horaires à chaque niveau de stress thermique pour les stations Helbling (à gauche) et UGC (à droite) sur la période du 30 juin au 2 juillet 2015 lors de l'application des différents scénarios.

Les résultats présentés au sein de cette partie consacrée à l'impact des scénarios à l'échelle microclimatique permettent d'établir de nouvelles préconisations, qui viennent s'ajouter à celles déjà émises dans la section précédente.

L'utilisation de matériaux réfléchissants sur les murs a des répercussions ambivalentes : d'une part, en limitant le stockage de chaleur en journée, et par conséquent son déstockage nocturne, elle contribue à atténuer l'ICU. D'autre part, cet impact positif est largement contrebalancé par les conséquences néfastes sur le confort thermique pédestre diurne. Par ailleurs, l'application du scénario *Albédo* n'a pas permis de mettre en évidence une amélioration significative du confort thermique nocturne. Cette solution trouve toutefois un intérêt à l'échelle du bâti : des études ont en effet démontré que les matériaux réfléchissants ont un effet positif sur la performance énergétique des bâtiments (Synnefa et al., 2007 ; Pisello, 2015), et sur le confort thermique intérieur des résidents (Zinzi, 2016 ; Kolokotroni et al., 2018 ; Goret, 2021 ; Salvati et al., 2022). Tous ces travaux, et notamment ceux réalisés par Météo France à l'aide du système Mésos-NH/SURFEX sur l'EMS (Goret, 2021), incitent à ne pas écarter cette mesure de remédiation. Dès lors, il convient surtout **d'éviter d'appliquer des matériaux réfléchissants sur les façades de bâtiments situés dans des rues très passantes ou des sites très fréquentés** : il conviendra alors de privilégier dans ces zones la mise en place de tels matériaux

au niveau des **toits**, pour lesquels plusieurs travaux ont déjà démontré que l'impact sur le confort thermique pédestre était négligeable (Taleghani et al., 2016).

La **végétalisation** présente assurément un **impact positif à toutes les échelles spatiales**, de celle du quartier à celle du bâti. Cependant, à l'instar d'autres travaux s'appuyant sur la télédétection (Ng et al., 2012 ; Ouyang et al., 2020), l'utilisation de la méso-échelle a montré qu'au-delà d'un certain seuil, son potentiel d'atténuation de la température de l'air et du stress thermique n'augmente plus. De ce fait, il s'agit de privilégier son implantation au niveau de voies passantes (comme le quai Helbling) ou de lieux de repos et de loisirs, comme les parcs urbains et les places. Les scénarios de végétalisation conduisent d'ailleurs à une amélioration appréciable de l'ambiance climatique de la place Jeanne Helbling, celle-ci étant actuellement essentiellement minérale et très peu végétalisée. L'application des scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* a montré que l'implantation d'arbres offre la possibilité de réduire d'au moins un niveau le stress thermique ressenti. Cependant, ces derniers restent très espacés et leurs couronnes respectives forment un couvert disjoint, empêchant la zone de bénéficier d'un ombrage continu. Il semble de ce fait essentiel d'implanter des arbres dont les couronnes sont suffisamment proches de manière à assurer un ombrage permanent lors des heures les plus chaudes de la journée.

Les différents scénarios éprouvés n'ont pas intégré de tests sur le rôle de l'eau dans la définition de l'ambiance climatique d'une zone urbaine. L'influence de l'eau sur le microclimat urbain reste toutefois mal comprise et les investigations menées dans le cadre de cette thèse ne permettent pas de trancher sur son impact sur le stress thermique. Néanmoins, lors du chapitre précédent, une station météorologique située à proximité d'une cascade artificielle a potentiellement permis de mettre en évidence un effet d'atténuation du stress thermique via la diffusion de vapeur d'eau (cf. 2.3.2.2). L'utilisation de brumisateurs pourrait ainsi possiblement atténuer le stress thermique ressenti, à l'image des conclusions obtenues par Ulpiani et al. (2019) et Di Giuseppe et al. (2021).

Enfin, les différents résultats mettent en avant la nécessité de tenir compte de la **notion d'usage** dans l'élaboration de préconisations opérationnelles. En effet, les zones commerciales et de loisirs comme le centre commercial Rivétoile, la Presqu'île Malraux ou le quai Helbling, sont très fréquentées en journée, mais n'accueillent qu'un nombre très restreint de résidents la nuit. Pour ces sites, se focaliser uniquement sur le confort thermique nocturne présente de ce fait un intérêt limité, tandis qu'atténuer le stress thermique diurne apparaît primordial. À l'opposé, les zones résidentielles comme les quartiers Esplanade, Krutenau et Neudorf sont essentiellement occupées en soirée. Pour ces sites, il semble alors essentiel de préserver le confort thermique nocturne, afin d'assurer aux habitants de bonnes conditions de récupération du stress thermique accumulé au cours de la journée. **Adapter les mesures de remédiation à l'usage du site** dont on cherche à améliorer l'ambiance climatique permet donc d'optimiser leur potentiel d'atténuation. Il semble toutefois important de rappeler qu'à l'image du secteur Malraux, beaucoup de zones urbaines sont **mixtes**, mêlant par conséquent des fonctions d'habitat, de commerces et de loisirs : dès lors, il est essentiel de conserver **l'objectif premier de trouver le meilleur compromis possible entre diminution du stress thermique diurne et amélioration du confort thermique nocturne**.

Les préconisations établies au sein de cette partie fournissent des pistes d'atténuation du stress thermique et de la température de l'air. Cependant, parallèlement à la lutte contre l'ICU, les zones urbaines doivent prendre en compte au sein de leurs politiques d'aménagement des enjeux urbanistiques. Or certaines de ces politiques, comme la densification urbaine, peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'ICU et le confort thermique. Il semble alors essentiel d'en évaluer l'impact afin de parvenir au meilleur compromis possible entre ces enjeux contradictoires.

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

La mise en place de solutions d'adaptation efficaces et opérationnelles n'est pas la seule problématique à laquelle sont confrontées les collectivités face à l'ICU et au stress thermique. Il s'agit également de limiter au possible l'impact de nouveaux aménagements urbains sur l'ambiance climatique tout en prenant en compte les besoins de production de logements neufs.

Ces dernières années, le rythme de la construction de logements s'est accéléré au sein de l'Eurométropole de Strasbourg afin de parvenir à l'objectif de production de 3 000 logements neufs par an sur l'ensemble du territoire, prévu dans le cadre du PLU voté en 2016 (EMS, 2021b). Dans un souci de lutte contre l'étalement urbain et l'artificialisation des sols, il est prévu d'atteindre cet objectif principalement par le biais de la densification urbaine. Or ce mode de construction tend à exacerber l'ICU nocturne (Coutts et al., 2007 ; Van Hove et al., 2015) : l'étude de l'ICU strasbourgeois réalisée lors du premier chapitre de cette thèse a d'ailleurs montré que les plus fortes intensités du phénomène se produisent essentiellement au sein des LCZ les plus densément bâties (cf. chapitre 1.3.1.3).

Face à ces enjeux contradictoires, la surélévation peut constituer un compromis intéressant (cf. 3.1.1). Ses conséquences sur l'ICU ont en effet déjà été évaluées (Straka & Sodoudi, 2019 ; Vukovic et al., 2019), et démontrent qu'elle aggrave nettement moins le phénomène que la densification horizontale¹¹ (Li et al., 2020). En outre, elle présente l'avantage de pouvoir construire sans artificialiser de surfaces naturelles ou agricoles supplémentaires. Plusieurs métropoles européennes, comme Genève et Paris, ont ainsi désormais recours en partie à la densification verticale dans l'atteinte de leurs objectifs de production de logements (Bouchet-Blancou, 2020). La surélévation permettrait ainsi de concilier ces enjeux urbanistiques avec la lutte contre l'ICU, à condition toutefois qu'elle n'exacerbe pas significativement le stress thermique.

Il apparaît donc essentiel d'estimer dans quelle mesure une politique de surélévation impacte l'ICU et le confort thermique à l'échelle d'un quartier. C'est dans cet esprit que des scénarios impliquant une augmentation de la hauteur du bâti sont testés au sein de cette partie sur la zone Malraux à l'aide du modèle LASER/F. Après la description de leurs caractéristiques et des raisons ayant motivé leur mise en œuvre, leur impact est évalué à la fois sur la température de l'air et le stress thermique du site d'étude.

3.3.1. Présentation des scénarios et de leur contexte

Bien qu'elle soit désormais facilitée par la nécessité de production de logements neufs et les lois encadrant la densification urbaine (cf. 3.1.1), la surélévation obéit avant tout au règlement du PLU. C'est effectivement ce dernier qui fixe les hauteurs maximales des constructions, celles-ci pouvant fortement varier en fonction des caractéristiques du bâtiment concerné et du secteur dans lequel il se trouve. Par conséquent, l'outil VELUM¹² a été développé par le service Aménagement du Territoire et Projets Urbains (ATPU), dans l'objectif de répertorier les hauteurs maximales autorisées par le PLU au sein d'un quartier (Figure 86). De ce fait, cet outil permet de déterminer le potentiel de surélévation pour l'ensemble des bâtiments d'une zone urbaine de l'EMS. Comme l'illustre la figure 86, la zone Malraux présente d'importantes possibilités de surélévation, exceptions faites des quartiers Krutenau et Neudorf qui sont concernés par des enjeux patrimoniaux (cf. 3.2.1.1). Il semble alors intéressant d'analyser dans quelle mesure une surélévation généralisée du bâti de cette zone contribuerait à une potentielle exacerbation de l'ICU.

¹¹ Densification horizontale : mode de densification impliquant la consommation de terrains non bâtis, ces derniers pouvant déjà être artificialisés ou non.

¹² Dans le PLU, la hauteur maximale des constructions est fixée par ce qu'on appelle le plan de vélum.

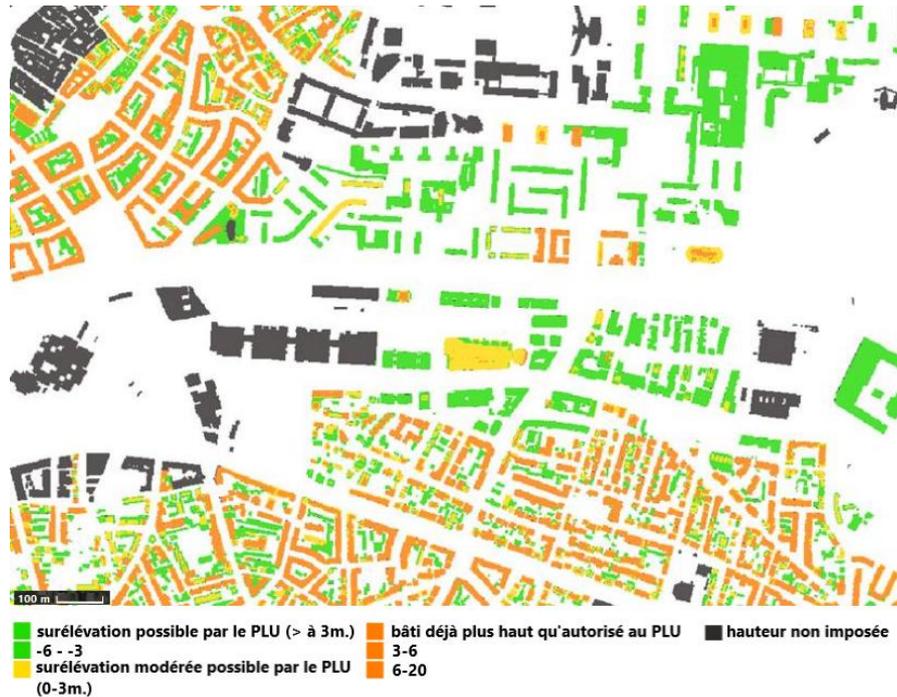


Figure 86 – Hauteur maximale réglementaire autorisée par le PLU pour l'ensemble des bâtiments composant la zone Malraux (Source : outil VELUM).

Trois scénarios ont été conçus dans le but d'évaluer l'impact de la densification verticale sur l'ICU et le stress thermique (Figure 87). Tout comme les scénarios modélisés précédemment, la situation météorologique choisie est la période caniculaire allant du 30 juin 2015 au 2 juillet 2015, et les simulations reposent sur le même forçage que celui employé au sein du chapitre 2 (cf. 2.2.2) et de la section précédente (cf. 3.2.1.2). Le premier scénario consiste à augmenter d'un étage supplémentaire, soit trois mètres de hauteur, l'ensemble du parc bâti de la zone Malraux, afin de vérifier si une surélévation modérée suffit à dégrader significativement l'ambiance climatique du site d'études.

Le deuxième scénario augmente la hauteur des bâtiments du site d'étude en se conformant strictement aux hauteurs réglementaires maximales fixées par le PLU pour la zone Malraux (cf. figure 86). À la différence du scénario précédent, tous les bâtiments du domaine de simulation ne sont donc pas concernés par une surélévation puisque le règlement du PLU impose de laisser en l'état une part importante du bâti des quartiers Krutenau et Neudorf. La hauteur des bâtiments pour lesquels aucune limite n'est imposée est automatiquement fixée à 60 mètres : cette valeur correspond en effet à la hauteur atteinte par les bâtiments les plus élevés du secteur Malraux. À travers ce scénario, il s'agit d'estimer dans quelle mesure la stricte application du règlement du PLU en termes de hauteurs maximales aggrave le phénomène d'ICU de la zone Malraux.

Enfin, le troisième scénario fixe à 60 mètres la hauteur de tous les bâtiments composant le domaine de simulation. Volontairement exagéré, ce scénario vise à déterminer un seuil au-delà duquel la surélévation constitue un risque majeur d'aggravation de l'ICU et du stress thermique. Les principales caractéristiques des scénarios sont résumées au sein du tableau 3.

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

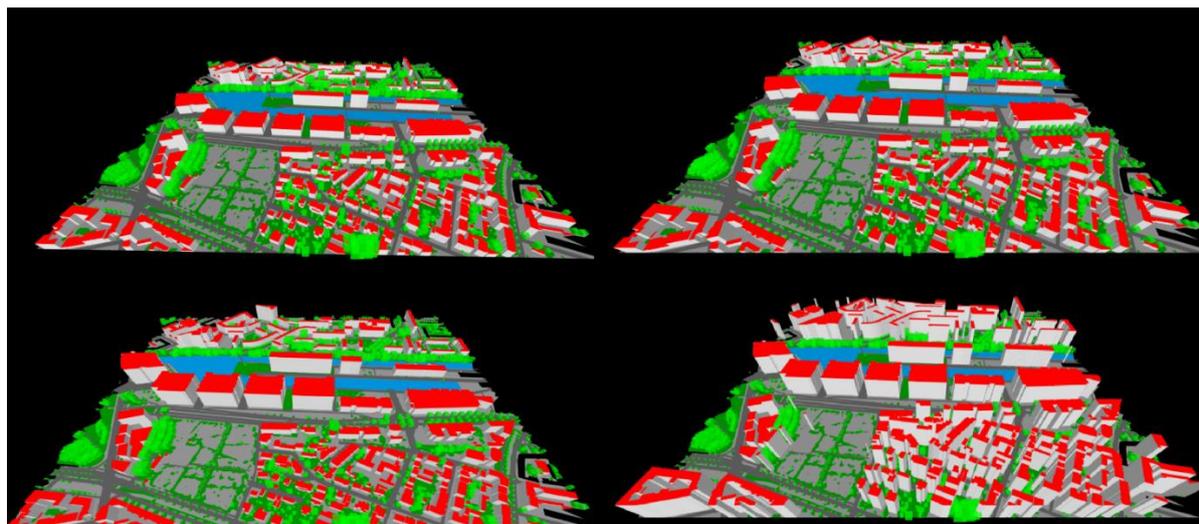


Figure 87 – Maquette 3D de la zone Malraux représentée par LASER/F selon les scénarios *État initial* (en haut à gauche), *Étage supplémentaire* (en haut à droite), *PLU* (en bas à gauche) et *60 m* (en bas à droite).

Scénario	Hauteur de bâti	Sky View Factor
<i>État initial</i>	Hauteur moyenne des bâtiments = 17,2 m	0,43
<i>Étage supplémentaire</i>	Ajout d'un étage supplémentaire, soit + 3 m à l'ensemble des bâtiments	0,41
<i>PLU</i>	Augmentation de la hauteur de chaque bâtiment de la zone Malraux au maximum autorisé par le PLU	0,40
<i>60m</i>	Hauteur de 60 m pour tous les bâtiments	0,28

Tableau 3 – Grandeurs modifiées dans le cadre des scénarios de densification verticale.

3.3.2. Impact des scénarios

À l'instar de ce qui a été réalisé dans l'évaluation des solutions d'atténuation (cf. 3.2.2 et 3.2.3), l'impact des scénarios de densification verticale est estimé à la fois sur l'indice de confort UTCI et la température de l'air. Certes, l'analyse de cette dernière ne permet pas à elle seule de se faire une idée sur l'effet de la densification sur l'ambiance climatique de la zone d'étude. Or la plupart des travaux portant sur ce mode de construction en étudient les conséquences sur l'ICU (Straka & Sodoudi, 2019 ; Vukovic et al., 2019), et par conséquent sur la température de l'air. Celle-ci est donc étudiée dans cette section afin de disposer d'un moyen de comparaison avec les analyses précédemment réalisées, mais aussi dans l'objectif de distinguer l'impact de la densification sur le phénomène d'ICU nocturne de celui sur le stress thermique diurne.

3.3.2.1. Effet de la densification verticale sur la température de l'air

L'impact des différents scénarios sur la température de l'air est illustré par la figure 88 pour la maille Neudorf, densément bâtie et essentiellement résidentielle (cf. figure 76). En premier lieu, force est de constater que le scénario *60 m* se démarque nettement des deux autres, dont les courbes de la température de l'air se confondent avec celle de l'état initial (Figure 88, à gauche). L'application du scénario *60 m* provoque ainsi une nette diminution de la variable en période diurne, alors qu'elle l'accroît au cours de

la nuit. Cette forte augmentation nocturne apparaît particulièrement problématique du fait qu'elle empêche la température minimale de descendre en-dessous de 20°C durant l'ensemble de la période, tandis que les trois autres scénarios permettent au moins de la maintenir sous ce seuil au cours des deux premières nuits. Deux nuits tropicales supplémentaires surviennent donc lors de l'application du scénario *60 m*, ce qui représente une aggravation considérable de la vague de chaleur et des conséquences sanitaires en découlant.

L'analyse des écarts de température souligne davantage encore le contraste entre le scénario *60 m* et les scénarios *Étage supp* et *PLU* (Figure 88, à droite). Ces derniers entraînent en effet une augmentation de la température de l'air nocturne très minime, ne dépassant pas 0,2°C. La température diurne reste quant à elle stable, voire diminue légèrement aux alentours de midi. L'effet quasiment nul du scénario *PLU* sur la maille Neudorf n'est pas étonnant, dans la mesure où les bâtiments présents au sein de ce secteur sont presque tous concernés par une interdiction de surélévation (cf. 3.3.1).

À l'opposé, les températures de l'air nocturnes modélisées par le scénario *60 m* présentent des valeurs pouvant dépasser de plus de 1,5°C celles obtenues pour la situation initiale. L'écart avec celle-ci est systématiquement positif dès 18h TU et jusqu'à 7h TU. Or dans cette zone, les résultats de la campagne de mesures INTERREG IV montrent que l'ICU nocturne atteint des valeurs déjà élevées : située à proximité d'un petit parc, la station météorologique Neudorf du réseau INTERREG IV est en effet la plus proche du domaine de simulation (cf. chapitre 1.1. et annexe A). L'intensité maximale moyenne de l'ICU y atteint près de 5°C lors de la période estivale de beau temps utilisée pour la réalisation de la cartographie du phénomène (cf. chapitre 1.3.2. et annexe E). L'augmentation de la température nocturne de 1,5°C engendrée par le scénario *60 m* aggrave donc nettement des intensités d'ICU déjà prononcées dans le secteur, d'autant plus que la station Neudorf en sous-estime sans doute l'intensité du fait de sa proximité avec un parc urbain. En revanche, ce scénario permet de diminuer la température de l'air jusqu'à -1,3°C à midi TU. Cette diminution résulte de l'augmentation de la profondeur des canyons urbains du secteur, qui contrarie la pénétration du rayonnement solaire dans les fonds de rue. Ces derniers se réchauffent donc beaucoup plus lentement que des canyons moins profonds et davantage éclairés en journée (Johansson, 2006).

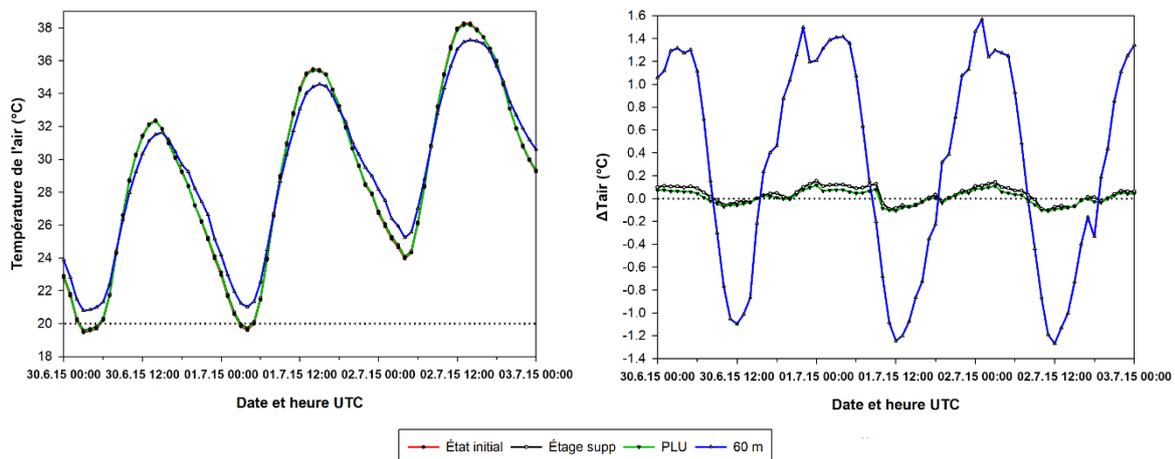


Figure 88 – Évolution de la température de l'air (à gauche) et de la différence de température de l'air (ΔT_{air}) entre l'état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Neudorf, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

L'impact des scénarios de densification verticale diffère légèrement pour la maille Presqu'île, moins densément bâtie que le secteur Neudorf (Figure 89). L'augmentation de la température de l'air nocturne engendrée par l'application du scénario *60 m* s'avère ainsi moins prononcée que celle qui avait été constatée pour la maille Neudorf (Figure 89, à gauche), même si la température minimale se maintient tout de même au-dessus du seuil de 20°C dès la deuxième nuit de la période simulée. Par ailleurs, les

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

écarts de températures nocturnes entre la situation initiale et le scénario *60 m* atteignent jusqu'à $0,85^{\circ}\text{C}$ (Figure 89, à droite), ce qui reste élevé pour une zone dont les intensités maximales d'ICU peuvent déjà atteindre 5°C , comme le montrent les graphiques de l'ICU relevé sur les stations de la campagne de mesures menée en 2021 à Malraux, présentés en annexe O. Le scénario *PLU* adopte ici des valeurs similaires à celles du scénario *60 m*, ce qui n'est pas surprenant étant donné que la plupart des bâtiments de la Presqu'île Malraux n'ont aucune limitation de hauteur imposée par le PLU et ont donc pu être presque tous augmentés à 60 m de haut (cf. figure 86). À l'image de ce qui avait été constaté pour la maille Neudorf, le scénario *Étage supp* n'entraîne quant à lui aucun changement significatif par rapport à la situation initiale, de jour comme de nuit, les valeurs maximales du ΔT_{air} n'atteignant même pas $0,1^{\circ}\text{C}$.

Contrairement à ce qui est observé en période nocturne, aucun des scénarios ne conduit à une atténuation de la température de l'air diurne pour la maille Presqu'île. Les écarts de température montrent même qu'elle peut atteindre jusqu'à $0,5^{\circ}\text{C}$ supplémentaire aux alentours de midi pour les scénarios *PLU* et *60 m* (Figure 89, à droite). Ce comportement tranche nettement avec celui qui avait été relevé pour la maille Neudorf (cf. figure 88), ainsi qu'avec les résultats d'autres travaux qui mettent en évidence une diminution de la température de l'air diurne lorsque le rapport H/W ¹³ d'un canyon urbain augmente (Taleghani et al., 2015 ; Abd Elraouf et al., 2022). L'analyse des températures de surface diurnes de l'ensemble des éléments constituant la maille montrent qu'elles sont plus basses lors de l'application des scénarios *PLU* et *60 m*, à l'exception notable de celles des routes qui augmentent par rapport à la situation initiale. Or, il convient de préciser que contrairement à la maille Neudorf, la Presqu'île Malraux est essentiellement composée de canyons orientés Nord-Sud, dont l'éclairement se produit généralement au plus fort de la journée (Fischer, 2001). Il est alors possible que l'augmentation de la hauteur de bâti de ce type de canyons génère une réflexion accrue du rayonnement vers le fond des rues, constituant un piège radiatif qui empêcherait de bénéficier de l'effet rafraîchissant associé à l'augmentation du rapport H/W .

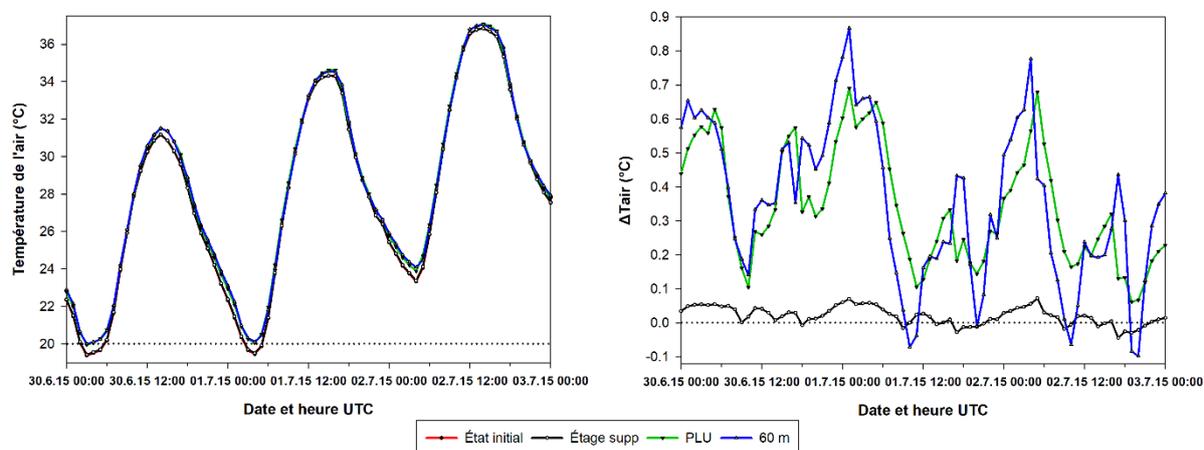


Figure 89 – Évolution de la température de l'air (à gauche) et de la différence de température de l'air (ΔT_{air}) entre l'état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Presqu'île, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Loin d'être homogènes, les effets de la surélévation du bâti sur la température de l'air dépendent donc à la fois de la période de la journée considérée, de l'ampleur de la densification opérée et de la géométrie de la zone concernée. L'augmentation de la hauteur des bâtiments n'aura ainsi pas les mêmes répercussions sur un secteur densément bâti comme Neudorf qu'au niveau d'une zone comme la Presqu'île Malraux. Au vu des résultats, il est néanmoins possible d'affirmer que le scénario *Étage supp*

¹³ Rapport H/W : indicateur géométrique correspondant au rapport entre la hauteur du bâti et la largeur de la rue constituant un canyon urbain. Une valeur proche de 0 équivaut à des bâtiments bas et à une rue large.

n'entraîne pas de conséquences majeures sur l'intensité de l'ICU, à l'instar de ce qu'avaient démontré [Straka & Sodoudi \(2019\)](#) lors de l'application d'une surélévation comprise entre 3 et 7 mètres. L'augmentation systématique de la température nocturne induite par le scénario *60 m* indique toutefois qu'au-delà d'un certain seuil, la densification verticale peut représenter un facteur d'aggravation significatif de l'ICU. Dès lors, on peut s'attendre à ce que le confort thermique nocturne soit également dégradé lors de l'application de ce scénario.

3.3.2.2. Conséquences sur le confort thermique

Étant donné que certains scénarios de densification verticale conduisent à une augmentation de l'intensité de l'ICU, il semble essentiel de vérifier dans quelle mesure la surélévation peut avoir des répercussions sur le confort thermique nocturne. L'analyse de l'évolution de l'UTCI nocturne de la maille Neudorf en fonction des différents scénarios mène à un constat similaire à celui émis pour la température de l'air (Figure 90) : les scénarios *Étage supp* et *PLU* présentent ainsi des valeurs extrêmement proches de celles obtenues pour la situation initiale et n'entraînent pas de dégradation significative du confort thermique (Figure 90, à gauche). À l'inverse, le scénario *60 m* conduit à des augmentations de l'UTCI nocturne pouvant aller jusqu'à 2,8°C (Figure 90, à droite). Cette hausse suffit à ne plus du tout atteindre l'état de confort thermique dès la troisième nuit de la période d'étude, ce qui s'avère particulièrement problématique pour une zone résidentielle comme le secteur Neudorf.

Par ailleurs, le comportement de l'UTCI diurne illustre toute l'ambivalence d'une forte surélévation en matière d'impact sur le confort thermique. Le scénario *60 m* se révèle ainsi être le seul permettant d'éviter l'occurrence du niveau de stress thermique extrême sur la quasi-totalité de la période simulée. L'apport d'ombre portée permet ainsi une diminution conséquente de la TMRT, principale variable régissant le comportement de l'UTCI et dont les variations sont essentiellement tributaires du rayonnement solaire ([Thorsson et al., 2014](#)). C'est d'autant plus appréciable que le potentiel d'atténuation de l'UTCI diurne se renforce au fur et à mesure de la période. Cette accentuation progressive peut éventuellement résulter d'une préservation du pouvoir rafraîchissant de la végétation herbacée grâce à l'ombre portée procurée par le bâti, qui évite ainsi à une part de la pelouse de griller au soleil.

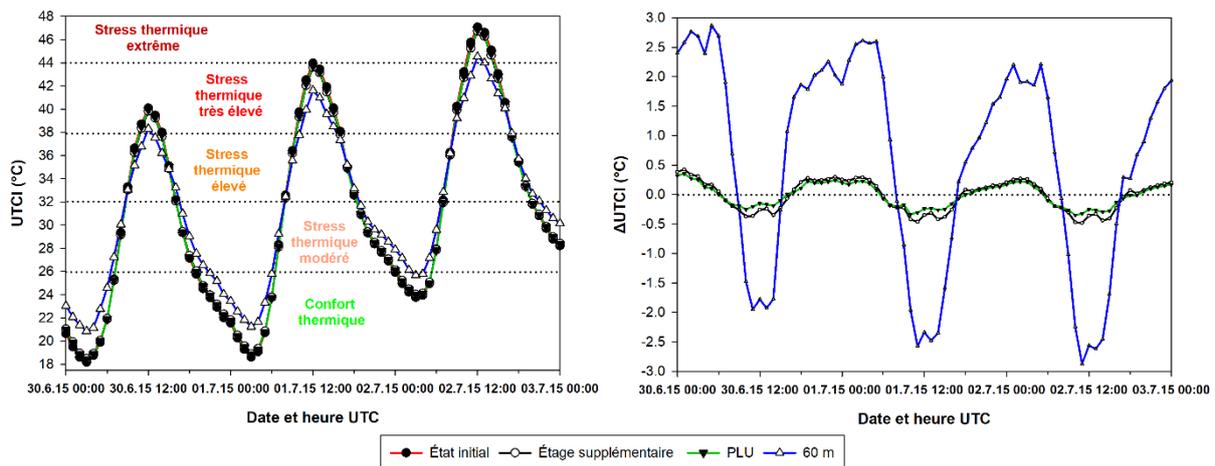


Figure 90 – Évolution de l'UTCI (à gauche) et de la différence d'UTCI (Δ UTCI) entre l'état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Neudorf, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Dans une moindre mesure que pour le secteur Neudorf, l'UTCI nocturne de la maille Presqu'île augmente également par le biais d'une importante surélévation (Figure 91). En effet, l'augmentation de l'UTCI nocturne générée par les scénarios ne dépasse pas 1,8°C (Figure 91, à droite). Bien que non

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

négligeable, cette hausse s'avère suffisamment modérée pour empêcher l'UTCI nocturne de monter d'un niveau supplémentaire de stress thermique durant l'ensemble de la période (Figure 91, à gauche). Tout comme pour la température de l'air, une des principales différences avec la maille Neudorf réside dans l'impact plus prononcé du scénario *PLU*, quasiment équivalent à celui du scénario *60 m* en raison de l'absence de limite réglementaire de surélévation pour la plupart des bâtiments de ce secteur.

Sans surprise, l'effet des scénarios sur l'UTCI diurne de la Presqu'île Malraux se révèle être le même que celui sur la température de l'air (cf. 3.3.1) : l'augmentation du volume bâti contribue ainsi à augmenter légèrement le stress thermique diurne. Bien que cet impact reste relativement modéré, il suffit tout de même à atteindre au plus fort des journées du 30 juin et du 2 juillet un niveau de stress thermique supplémentaire (Figure 91, à gauche). La mise en place d'une forte densification verticale se révèle ainsi particulièrement inappropriée pour la Presqu'île Malraux, n'améliorant ni le confort thermique nocturne, ni même son pendant diurne.

Parmi les différents scénarios éprouvés à l'échelle de la maille, le scénario *Étage supp* apparaît une fois de plus comme étant le seul à éviter dans tous les cas une modification significative de l'UTCI. L'application d'une surélévation exagérée, à l'image de celle représentée par le scénario *60 m*, contribue quant à elle à une dégradation du confort thermique nocturne aussi bien pour la maille Neudorf que pour la Presqu'île Malraux. Cependant, l'altération concerne particulièrement la maille Neudorf, plus densément bâtie : le scénario *60 m* correspond en effet à une nette diminution du SVF du domaine de simulation (cf. tableau 3), ce qui contrarie l'émission nocturne de rayonnement IR et de ce fait entrave le rafraîchissement du fond des rues (Wang & Akbari, 2014). L'extension de la zone ombragée, bien qu'ayant permis d'amoindrir la quantité de rayonnement solaire reçue en journée et par conséquent le stress thermique diurne, ne suffit ainsi pas à compenser les difficultés de refroidissement des surfaces survenant lors de la mise en place d'un canyon urbain plus profond.

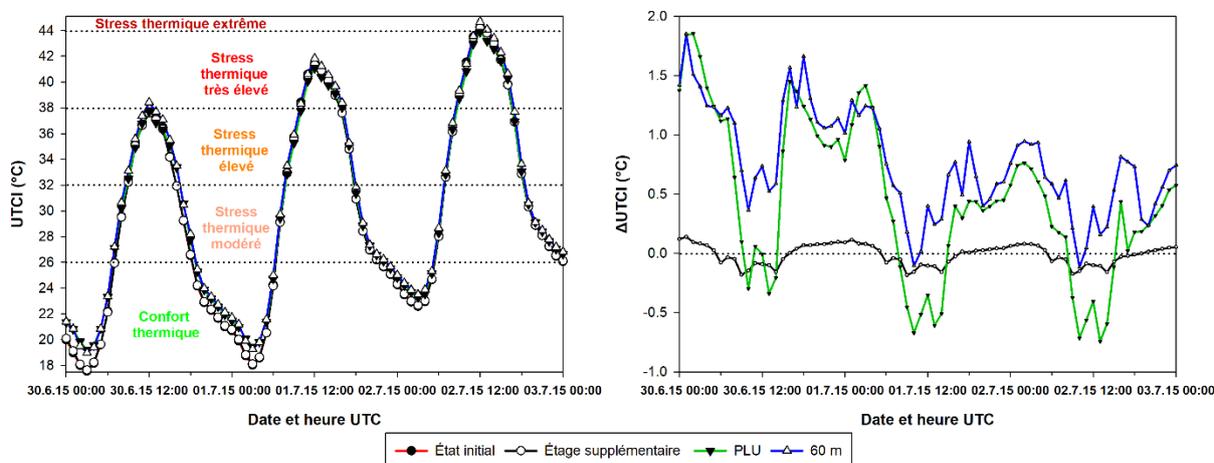


Figure 91 – Évolution de l'UTCI (à gauche) et de la différence d'UTCI (Δ UTCI) entre l'état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Presqu'île, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

À ce niveau de l'analyse, il est déjà possible d'affirmer que la surélévation ne peut être systématiquement associée à une amélioration ou une dégradation du confort thermique, et que son impact sur l'ambiance climatique dépend aussi bien de son ampleur que du moment de la journée considérée, ainsi que des paramètres morphologiques et d'occupation du sol propres à la zone sur laquelle elle est effectuée.

L'étude de la durée d'exposition aux différents niveaux de stress thermique sur l'ensemble de la période simulée met davantage encore en évidence les avantages et inconvénients propres à chaque

scénario (Figure 92) : les quartiers denses et résidentiels comme Krutenau et Neudorf sont par exemple beaucoup plus désavantagés par le scénario *60 m*, qui leur fait respectivement perdre six et sept heures de confort thermique, que la Presqu’île Malraux dont la durée d’exposition à ce dernier ne diminue que de deux heures. En outre, ce scénario entraîne une importante diminution du temps de confort pour la maille Esplanade tout en étant le seul à lui permettre d’éviter totalement la survenue du niveau de stress thermique extrême. Ce paradoxe montre bien la nécessité de prendre en considération l’impact d’un scénario sur l’ensemble de la journée avant de trancher sur son intérêt.

Le scénario *Étage supp* constitue quant à lui un cas particulier : il présente en effet l’avantage de ne presque pas modifier la durée d’exposition aux différents niveaux de l’UTCI par rapport à la situation initiale de l’ensemble des mailles. Il est cependant associé à une perte d’au moins une heure de confort thermique pour chaque secteur et ne permet jamais de réduire le temps passé aux plus forts niveaux de stress thermique. Or la mise en place d’une stratégie de densification verticale visant essentiellement à concilier la production de logements neufs avec la préservation de l’ambiance climatique existante, ce scénario semble tout de même être le meilleur compromis possible.

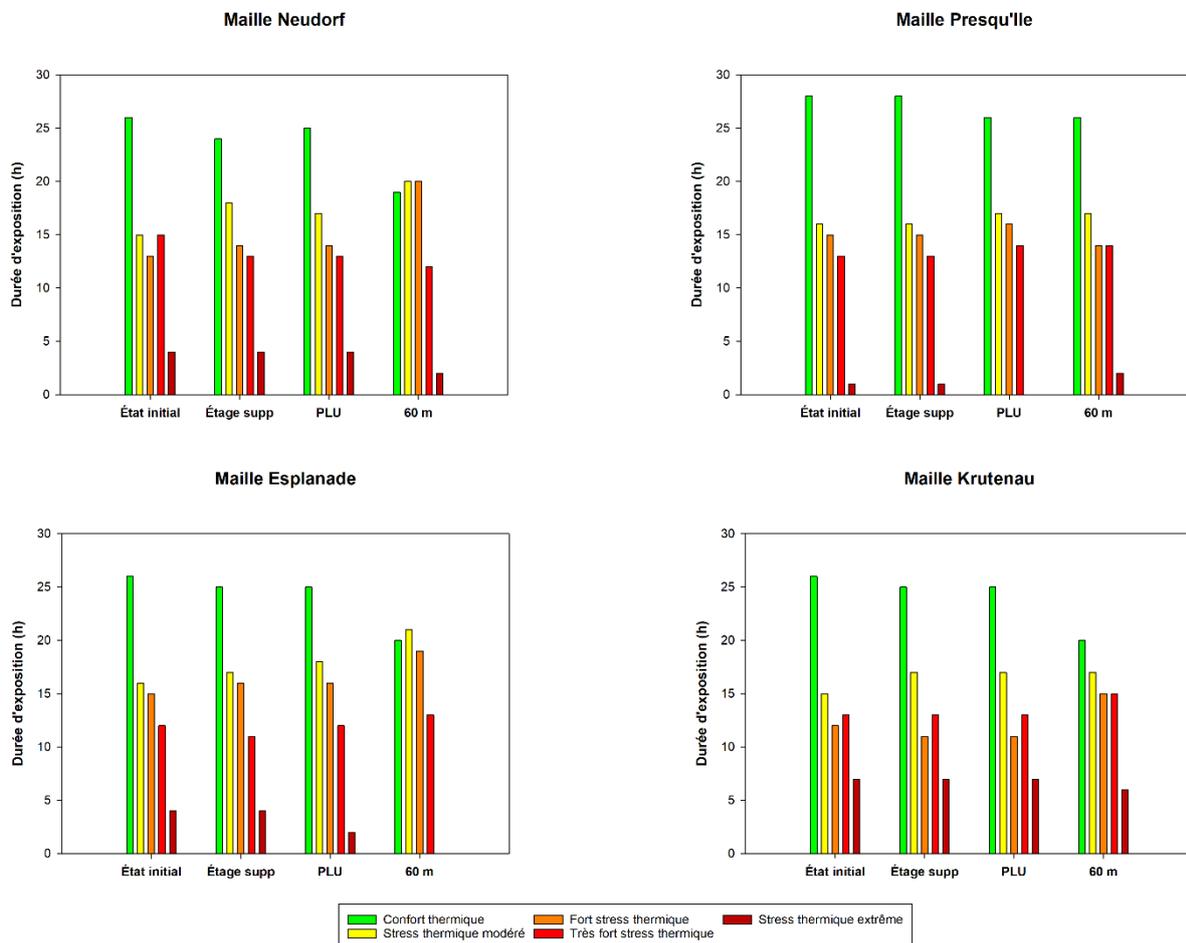


Figure 92 – Durées horaires d’exposition à chaque niveau de stress thermique pour les mailles Neudorf (en haut à gauche), Presqu’île (en haut à droite), Esplanade (en bas à gauche) et Krutenau (en bas à droite) durant la période du 30 juin au 2 juillet 2015 lors de l’application des différents scénarios.

L’analyse des différents scénarios à l’échelle de la maille permet déjà de se faire une idée sur l’impact de la surélévation au sein de quartiers présentant diverses morphologies et usages. Au vu de l’hétérogénéité de l’UTCI, il apparaît toutefois impossible de se contenter d’une évaluation de l’impact de la surélévation sur le confort thermique réalisée à cette échelle. Ceci est d’autant plus vrai lors de

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

l'application de scénarios impliquant une modification de la géométrie urbaine, dont l'UTCI est extrêmement tributaire.

Tout comme l'impact des solutions d'atténuation (cf. 3.2.3), les conséquences de la surélévation peuvent particulièrement modifier l'ambiance climatique d'un îlot, d'une rue ou d'une place, ce qu'illustrent bien les cartes de l'UTCI réalisées à 13h TU sur l'ensemble du domaine de simulation (Figure 93). En période diurne, l'impact des scénarios de densification verticale se manifeste principalement à travers l'expansion plus ou moins importante de la zone d'ombre portée du bâti. Si le scénario *Étage supp* ne parvient qu'à l'augmenter très partiellement, les scénarios *PLU* et *60 m* apparaissent quant à eux en mesure de provoquer un véritable changement d'ambiance climatique à l'échelle locale. L'exemple le plus probant est le quai Jeanne Helbling (cf. figure 76) : les deux scénarios le maintiennent tous deux presque totalement à l'ombre, ce qui offre la possibilité d'y diminuer l'UTCI de deux niveaux de stress thermique. De plus, le scénario *60 m* permet également de garder au frais la majorité de la place Jeanne Helbling. Même si l'étude de l'impact de la densification verticale vise avant tout à vérifier qu'elle n'aboutisse pas à une dégradation de la situation initiale, il semble intéressant de tenir compte de ces conséquences dans le choix d'appliquer ou non une surélévation au sein d'un secteur donné. Épargner au possible ces sites de l'occurrence de hauts niveaux de stress thermique représente en effet un enjeu majeur, puisqu'ils font assurément partie des zones les plus fréquentées de la zone Malraux.

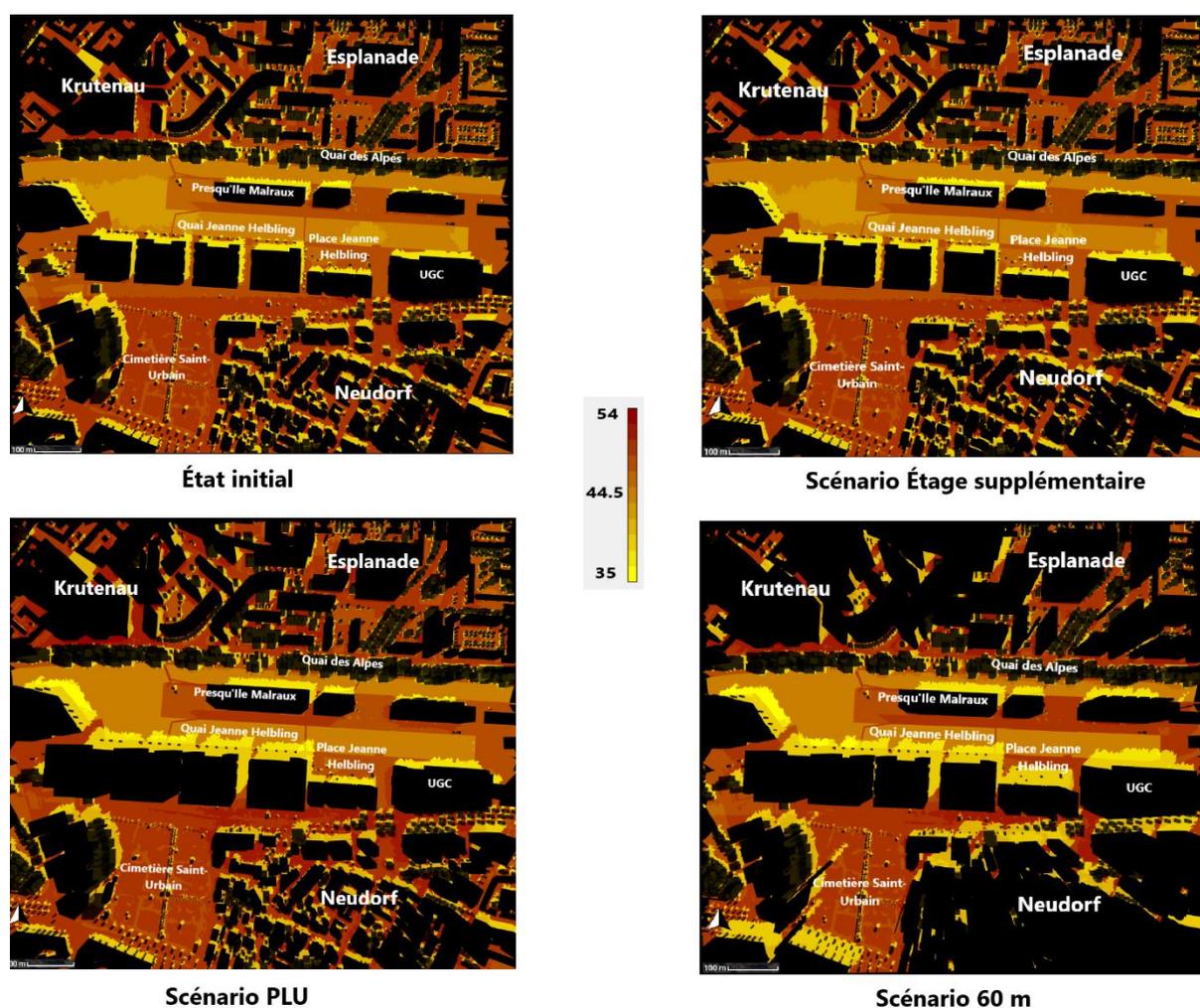


Figure 93 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 13h TU en fonction des trois scénarios de densification verticale.

Les répercussions des différents scénarios de surélévation sur l'UTCI nocturne ressortent tout autant à l'échelle locale (Figure 94). Durant la nuit, tous les scénarios sont de ce fait associés à une augmentation plus ou moins prononcée du stress thermique sur l'ensemble du domaine de simulation. Néanmoins, leur impact négatif sur le confort thermique nocturne transparait surtout au niveau des zones résidentielles densément bâties, comme le secteur Krutenau au nord-ouest et le quartier Neudorf au sud-est. À 23h TU, ces deux sites subissent ainsi des valeurs d'UTCI se rapprochant du niveau de stress thermique élevé. Au sein de zones d'habitation, de telles conditions apparaissent particulièrement néfastes du point de vue sanitaire puisqu'elles contrarient fortement la récupération physiologique, d'autant plus nécessaire après une journée caniculaire exposée à de très hauts niveaux de stress thermique. Avec les résultats précédents (cf. figures 90 et 91), ces cartes suffisent ainsi à écarter toute possibilité de compromis entre surélévation et préservation de l'ambiance climatique nocturne au sein des quartiers Krutenau et Neudorf.

L'analyse des cartes de l'UTCI nocturne montre également que le scénario PLU peut constituer un compromis relativement intéressant entre production de logements neufs et préservation de l'ambiance climatique locale. En évitant la surélévation du bâti des secteurs les plus denses, il contribue effectivement à ne pas dégrader de manière significative le confort thermique nocturne dans les zones les plus résidentielles, autrement dit là où il doit être préservé en priorité. Associé à l'amélioration du confort thermique diurne qu'il génère au niveau des sites les plus fréquentés en journée du secteur Malraux, il semble possible d'affirmer que ce scénario apparaît particulièrement prometteur.

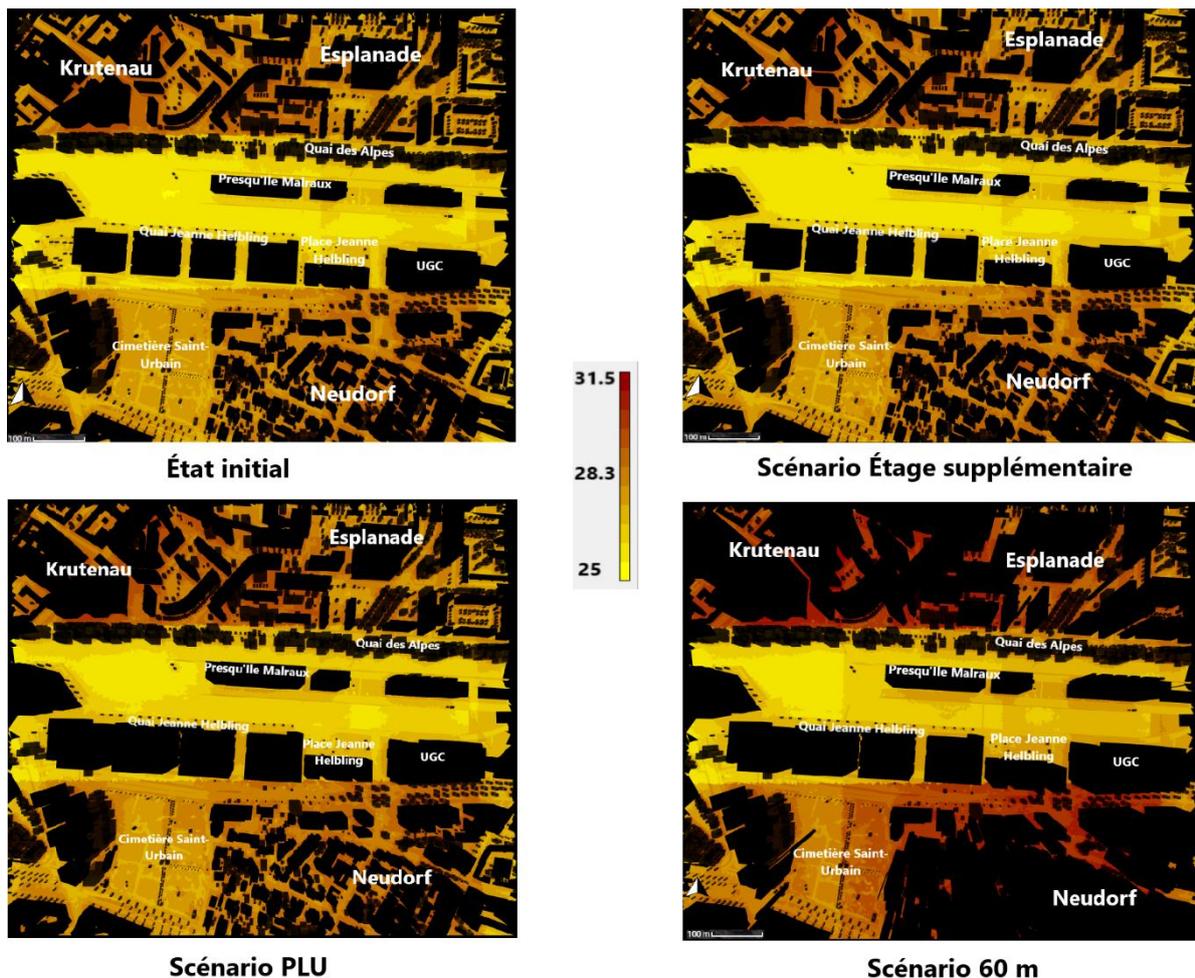


Figure 94 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 23h TU en fonction des trois scénarios de densification verticale.

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

L'évolution de la température de l'air et de l'UTCI de la Presqu'île Malraux en fonction des différents scénarios a également souligné l'importance du rôle que joue l'orientation d'un canyon urbain dans l'impact de la surélévation du bâti (cf. figures 89 et 91). Afin de mieux cerner l'influence de ce paramètre géométrique sur l'UTCI, des capteurs fictifs ont été disposés au milieu de quatre canyons du domaine de simulation, chacun d'orientation différente (Figure 95).



Figure 95 – Localisation des différents canyons sur le domaine de simulation. Le canyon d'orientation Nord-Sud est situé au niveau de la Presqu'île Malraux. Celui d'orientation Est-Ouest est localisé au sein du quartier Esplanade. Le canyon d'orientation NordEst-SudOuest se trouve à la Krutenau et celui d'orientation NordOuest-SudEst est situé dans le quartier Neudorf.

Exposés au sein de la figure 96, les résultats soulignent la nécessité de tenir compte de cet aspect lors de la mise en place d'une stratégie de surélévation : à l'instar de ce qui a déjà été montré pour l'ensemble de la maille Presqu'île, l'orientation Nord-Sud aboutit ainsi à un stress thermique particulièrement élevé aux heures les plus chaudes de la journée, moment où le soleil se situe dans l'axe de la rue (Figure 96, en haut à gauche). Or il s'agit également du type de canyon pour lequel l'impact des scénarios *PLU* et *60 m* sur le stress thermique nocturne est le plus modéré, l'augmentation de l'UTCI par rapport à la situation initiale atteignant en moyenne moins de 1°C durant les quatre nuits de la période simulée. En outre, l'orientation nord-sud induit une durée d'éclaircissement réduite, généralement entre 10h TU et 14h TU, permettant à la rue de bénéficier d'un accès à l'ombre durant une bonne partie de la journée en été (Nasrollahi et al., 2021). Ces faits expliquent pourquoi l'orientation Nord-Sud est plébiscitée par de nombreux travaux (Ketterer & Matzarakis, 2014 ; Chatzidimitriou & Axarli, 2017 ; Nasrollahi et al., 2021, Cárdenas-Jirón et al., 2023), malgré l'exposition accrue de la rue aux heures les plus chaudes. Cet accès renforcé à l'ombre couplé à l'impact réduit sur le confort thermique nocturne, y compris lors de l'application des scénarios de surélévation les plus exagérés, en fait une orientation pour laquelle il est possible d'appliquer une surélévation élevée du bâti sans trop de conséquences délétères sur l'ambiance climatique de la rue.

À ce niveau de l'analyse, il semble important de rappeler que la durée d'exposition au soleil d'un canyon ne dépend pas uniquement de son orientation, et relève également d'autres facteurs géométriques comme le rapport H/W. Cependant, l'éclaircissement d'une rue d'orientation Est-Ouest reste globalement plus long que celui d'un canyon orienté Nord-Sud (Boukhekhail & Bourbia, 2016). L'application des scénarios *PLU* et *60 m* au sein du canyon d'orientation Est-Ouest y aggrave ainsi nettement le stress thermique diurne (Figure 96, en haut à droite). Leurs répercussions s'avèrent particulièrement néfastes lors de la deuxième journée de la période simulée, puisque la durée d'exposition au stress thermique très

élevé y augmente de cinq heures. En outre, il s'agit du canyon pour lequel les conséquences de ces deux scénarios sur le confort thermique nocturne sont les plus exacerbées : l'UTCI associé au scénario *60 m* atteint des valeurs jusqu'à 3,1°C supérieures à celles des trois autres situations. À première vue, un tel constat devrait ainsi suffire à écarter toute surélévation de grande ampleur au niveau d'un canyon d'orientation Est-Ouest, d'autant plus dans une zone résidentielle majoritairement occupée à partir du début de soirée. Cependant, le canyon d'orientation Est-Ouest est aussi celui pour lequel l'UTCI atteint les niveaux de stress thermique diurnes les moins élevés parmi les quatre rues sélectionnées. Il s'agit en effet du seul canyon qui, quel que soit le scénario appliqué, évite la survenue du niveau de stress thermique extrême. On peut alors se demander s'il vaut alors mieux subir un stress thermique très élevé sur un intervalle de temps réduit, comme dans le cas d'un canyon d'orientation Nord-Sud, ou plutôt être exposé à un niveau de stress moins élevé mais sur un créneau horaire considérablement allongé. La réponse à cette question reste ouverte et dépendra notamment de l'usage et la fréquentation de la zone d'intérêt (cf. 3.2.3).

Le canyon d'orientation NordEst-SudOuest est celui pour lequel l'application du scénario *60 m* permet la plus forte réduction de stress thermique diurne puisqu'en augmentant les bâtiments bordiers, il contrarie davantage la pénétration du rayonnement solaire au fond de la rue. L'UTCI baisse ainsi de plus de 3°C au plus fort de la journée, évitant le niveau de stress thermique extrême en fin de période. Néanmoins, cet avantage est contrebalancé par la forte dégradation de l'UTCI nocturne, qui fait disparaître l'état de confort thermique dès la troisième nuit de la période. À l'opposé, le scénario *Étage supp* correspond ici à un compromis idéal entre surélévation et préservation du confort aussi bien diurne que nocturne. Il permet en effet de gagner une heure supplémentaire à l'ombre l'après-midi sans pour autant aggraver le stress thermique nocturne. Ce résultat illustre à lui seul tout le potentiel en termes de conciliation d'enjeux que peut représenter une densification verticale modérée, dans la mesure où beaucoup de canyons urbains strasbourgeois présentent une orientation NordEst-SudOuest.

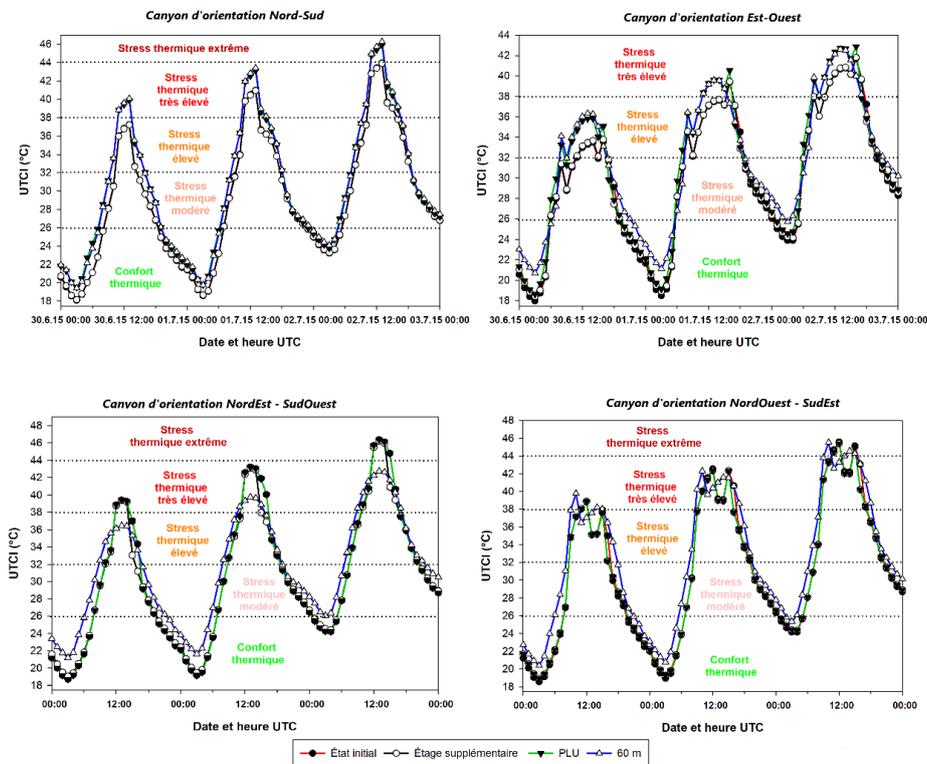


Figure 96 – Comparaison de l'UTCI simulé pour un canyon d'orientation Nord-Sud (en haut à gauche), Est-Ouest (en haut à droite), NordEst-SudOuest (en bas à gauche) et NordOuest-SudEst (en bas à droite), en fonction des trois scénarios pour la période du 30 juin au 2 juillet 2015.

3.3. Impact de la densification verticale sur l'ICU et le confort thermique

Enfin, les différents scénarios présentent des résultats assez homogènes pour le canyon d'orientation Nord-Ouest-Sud-Est (Figure 96, en bas à droite). On peut noter un léger déphasage du scénario *60 m* par rapport aux trois autres situations : à l'origine, le bâtiment ouest du canyon est plus bas de cinq mètres que l'immeuble situé du côté est. Or le scénario *60 m* fixe la hauteur de tous les bâtiments bordiers à 60 m, modifiant de ce fait la configuration du canyon. Son application conduit alors à un éclairage de la façade ouest survenant une heure plus tôt que pour les trois autres scénarios. Au-delà de l'orientation, il s'agit donc de prendre en compte dans la mise en place d'une densification verticale la configuration du canyon, qui détermine également à quel moment de la journée les pics de stress thermique diurne surviendront.

À partir de l'ensemble de ces résultats, il est possible d'émettre plusieurs préconisations au sujet des avantages et des inconvénients de la densification verticale. En premier lieu, force est de constater que la surélévation s'avère être un mode de construction pouvant dans certains cas représenter un compromis entre atténuation du stress thermique et nécessité de produire un nombre fixé de logements neufs annuels. Certains des scénarios éprouvés n'entraînent en effet quasiment aucune dégradation du confort thermique nocturne, et permettent même d'atténuer le stress thermique diurne.

L'application du scénario *60 m*, volontairement exagéré, montre cependant à elle seule que la densification verticale peut devenir délétère lorsqu'elle est appliquée sans aucune limite, et en particulier sur le stress thermique nocturne qu'elle contribue à exacerber. Dans tous les cas, cette solution doit donc être appliquée au cas par cas après avoir été évaluée par le biais de la modélisation numérique, et ne pas dépasser un certain seuil. En plus des résultats issus des études déjà menées sur l'impact de la densification verticale sur l'ICU (Straka et al., 2019 ; Vukovic et al., 2019), la mise en place du scénario *Étage supp* montre qu'une surélévation modérée du bâti, de l'ordre d'un étage supplémentaire, entraîne des répercussions très minimales sur le confort thermique nocturne. C'est donc une densification verticale de cet ordre de grandeur qu'il convient d'appliquer en priorité.

Localement, il reste tout de même possible d'envisager la réalisation d'une surélévation du bâti de plus d'un ou deux étages supplémentaires. Avant tout cependant, par principe de précaution, il semble important de privilégier l'application d'une telle densification uniquement au sein d'endroits où l'ICU nocturne ne présente pas d'intensités trop élevées, afin d'éviter tout risque d'exacerbation. Il serait dès lors possible de fixer un seuil d'intensité de l'ICU au-delà duquel toute densification verticale dépassant deux étages serait proscrite. Ce seuil pourrait par exemple correspondre à l'intensité maximale moyenne du phénomène relevée lors de belles journées estivales pour un site de mesures situé au sein d'une LCZ 2, comme la place Kléber (cf. chapitre 1.3.1.3 et annexe A).

En outre, l'étude de l'impact de la densification verticale sur l'ICU et le stress thermique illustre une nouvelle fois la nécessité de tenir compte de l'usage de la zone concernée par un aménagement. Les contraintes inhérentes à une zone résidentielle diffèrent nettement de celles impactant une zone commerciale ou de loisirs relativement peu habitée, comme la Presqu'île Malraux. Dans l'objectif de préserver au maximum le confort thermique nocturne, la surélévation devrait ainsi impérativement être limitée à un ou deux étages supplémentaires dans les zones déjà très résidentielles, d'autant plus si ces dernières sont occupées par des populations particulièrement vulnérables.

Enfin, l'orientation des canyons urbains constitue un critère à prendre en considération dans tout projet impliquant une surélévation. Ainsi, dans le cas où une surélévation supérieure à un ou deux étages supplémentaires devait être appliquée, il est préférable d'éviter les canyons urbains d'orientation Est-Ouest, au sein desquels une augmentation de la hauteur du bâti peut entraîner des conséquences néfastes aussi bien sur le stress thermique nocturne que diurne. À l'inverse, l'orientation Nord-Sud possède l'avantage de présenter une durée d'exposition réduite au stress thermique diurne, grâce à un éclairage contenu en milieu de journée, et de ne pas trop exacerber l'UTCI nocturne. L'application de la

surélévation devrait donc plutôt cibler des canyons présentant cette orientation, au détriment de ceux d'orientation Est-Ouest qu'il vaut mieux laisser en l'état.

La surélévation du bâti existant incarne donc un potentiel compromis entre nécessité de ne pas altérer l'ICU et le stress thermique, impératif de lutte contre l'étalement urbain et production continue de logements neufs. En suivant ces préconisations, il est ainsi possible de transformer certains secteurs existants en réserves de foncier aérien sans exacerbation de l'ICU nocturne ni création de zones artificielles supplémentaires. Toutefois, lorsqu'il est tout de même prévu que la mise en œuvre d'un projet urbain s'accompagne d'une artificialisation des sols et de la construction de nouveaux bâtiments, il apparaît nécessaire d'en évaluer au préalable les répercussions sur l'ambiance climatique initiale.

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

Même si la production de nouveaux logements peut s'appuyer en partie sur la surélévation, construire au sein des périmètres urbanisés encore dénués de bâtiments reste le moyen le plus communément admis dans la lutte contre l'étalement urbain. En outre, bien que la densification horizontale soit désormais limitée par la rareté du foncier encore disponible dans les métropoles françaises (Bouchet-Blancou, 2020), il reste des projets d'aménagement intra-muros de grande envergure actuellement en cours de conception ou de mise en œuvre. Ces projets urbains visent à construire de nouveaux quartiers soit au niveau des derniers terrains encore inoccupés, soit à partir de la transformation de secteurs déjà urbanisés, comme les friches industrielles ou portuaires.

Le projet d'aménagement Deux-Rives à Strasbourg s'inscrit justement dans ce dispositif de densification. Démarré au milieu des années 90, le projet a déjà converti l'ancien site industrialoportuaire du bassin d'Austerlitz en quartier de la Presqu'Île Malraux. Désormais, l'EMS s'attelle à la construction du dernier secteur qui doit relier la ville de Strasbourg à celle de Kehl-Am-Rhein en Allemagne (Strasbourg Deux Rives, 2022). Parmi les quatre nouveaux quartiers qui le composeront, Starlette représente celui qui sera à la fois le plus peuplé et le plus actif, et de ce fait celui pour lequel l'enjeu de préservation du confort thermique sera le plus fort. Limiter la dégradation de l'ambiance climatique initiale de ce secteur apparaît d'autant plus crucial que dans sa configuration actuelle, cette zone s'avère relativement épargnée par l'ICU : la cartographie de l'ICU de l'EMS montre en effet que les intensités maximales moyennes du phénomène n'y dépassent pas 3,5°C (cf. figure 75). Il est donc essentiel de pouvoir estimer dans quelle mesure l'aménagement de la zone dans le cadre de l'application du projet urbain Deux-Rives viendra impacter l'ambiance climatique actuellement ressentie.

Cette dernière partie se consacre donc à l'évaluation de l'impact de l'aménagement du futur quartier Starlette sur l'ICU et le stress thermique. Après la description du contexte dans lequel s'inscrivent la zone d'étude et le projet d'aménagement, deux scénarios conçus par les services d'urbanisme et d'aménagement et la Société Publique Locale (SPL) Deux Rives sont testés à l'aide du modèle LASER/F sur la zone qui sera à terme occupée par le quartier Starlette. Au-delà du projet Deux Rives, cette section vise également à servir d'exemple pour la mise en place d'une démarche d'évaluation applicable à tous les futurs aménagements.

3.4.1. État des lieux de la zone d'étude et description du projet d'aménagement

La section qui suit vise à fournir brièvement les éléments de contexte nécessaires à la compréhension des enjeux portés par le projet urbain Deux Rives, ainsi que la description des caractéristiques des deux scénarios qui seront appliqués sur la zone Starlette à l'aide du modèle microclimatique LASER/F.

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

3.4.1.1. Présentation du projet d'aménagement Deux Rives et de la zone d'étude

Le projet urbain Deux Rives, dans lequel s'inscrit l'aménagement du quartier Starlette, a démarré en 1996 avec la mise en place du quartier du Heyritz (cf. figure 56), et s'est poursuivi avec l'aménagement du quartier Presqu'île Malraux entre 2005 et 2016. Il faut cependant attendre 2013 pour parvenir à la finalisation du schéma directeur qui servira de base à la transformation du territoire Deux Rives ([Strasbourg Deux Rives, 2022](#)).

Actuellement, le futur quartier Deux Rives constitue le principal projet urbain mené au sein de la ville de Strasbourg. Une Zone d'Aménagement Concertée (ZAC)¹⁴ Deux Rives a ainsi été créée fin 2013, et sa gestion a alors été confiée à la SPL Deux Rives, société mise en place par la collectivité pour conduire des projets d'aménagement et de réhabilitation sur le territoire. La SPL a alors élaboré dès 2016 les premiers Plans Guides pour cette ZAC se déployant sur 74 hectares, ces documents définissant la trame des espaces publics, la programmation urbaine (bureaux, commerces, équipements publics...) et le phasage des travaux pour chacun des quartiers composant le secteur. Or ces Plans Guides ont été réadaptés en 2021 suite à de nouveaux besoins en termes d'équipements publics et de logements, mais aussi afin de mieux intégrer la résilience face aux enjeux climatiques ([Strasbourg Deux Rives, 2022](#)). La SPL Deux Rives et l'EMS, ainsi que le bureau d'étude environnemental TRIBU, ont par conséquent travaillé pendant une année supplémentaire sur des pistes d'évolution du projet. Ce remaniement a ainsi dû être pris en compte dans l'aménagement des quatre quartiers Deux Rives, dont Starlette (Figure 97).

À terme, le quartier Starlette aura une population d'environ 2 800 habitants et disposera en outre de 37500 m² d'activités culturelles, commerciales et socio-économiques. Actuellement, il s'agit d'un site à l'état de friche et classé en **LCZ 8**, ce qui correspond à une zone minérale mais au bâti peu dense et ne dépassant pas un ou deux étages. La zone est constituée d'une large bande de terrain vague à proximité du bassin Vauban (Figure 97, à gauche). L'aménagement de Starlette tel que défini par le Plan Guide 2021 (Figure 97, à droite) a déjà passé l'ensemble des étapes composant la phase de conception d'un projet (esquisse, avant-projet et obtention du permis de construire). Il est donc définitivement validé à l'heure actuelle. Néanmoins, le test de ce scénario d'aménagement permettra tout de même d'acquérir une première expérience concernant l'évaluation d'un projet urbain sur le plan climatique et les conclusions pouvant en être tirées.



Figure 97 – État actuel du futur quartier Starlette s'inscrivant au cœur du territoire Deux Rives (à gauche, source : [Google Maps](#)) et situation prévue selon le projet défini conjointement par la SPL Deux Rives (à droite, source : [Strasbourg Deux Rives, 2022](#)).

¹⁴ ZAC (Zone d'Aménagement Concertée) : opération d'urbanisme gérée par un établissement public, visant à réaliser un aménagement en vue de le céder ultérieurement à un organisme public ou privé ([Cerema, 2020](#)).

3.4.1.2. Description des scénarios appliqués

Afin de déterminer l'impact sur l'ambiance climatique du quartier Starlette tel que conçu par le Plan Guide 2021, un scénario reprenant les caractéristiques morphologiques et d'occupation du sol du projet d'aménagement a été construit. Il est comparé avec d'une part la zone Deux Rives sous sa forme actuelle (Figure 98, à gauche) et d'autre part avec un scénario alternatif transformant Starlette en un parc urbain (Figure 98, au centre). Les modélisations sont réalisées à l'aide du logiciel LASER/F pour la période caniculaire allant du 30 juin au 2 juillet 2015, et un forçage adapté à Starlette est obtenu selon la même technique de couplage entre méso et micro-échelles utilisée pour l'ensemble des simulations précédentes (cf. chapitre 2.2.2.2).

Le scénario *Plan Guide* intègre donc la future morphologie du quartier Starlette, ainsi qu'une petite partie de celle du quartier Citadelle, à l'ouest du domaine de simulation (Figure 98, à droite). Par rapport aux premières versions du Plan Guide, ce scénario présente une part plus importante d'espaces verts et une surface bâtie amoindrie (Strasbourg Deux Rives, 2022). Le projet a été conçu de façon à bénéficier d'un ensoleillement maximal : dans cet objectif, les canyons sont majoritairement d'orientation Est-Ouest, et les bâtiments sont en forme d'escalier afin d'éviter d'obstruer le rayonnement solaire parvenant à l'immeuble d'en face. Un tel scénario permet de ce fait d'évaluer l'impact sur l'ICU et le stress thermique d'un projet urbain particulier, et donc de déterminer dans quelle mesure une densification horizontale modifie l'ambiance climatique du lieu sur lequel elle s'applique.

Le scénario *Parc urbain* représente une alternative au Plan Guide, proposée lors de la phase de conception du projet. Comme son nom l'indique, il transforme la friche portuaire en un parc urbain dotée d'une végétation arborée peu dense répartie sur l'ensemble de la bande. Tout l'intérêt de ce scénario consiste à comparer l'effet d'un parc urbain faiblement arboré avec celui d'un aménagement bâti, et par conséquent à estimer quel impact il aurait eu sur l'ambiance climatique du site s'il avait été choisi à la place du scénario *Plan Guide*.

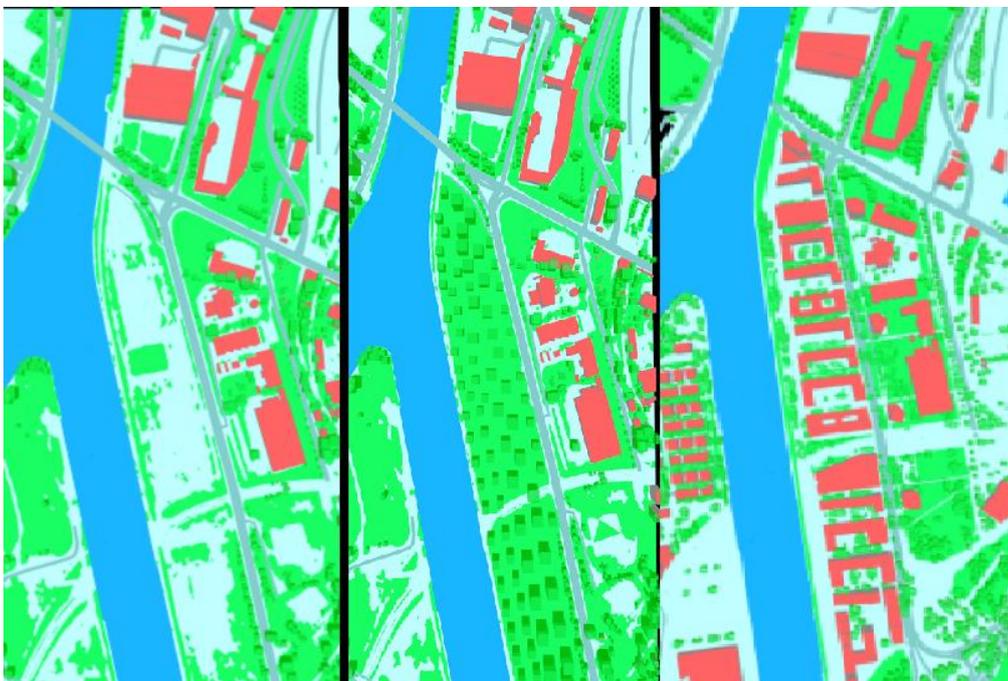


Figure 98 – Maquette 3D de la zone Starlette représentée par LASER/F selon les scénarios *État initial* (à gauche), *Parc urbain* (au centre) et *Plan Guide* (à droite).

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

Les principales caractéristiques modifiées d'un scénario à l'autre sont résumées dans le tableau 4 ci-dessous.

Scénario	Fraction de surface végétale (%)	Nombre d'arbres	Hauteur moyenne du bâti (m)	Sky View Factor
<i>État initial</i>	23,70%	606	11,90	0,72
<i>Parc urbain</i>	26,30%	693	11,90	0,61
<i>Plan Guide</i>	6,90%	1894	16,60	0,42

Tableau 4 – Grandeurs modifiées dans le cadre des scénarios appliqués à la zone Starlette.

3.4.2. Impact des différents scénarios sur l'ambiance climatique de la zone d'étude

En fournissant une évaluation détaillée des répercussions d'un projet urbain sur l'ambiance climatique initiale à partir de la modélisation climatique à micro-échelle, l'objectif de cette section consiste également à proposer une démarche visant à être reproductible à d'autres projets d'aménagement. En outre, étant donné qu'il avait été conjointement décidé avec le service ATPU de l'EMS d'éprouver en priorité les conséquences du projet urbain Deux Rives sur la zone Starlette, l'analyse des différents scénarios traite essentiellement de ce quartier, et n'inclut donc pas une étude ciblée des quartiers Citadelle ou Port du Rhin.

L'étude démarre avec l'analyse de la température de l'air des différents scénarios réalisée à l'échelle d'une maille de 250 x 250 m comprenant le centre du quartier Starlette (Figure 99). D'emblée, on peut noter qu'aucun des scénarios appliqués ne permet malheureusement de descendre sous le seuil de 20°C lors des deux dernières nuits de la période simulée (Figure 99, à gauche). Sans surprise, le scénario *Plan Guide* s'avère être le plus chaud des trois, avec des écarts de température de l'air allant jusqu'à 2°C de plus que l'état initial en période nocturne (Figure 99, à droite). L'ICU maximal moyen de la zone Starlette atteignant actuellement environ 3,5°C, une telle augmentation élèverait ce dernier à 5,5°C, soit une intensité proche de celle relevée pour le secteur Malraux (cf. figure 75 et annexe O). Par ailleurs, la hausse brutale du ΔT_{air} à partir de 20h TU résulte de la rapide diminution de la variable pour la zone à l'état initiale, qui complètement exposée au rayonnement solaire se refroidit beaucoup plus vite que celle aménagée selon le Plan Guide. Ce comportement se retrouve pour le scénario *Parc urbain*, dont le refroidissement nocturne s'opère plus rapidement encore que pour la zone à l'état initiale. En effet, bien que non construite, cette dernière présente tout de même une fraction de surface minérale nettement plus importante que le scénario *Parc urbain* au sol presque entièrement végétalisé (33,6% de surfaces imperméables contre 11,6% pour le parc urbain). Par conséquent, la mise en place de ce dernier débouche sur une diminution de la température de l'air qui s'étend sur l'ensemble de la période nocturne et peut aller jusqu'à -2,8°C.

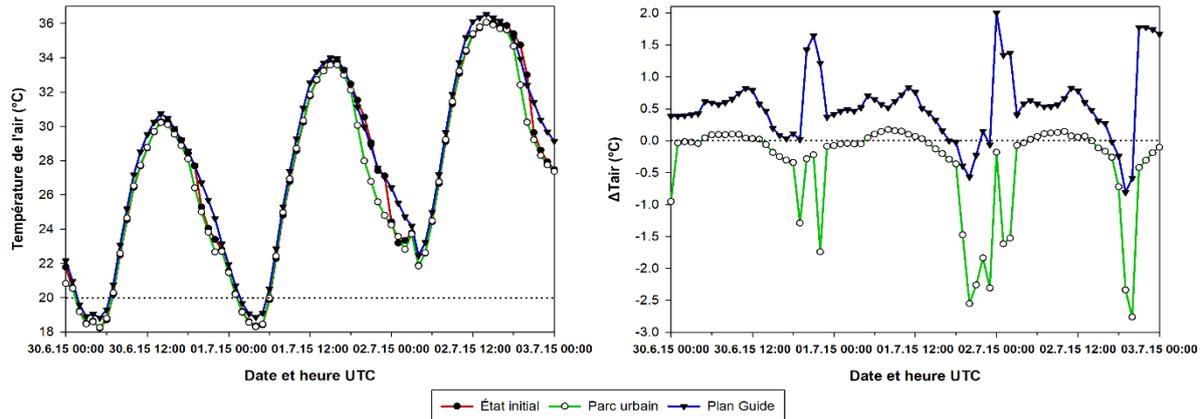


Figure 99 – Évolution de la température de l'air (à gauche) et de la différence de température (ΔT_{air}) entre l'état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Sans surprise, les différences inter-scénarios se révèlent bien plus prononcées lors de l'analyse de l'indice de confort UTCI (Figure 100). En période diurne, la forte exposition de Starlette *État initial* au rayonnement solaire mène à de hauts niveaux de stress thermique aux heures les plus chaudes de la journée. Dénué d'arbres, le scénario modélisant l'état actuel de la zone est ainsi le seul à parvenir au niveau de stress thermique extrême pendant quatre heures lors de la dernière journée de la période de simulation (Figure 100, à gauche). À l'opposé, compte tenu de l'importante part d'ombre dispensée par leur végétation arborée, les scénarios *Plan Guide* et *Parc urbain* atteignent des valeurs d'UTCI assez proches au plus fort de la journée, et permettent tous deux de diminuer l'UTCI de manière conséquente par rapport à la situation initiale, avec des écarts minimums de $-1,3^{\circ}\text{C}$ entre 10h et 14h TU (Figure 100, à droite). Lors de la dernière journée de la période caniculaire, ces réductions de l'UTCI permettent ainsi de conserver un niveau de stress thermique certes très élevé, mais n'atteignant pas les valeurs extrêmes subies par la zone dans sa configuration actuelle.

À l'opposé, les scénarios *Plan Guide* et *Parc urbain* divergent radicalement la nuit : le premier subit en effet les conséquences d'un stockage de chaleur accru en journée, combiné à une émission nocturne de rayonnement infrarouge contrariée par les nombreux bâtiments et ralentissant donc les processus de refroidissement des surfaces. Par conséquent, l'UTCI nocturne du scénario *Plan Guide* présente des valeurs systématiquement au-dessus de celles du *Parc urbain* et de la zone initiale, l'écart pouvant même occasionnellement dépasser les 3°C . Sachant que la différence entre deux niveaux de stress thermique est de 6°C pour l'UTCI, une augmentation de 3°C a de ce fait de fortes probabilités de faire atteindre à la zone concernée un niveau de stress supplémentaire au cours de la nuit. D'ailleurs, le scénario *Plan Guide* est le seul à ne pas du tout atteindre l'état de confort thermique lors de la dernière journée simulée. Sans surprise, le scénario *Parc urbain* apparaît donc ici comme le plus avantageux sur le volet climatique, puisqu'il permet non seulement d'éviter toute dégradation du confort thermique nocturne par rapport à la situation initiale, mais aussi d'atténuer nettement le stress thermique diurne.

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

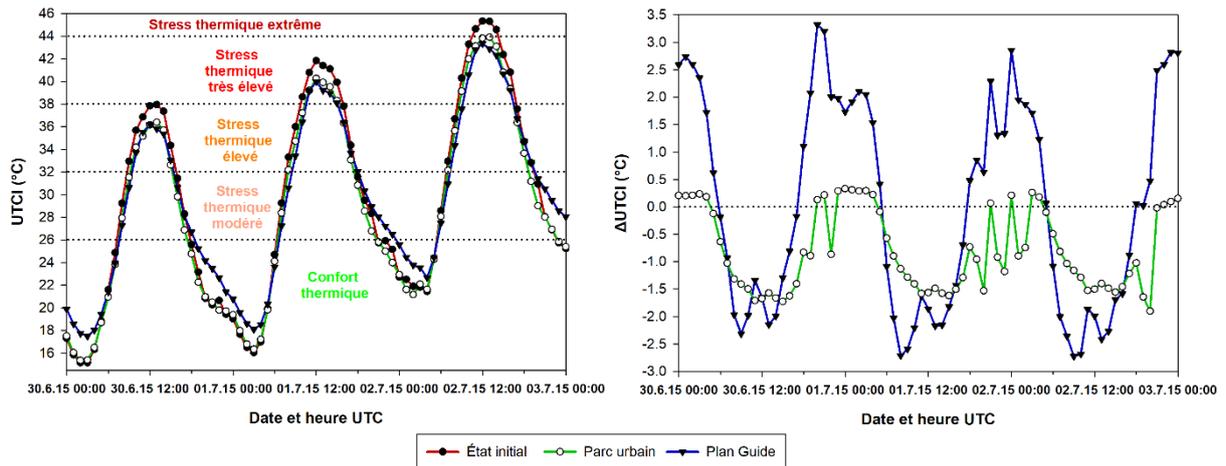


Figure 100 – Évolution de l'indice de confort UTCI (à gauche) et de la différence d'UTCI (Δ UTCI) entre l'état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Les analyses précédentes ont souligné l'importance d'évaluer également l'impact d'un scénario d'aménagement sur le confort thermique par le biais de la durée d'exposition aux différents niveaux de stress thermique durant une période donnée (cf. 3.2.3 et 3.3.2.2). Présentées par la figure 101, ces durées exposent nettement la perte de confort thermique induite par le scénario *Plan Guide* : sur l'ensemble de la période, six heures sont ainsi perdues lors de son application. Elles sont essentiellement converties en heures de stress thermique modéré et traduisent la diminution de la durée du confort thermique nocturne. Le scénario *Plan Guide* permet tout de même de supprimer totalement l'occurrence du stress thermique extrême sur la période simulée, ce qui représente un avantage non négligeable dans une zone amenée à être aussi fréquentée que le quartier Starlette. Toutefois, ce bénéfice se retrouve également pour le scénario *Parc urbain*, qui possède en plus l'avantage de présenter des durées d'exposition plus faibles aux niveaux de stress thermique modéré et élevé. Une nouvelle fois, la question demeure en ce qui concerne le choix d'améliorer en priorité l'ambiance climatique ressentie en journée afin de préserver les activités commerciales et de loisirs de la zone, ou plutôt d'épargner au possible le confort thermique nocturne des 2800 résidents qui viendront à l'avenir occuper le quartier Starlette.

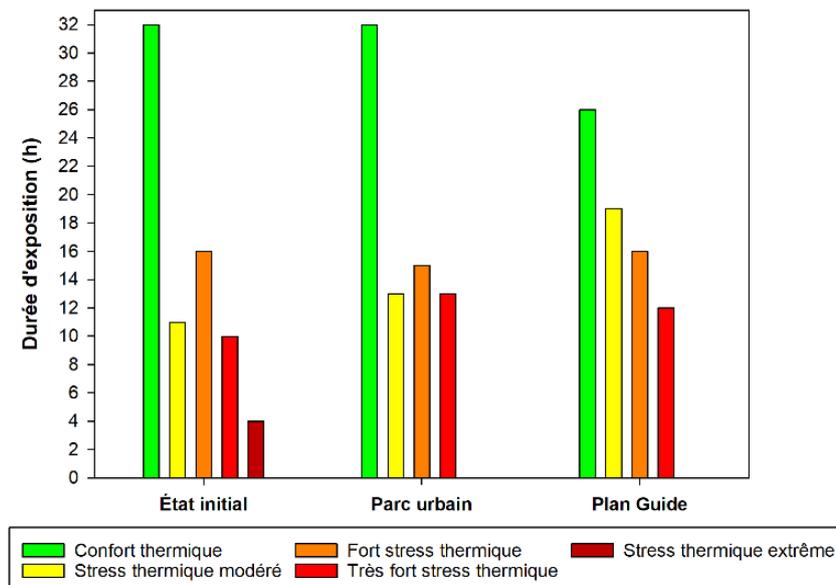


Figure 101 – Durée d'exposition à chaque niveau de stress thermique pour Starlette durant la période du 30 juin au 2 juillet 2015 selon les différents scénarios.

Lors de l'évaluation d'un scénario d'aménagement, il semble important de pouvoir visualiser où se trouvent les sites les plus exposés au stress thermique et ceux étant à l'inverse plus épargnés afin de pouvoir cibler les éventuels réajustements à effectuer par la suite. Par exemple, dans le cas du scénario *Plan Guide*, les cartes de l'UTCI réalisées à 13h TU indiquent que le quartier Starlette présente davantage de zones exposées au stress thermique que le quartier Citadelle (Figure 102). L'explication provient de l'orientation différente des canyons de ces deux secteurs : l'essentiel des canyons urbains de Starlette sont effectivement orientés Est-Ouest, tandis que ceux composant le quartier Citadelle présentent une orientation majoritairement Nord-Sud. Or comme l'ont montré les précédentes comparaisons d'orientations (cf. 3.3.2.3), les canyons orientés Est-Ouest s'avèrent être les plus fréquemment soumis au stress thermique diurne, notamment lors des heures les plus chaudes de la journée.

Les cartes soulignent également l'indéniable effet de rafraîchissement apporté par le potentiel d'ombrage des arbres : quel que soit le scénario considéré, la végétation arborée permet ainsi de diminuer localement l'UTCI de deux niveaux, ce qui est particulièrement appréciable lorsque les zones alentours sont exposées au niveau maximal de stress thermique. L'agencement irrégulier des arbres du scénario *Parc urbain* empêche toutefois de disposer d'une zone ombragée continue : pour parvenir à un tel objectif, il faudrait alors soit augmenter la hauteur et la largeur de la couronne des arbres, soit accroître leur densité.

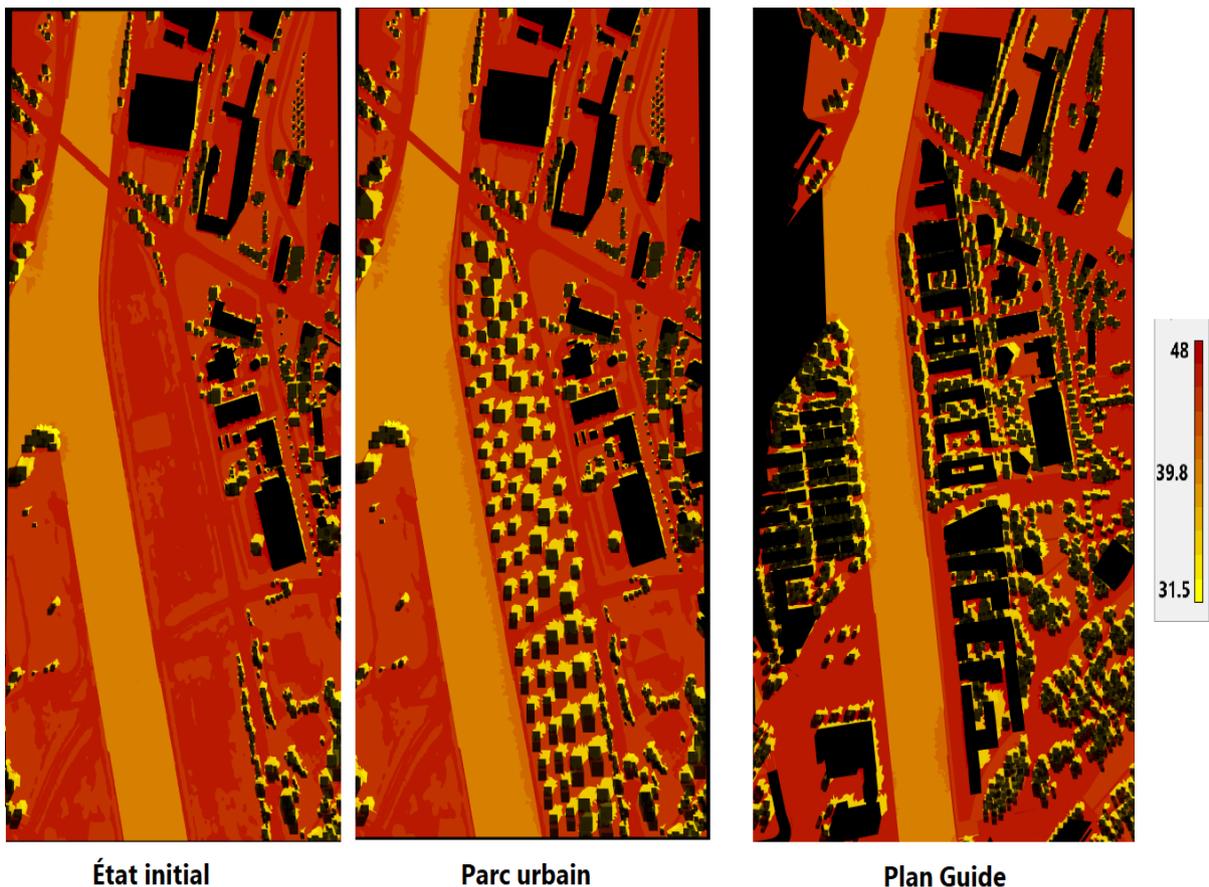


Figure 102 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Starlette le 2 juillet 2015 à 13h TU en fonction des trois scénarios.

Les cartes de l'UTCI réalisées à 23h TU mettent bien en évidence l'altération du confort thermique nocturne au niveau du scénario *Plan Guide*, résultant de la forte densité de bâti (Figure 103). Pour ce scénario, l'ensemble du quartier Starlette est ainsi soumis à un stress thermique modéré, tandis qu'il bénéficie de l'état de confort thermique aussi bien pour le scénario *Parc urbain* que pour la zone actuelle.

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

Cette omniprésence du stress thermique nocturne dans le quartier Starlette conçu selon le Plan Guide pose particulièrement problème, dans la mesure où son impact réel sur le confort thermique des résidents pourrait être renforcé par la localisation des logements : les différents commerces et bureaux se trouvent en effet surtout au rez-de-chaussée ou dans les étages les plus bas, tandis que les logements se situent plutôt aux étages supérieurs (Strasbourg Deux Rives, 2022). Or ces derniers sont généralement plus chauds que les étages inférieurs, ce qui contribue à aggraver potentiellement le stress thermique ressenti par leurs occupants.

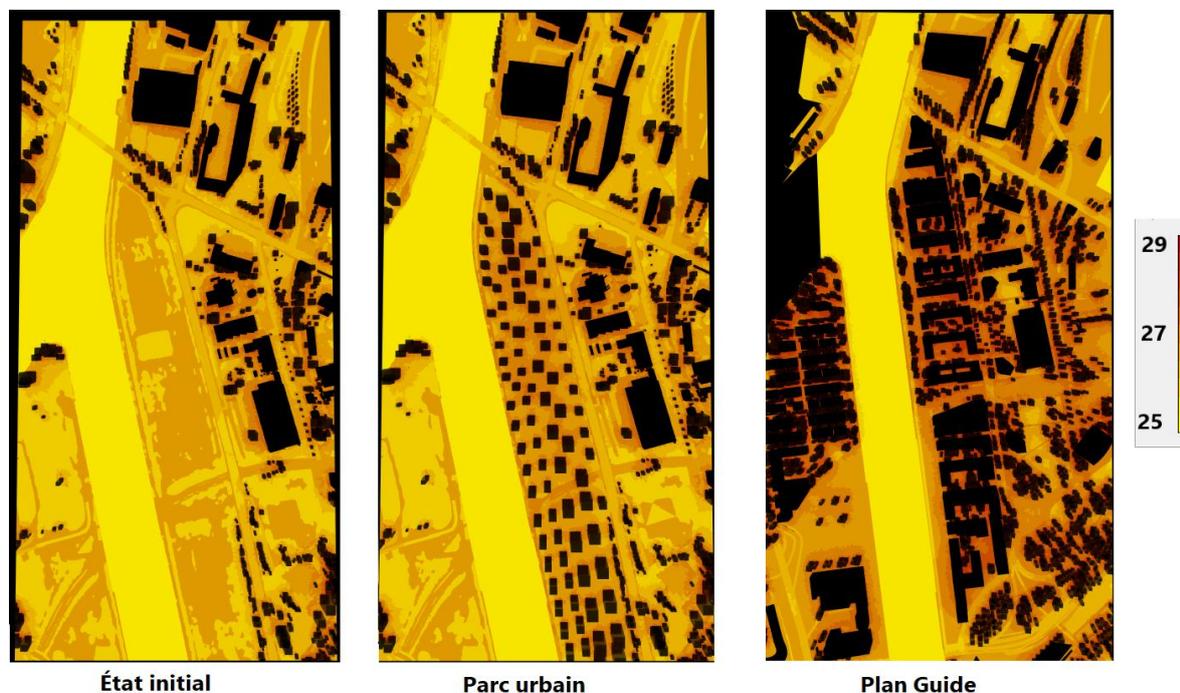


Figure 103 – Cartes de l'indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Starlette le 2 juillet 2015 à 23h TU en fonction des trois scénarios.

À partir des cartes de l'UTCI réalisées pour le quartier Starlette, il est possible d'analyser les conséquences des différents scénarios d'aménagement sur le confort thermique au niveau de zones pour lesquelles la préservation du confort thermique est particulièrement importante. C'est notamment le cas des zones amenées à être très fréquentées par les piétons, comme par exemple la Promenade des Quais (cf. figure 97). Longeant le bassin Vauban, elle se compose d'une allée bordée d'arbres et disposant de mobilier urbain (bancs) et d'aires de jeux. De tels usages nécessitent cependant de ne pas être exposé à un stress thermique trop important ou trop long. Afin de vérifier que la Promenade telle que conçue par le scénario *Plan Guide* soit en mesure d'accueillir le public dans des conditions thermiques favorables, vingt-deux capteurs fictifs ont été installés au sein du domaine de simulation le long de l'allée afin de constituer un transect. La même opération est appliquée aux scénarios du *Parc urbain* et de la friche initiale à titre comparatif (Figure 104).

Les valeurs de l'UTCI relevées le long de l'itinéraire montrent que la Promenade des Quais telle que conçue par le *Plan Guide* présente un stress thermique beaucoup trop important pour des activités en plein air lors d'un après-midi caractéristique d'une journée estivale caniculaire (Figure 105, en haut) : l'UTCI se maintient ainsi à un niveau de stress thermique très élevé tout le long de l'itinéraire, atteignant même le niveau extrême aux endroits les plus exposés. De par l'ombre portée qu'ils fournissent, les arbres longeant le quai parviennent tout de même à diminuer localement l'UTCI de 2 à 4°C. Une telle réduction peut des fois suffire à faire baisser l'UTCI d'un niveau, comme le montre le passage d'un stress thermique extrême à un stress thermique très élevé. De telles valeurs restent néanmoins bien trop fortes pour envisager des sorties en extérieur dans de bonnes conditions.

La végétation arborée implantée dans le cadre du scénario *Parc urbain* réussit toutefois à davantage atténuer le stress thermique : ce dernier diminue en effet de plus de 5°C à proximité des arbres, ce qui équivaut quasiment à un niveau entier sur l'échelle de l'UTCI. Une telle réduction permet à ce scénario d'être le seul à atteindre un stress thermique élevé, soit deux niveaux de moins que le stress thermique extrême. Cette différence s'explique par le fait que les arbres du parc urbain sont plus hauts (22 mètres de haut pour les arbres du scénario *Parc urbain*, contre 11 mètres pour ceux du *Plan Guide*), et moins espacés que ceux du *Plan Guide*. Ces scénarios démontrent ainsi que des arbres suffisamment hauts et proches les uns des autres pourraient dispenser une ombre continue suffisante pour arriver à un niveau de stress thermique relativement acceptable, et ceci même lors d'un après-midi caniculaire.

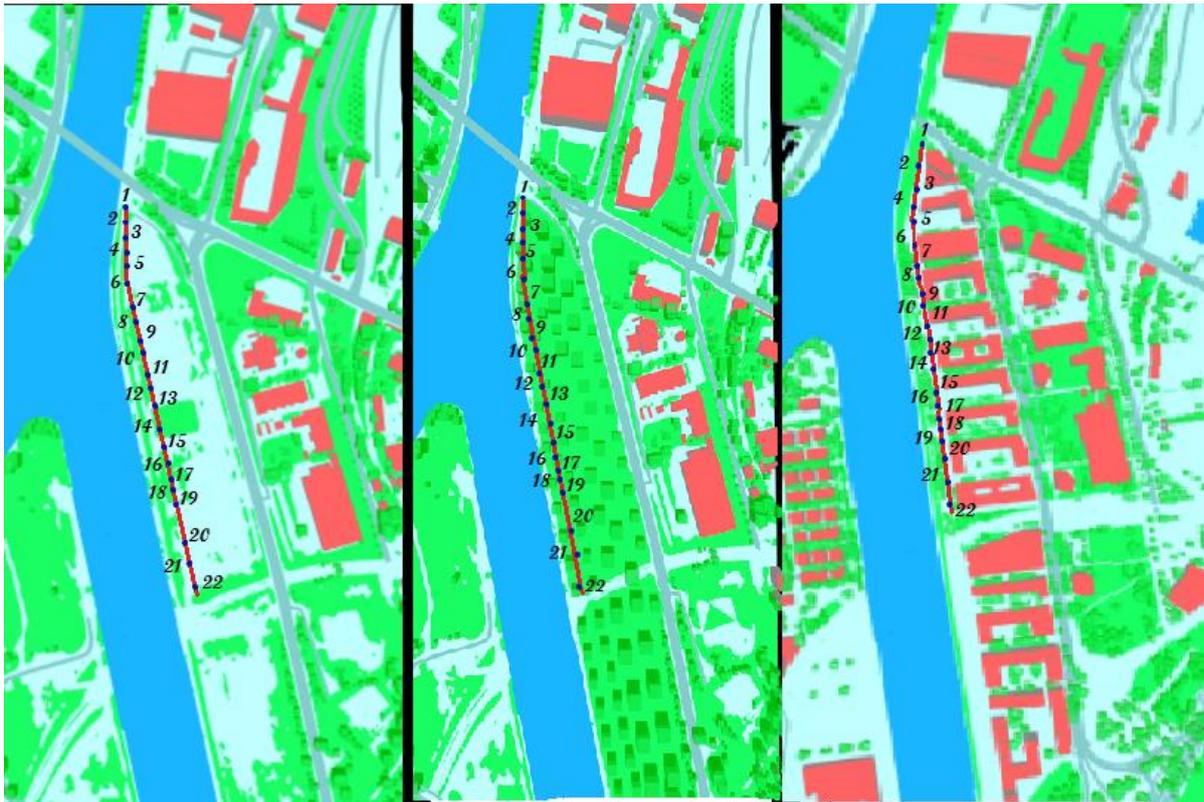


Figure 104 – Disposition des capteurs fictifs le long de la Promenade des Quais sur le domaine de simulation de Starlette *État initial* (à gauche), Starlette *Parc urbain* (au centre) et Starlette *Plan Guide* (à droite).

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

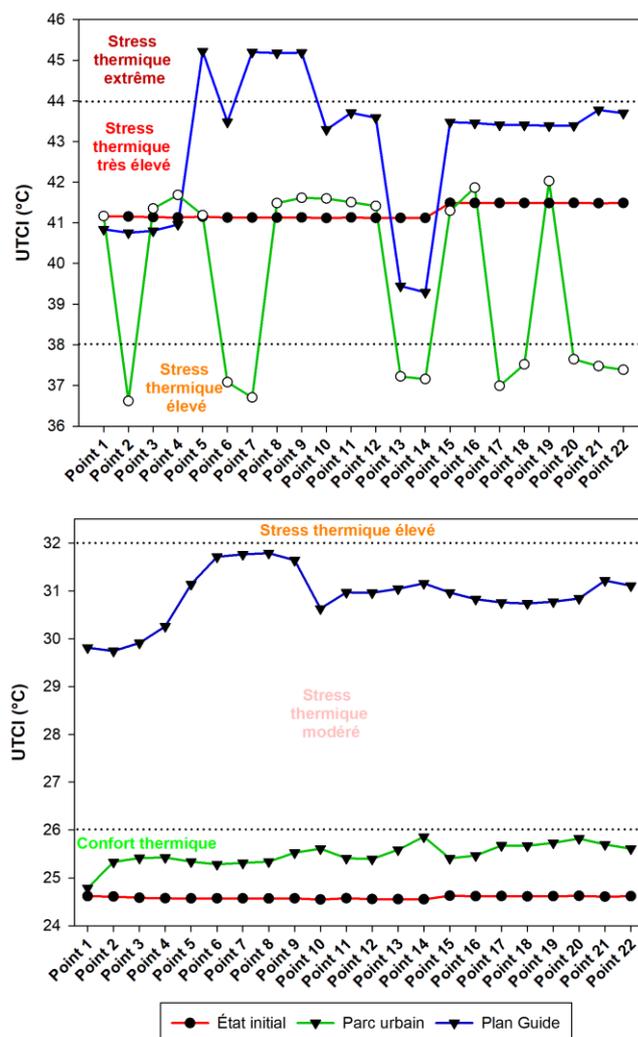


Figure 105 – UTCI simulé par LASER/F sur l’itinéraire de la Promenade des Quais le 2 juillet 2015 à 13h UTC (en haut) et 20h UTC (en bas) en fonction des trois scénarios.

Lors de la journée du 2 juillet 2015, 20h TU est le moment de la journée où l’UTCI finit par atteindre à nouveau l’état de confort thermique au niveau de la Promenade des quais pour le scénario *Parc urbain* et la situation initiale (Figure 105, en bas). Ce n’est toutefois pas le cas pour le scénario *Plan Guide*, pour lequel l’allée subit un stress thermique modéré tout le long de l’itinéraire, s’approchant même à plusieurs reprises du niveau supérieur. Ce scénario affiche ainsi des valeurs supérieures respectivement de plus de 6 et 7°C avec le *Parc urbain* et la situation initiale. De tels écarts s’expliquent par le fait que le quartier Starlette conçu par le Plan Guide se refroidit beaucoup plus lentement qu’un site végétalisé ou qu’une zone à l’état de friche, dont l’absence de bâti permet un déstockage nocturne rapide et non entravé par la présence d’obstacles.

En termes de durées d’exposition aux différents niveaux de stress thermique lors de l’ensemble de la période de simulation, le *Parc urbain* représente sans surprise le scénario le plus avantageux pour la Promenade des Quais (Figure 106). Il s’agit en effet du seul scénario permettant de bénéficier d’un état de confort thermique durant plus de la moitié de la période caniculaire le long de cet itinéraire. À l’inverse, le scénario *Plan Guide* présente la plus faible occurrence de confort thermique, s’avérant même moins propice à cet état que la zone en friche pourtant très exposée au rayonnement solaire. C’est également le seul scénario durant lequel survient le niveau de stress thermique extrême. Venant s’ajouter aux résultats précédents, ce constat montre que la Promenade des Quais telle qu’élaborée par le Plan

Guide subit des valeurs d'UTCI pour la plupart nettement trop élevées pour constituer un itinéraire confortable, mais que l'ajout du nombre d'arbres nécessaire à la mise en place d'une zone d'ombre continue pourrait suffire à améliorer considérablement l'ambiance climatique.

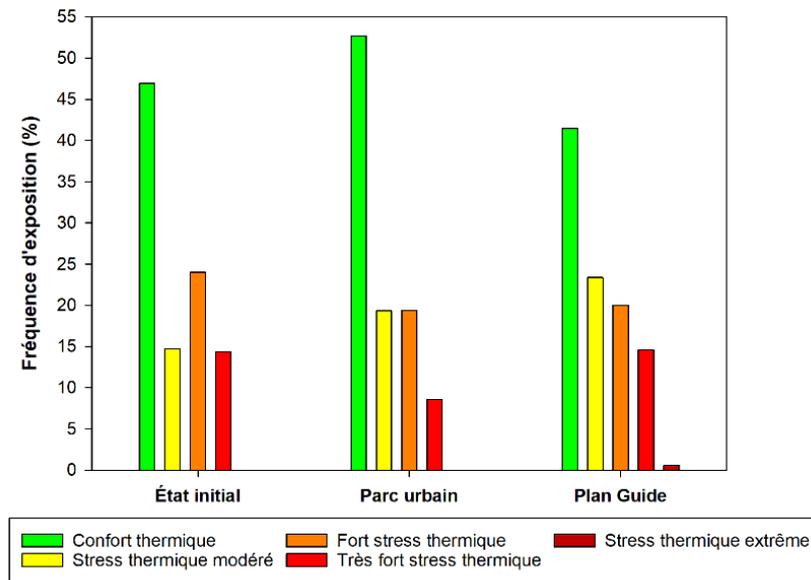


Figure 106 – Durées horaires d'exposition à chaque niveau de stress thermique selon les différents scénarios sur la Promenade des Quais, sur l'ensemble de la période de simulation allant du 30 juin au 2 juillet 2015.

Un autre aménagement mis en avant par le projet Deux Rives en ce qui concerne le quartier Starlette consiste à organiser les bâtiments en gradins afin de favoriser l'ensoleillement et libérer la vue d'un maximum d'étages (Strasbourg Deux Rives, 2022). Outre la structure du bâti en escalier, cette recherche d'ensoleillement se traduit également par la prédominance de canyons orientés Est-Ouest. Or dans un contexte de vagues de chaleur de plus en plus fréquentes et intenses, faciliter la pénétration du rayonnement solaire peut potentiellement déboucher sur une durée d'exposition plus longue à un stress thermique diurne accru.

Dans l'objectif d'évaluer l'impact de cet aménagement sur le confort thermique, un canyon d'orientation Est-Ouest dont les bâtiments bordiers côté sud présentent cette structure caractéristique en escalier est comparé avec un canyon orienté Nord-Sud issu du quartier Citadelle voisin (Figure 107). À l'instar de ce qui avait déjà été relevé dans le cadre des scénarios de densification verticale (cf. 3.3.2.2), la mise en place d'une orientation Est-Ouest débouche sur une augmentation de la durée d'exposition au stress thermique diurne : le canyon du quartier Starlette subit ainsi cinq heures supplémentaires du niveau maximal de stress thermique relevé pour chaque journée par rapport au canyon Nord-Sud provenant du quartier Citadelle. En revanche, il semble essentiel de souligner qu'en ce qui concerne le confort thermique nocturne, le canyon Est-Ouest issu du quartier Starlette affiche des valeurs nettement meilleures que son pendant Nord-Sud, permettant même de profiter de quatre heures supplémentaires de confort thermique lors de la dernière nuit de la période simulée.

Ces résultats apparaissent en contradiction avec ceux exposés lors de la section précédente, où l'orientation Nord-Sud était plus favorable au confort thermique nocturne que l'Est-Ouest. Cependant, bien que l'orientation figure comme étant le facteur de géométrie urbaine influençant le plus le confort thermique selon plusieurs autres travaux (Ali-Toudert, 2005 ; Bakarman & Chang ; 2015 ; Jamei et al., 2016 ; Abdollahzadeh & Bilorla, 2021), le Sky View Factor (SVF) représente également un paramètre jouant un rôle majeur sur le confort thermique (Wang et al., 2016 ; Zhang et al., 2019). Or le canyon d'orientation Nord-Sud issu du quartier Citadelle présente justement une valeur de SVF plus basse que

3.4. Évaluation d'un projet d'aménagement à l'échelle du quartier

celle relevée pour le canyon Est-Ouest du quartier Starlette (0,33 pour le premier, contre 0,52 pour le second). Un SVF plus faible est en effet associé à un meilleur confort thermique diurne grâce à l'exposition réduite du canyon au rayonnement solaire, au détriment toutefois de l'ICU nocturne qui se retrouve dégradé par les difficultés de refroidissement du canyon (cf. chapitre 1.3.1.2), les émissions de rayonnement IRT étant entravées par le bâti dense et haut. En période nocturne, le SVF plus élevé du canyon orienté Est-Ouest lui permet donc d'évacuer plus facilement la chaleur accumulée au cours de la journée que le canyon d'orientation Nord-Sud, limitant alors dans une certaine mesure la dégradation de l'UTCI nocturne. Ce cas de figure montre bien que d'une part, l'effet d'un facteur (ici l'orientation de la rue) sur le confort thermique peut être contrebalancé par celui d'un autre paramètre (ici le SVF), et d'autre part qu'une valeur d'UTCI est le résultat d'une combinaison complexe de nombreux paramètres géométriques et d'occupation du sol. Cette complexité souligne à elle seule l'intérêt de la modélisation numérique dans la détermination de l'impact d'un projet d'aménagement sur l'ambiance climatique d'une zone urbaine.

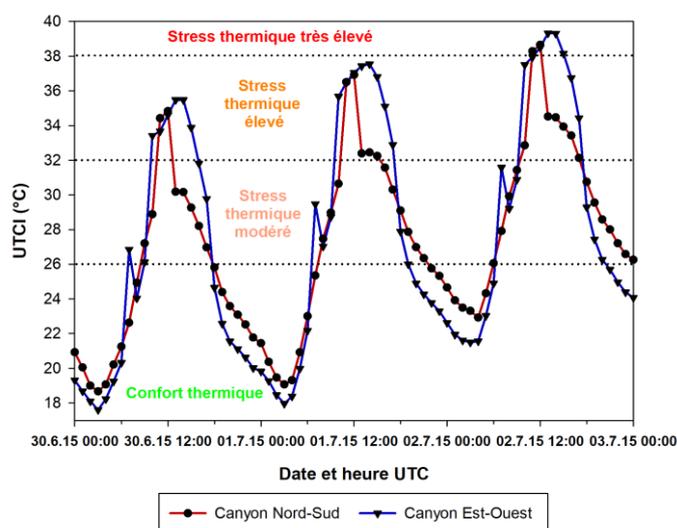


Figure 107 – Comparaison de l'UTCI simulé d'un canyon d'orientation Nord-Sud issu du quartier Citadelle avec celui d'un canyon d'orientation Est-Ouest issu du quartier Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.

Les différents résultats exposés permettent de déboucher sur de nouvelles préconisations, venant s'ajouter aux précédentes et visant à s'appliquer à la fois au projet Deux Rives et à toute future opération d'aménagement. En premier lieu, lors de l'élaboration d'un projet urbain, il apparaît essentiel de **tenir compte de l'intensité initiale de l'ICU** dans la zone considérée. L'impact d'un scénario d'aménagement ne sera effectivement pas le même dans un secteur déjà très exposé à de fortes intensités du phénomène, comme le quartier Malraux, qu'au niveau d'une zone moins affectée comme le quartier Starlette. Dans le premier cas, l'objectif consiste surtout à éviter au maximum toute exacerbation supplémentaire de l'ICU. Le second cas est plus complexe à traiter : d'un côté, des intensités d'ICU plutôt modérées peuvent laisser plus de marge de manœuvre aux projets urbains. Or la rareté de telles zones relativement épargnées par l'ICU, d'autant plus à proximité du centre-ville, incite plutôt à y limiter au possible toute aggravation du phénomène, voire à les laisser en l'état.

L'évaluation de l'impact d'un projet d'aménagement sur l'ambiance climatique soulève également la question de la **prise en considération des conditions climatiques futures** : un projet urbain de grande envergure se réalise en effet souvent sur une durée de l'ordre d'une décennie ou plus. De nombreuses années peuvent donc séparer la phase de conception d'un projet de sa mise en œuvre. C'est le cas de l'opération urbaine Deux Rives, dont la conception a démarré dès 1996 mais qui ne sera pourtant pas achevée avant 2030. Or la situation climatique d'il y a vingt ans, à laquelle la majorité des projets urbains

en cours de réalisation sont adaptés, n'est plus la même que celle prévalant actuellement. Il apparaît de ce fait essentiel d'anticiper l'évolution future du climat lors de l'élaboration d'un projet urbain. Au regard des enjeux liés au changement climatique, cela signifie qu'un projet dont la phase de conception démarre maintenant devrait d'ores et déjà prendre en considération les conditions climatiques qui prédomineront en 2050.

L'analyse de l'UTCI relevé au niveau de différents canyons des quartiers Starlette et Citadelle vient compléter les préconisations précédemment émises à propos du rôle de l'orientation (cf. 3.3.2.2), et plus généralement de celui de la géométrie urbaine. Toutefois, cerner l'influence de cette dernière sur le confort thermique d'une zone urbaine s'avère souvent plus complexe qu'il n'y paraît. Il existe effectivement une multitude de paramètres devant être pris en compte, et dont les impacts respectifs sur le stress thermique pourront varier en fonction de la combinaison de facteurs dans laquelle ils s'inscrivent : par exemple, deux canyons ayant la même orientation, mais pas le même SVF, auront en toute logique des répercussions distinctes sur le confort thermique. L'ambiance climatique d'un quartier ou d'une rue résulte donc d'une **combinaison unique de nombreux facteurs géométriques et d'occupation du sol**. Dès lors, il est impossible de tester toutes les possibilités, et de ce fait d'établir des préconisations pouvant s'appliquer à l'ensemble des cas de figure. Suite à cette thèse, il sera donc nécessaire de lancer des études plus approfondies sur le rôle de la géométrie urbaine et de la nature des matériaux.

L'ensemble des résultats exposés au sein de ce chapitre met donc en évidence toute la complexité inhérente à la prévision du confort thermique, qui dépend d'un très grand nombre de facteurs dont les combinaisons peuvent mener à des résultats très variés. Face à ce constat, il semble essentiel de pouvoir **évaluer au préalable chaque projet d'aménagement par le biais de la modélisation**. Ce diagnostic reposerait sur l'utilisation d'un indice de confort thermique comme principal indicateur d'évaluation. Cet indice serait éventuellement complété à l'occasion par la température de l'air, notamment lorsque l'impact d'une mesure de remédiation affecte d'une manière différente les deux variables (cf. 3.2.2). Il s'agirait dès lors d'évaluer le projet urbain sur des critères comme la **répartition des valeurs d'UTCI** (ou de tout autre indice de confort jugé pertinent) via la réalisation de cartographies, la **durée d'exposition** aux différents niveaux de stress thermique (ou à l'inverse à l'état de confort thermique), ou encore **l'évolution journalière de l'UTCI au niveau d'un aménagement précis**. En fonction de l'usage de la zone, il faudra alors définir un objectif prioritaire, à savoir s'il convient d'évaluer avant tout l'impact sur le confort thermique nocturne, ou à l'inverse sur son pendant diurne, tout en cherchant au possible à adopter des compromis. Une utilisation régulière de la modélisation constituerait ainsi un outil précieux d'aide à la décision dans le choix de plusieurs scénarios de projets d'aménagement, d'autant plus si elle repose sur une utilisation conjointe de la méso-échelle, qui permet de déterminer l'impact d'aménagements à l'échelle de toute l'agglomération, et de la micro-échelle, qui offre la possibilité de se focaliser ensuite sur une zone d'intérêt à une échelle allant du bâti jusqu'au quartier.

3.5. Conclusion du chapitre 3

S'appuyant sur des modélisations réalisées à l'échelle microclimatique, ce chapitre a traité de l'étude de nombreux scénarios élaborés en accord avec les services d'urbanisme de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS). L'objectif de telles recommandations était de fournir des solutions d'atténuation du stress thermique, qui tiennent également compte des contraintes et enjeux auxquels sont confrontées les collectivités, afin qu'elles soient les plus réalistes et les plus opérationnelles possible.

Après un bref aperçu du contexte urbanistique et réglementaire dans lequel s'inscrivent ces travaux, la première partie du chapitre a cherché à éprouver le potentiel d'atténuation de plusieurs solutions de remédiation. Trois scénarios s'appuyant sur la végétalisation et l'augmentation du pouvoir réfléchissant des matériaux composant le bâti ont été modélisés à méso-échelle avec le système Méso-NH/SURFEX,

3.5. Conclusion du chapitre 3

et micro-échelle avec le modèle thermo-radiatif LASER/F sur la zone Malraux, lors d'une période estivale caniculaire. Les scénarios effectués à l'échelle mésoclimatique ont été appliqués de manière uniforme dans chacune des mailles composant le domaine de simulation, tandis que ceux réalisés à l'échelle microclimatique ont été adaptés aux contraintes imposées par le tissu urbain existant. L'Universal Thermal Comfort Index (UTCI) et la température de l'air ont été utilisées en tant qu'indicateurs d'évaluation, avec toutefois une focalisation sur l'indice de confort. Les résultats obtenus pour les deux variables ont souligné la complémentarité des simulations de méso-échelle avec celles de micro-échelles, les premières permettant de définir le seuil limite d'un scénario en termes de potentiel d'atténuation, et les secondes offrant la possibilité d'estimer l'impact d'une solution sur l'ambiance climatique d'une zone d'intérêt spécifique comme une rue ou une place. Ils ont également mis en avant le rôle positif de la végétation de jour comme de nuit, ainsi que l'ambivalence de certaines solutions qui n'exercent pas le même effet en fonction du moment de la journée ou de la variable considérée. En outre, les conclusions issues des différents scénarios démontrent que la combinaison de plusieurs solutions apparaît comme le meilleur moyen de parvenir à un compromis entre atténuation du stress thermique diurne et préservation du confort thermique nocturne.

La deuxième partie du chapitre a traité de l'impact de la densification verticale sur le confort thermique afin de vérifier si ce mode de construction était en mesure de représenter un compromis entre la lutte contre le stress thermique, la nécessité de limiter l'étalement urbain et le besoin de production de logements neufs. Trois scénarios impliquant une augmentation plus ou moins importante de la hauteur du bâti ont été éprouvés à micro-échelle sur la zone Malraux. Les résultats ont montré que la surélévation pouvait potentiellement constituer un moyen de concilier enjeux climatiques et urbanistiques, à condition toutefois de ne pas dépasser l'ajout d'un ou deux étages supplémentaires et de s'adapter aux paramètres géométriques et aux usages de la zone concernée, et ceci afin de ne pas aggraver de manière significative l'ICU nocturne ou même le stress thermique diurne.

La troisième et dernière partie de ce chapitre a, quant à elle, porté sur l'évaluation de l'impact d'un futur projet d'aménagement, à savoir le projet Deux Rives, sur l'ambiance climatique d'une zone vouée à accueillir quatre nouveaux quartiers, dont Starlette qui a constitué l'objet de cette étude. Après avoir fourni un état des lieux de la zone concernée par l'aménagement et des caractéristiques du projet urbain, deux scénarios, l'un reprenant le quartier Starlette tel que conçu par le projet Deux Rives et l'autre simulant un parc urbain, ont été modélisés à l'échelle microclimatique afin de déterminer dans quelle mesure chacun d'eux modifiait le confort thermique par rapport à la situation initiale. Le diagnostic établi a permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients de chacune des situations modélisées, et vise ainsi à servir d'exemple à la mise en place d'une démarche d'évaluation applicable à tous les futurs projets aménagements.

Conclusion générale

Bilan

Un des objectifs majeurs de cette thèse consistait à évaluer la contribution de plusieurs facteurs, en particulier la végétation et la géométrie urbaine, à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain (ICU) afin d'établir des préconisations à destination des urbanistes et aménageurs de la collectivité de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS). Parvenir à un tel objectif impliquait à la fois d'identifier les spécificités du phénomène à Strasbourg et de disposer d'outils fiables permettant de le mesurer et de le modéliser à différentes échelles.

Pour atteindre cet objectif, il était avant tout nécessaire de bien connaître les caractéristiques de l'ICU strasbourgeois. **Dans une première partie**, nous avons donc dressé un état des lieux le plus complet possible du phénomène à partir d'une **base de données** alimentée par les résultats de trois **expérimentations de terrain** : la première a été réalisée durant l'été 1999 au travers du projet PRIMEQUAL, et a permis d'établir une première cartographie de l'ICU strasbourgeois pour une nuit estivale. La seconde a été menée au cours de l'été 2002 dans le cadre du projet RECLUS. Elle s'est intéressée aux processus physiques à l'origine de l'ICU et a notamment abouti à la création du modèle microclimatique LASER/F, développé au sein de l'équipe TRIO du laboratoire ICube. Enfin, l'expérimentation INTERREG IV menée entre 2013 et 2016 est venue compléter les deux précédentes. Première campagne de mesures à s'être déroulée sur plusieurs années, elle s'est appuyée sur un réseau d'une vingtaine de stations météorologiques provenant d'ICube, d'ATMO Grand Est et de Météo France. Cette expérimentation visait à étudier l'ICU et les bilans radiatifs et d'énergie en milieu urbain, avec une attention particulière portée au rôle exercé par la végétation. Ce sont donc surtout les données issues de la campagne INTERREG IV qui vont permettre d'identifier et de décrire l'ICU eurométropolitain.

Nous avons ainsi démarré cette étude de l'ICU par une analyse de son **évolution temporelle** à plusieurs pas de temps. Elle a reposé sur trois sites strasbourgeois, qui sont d'une part les stations DRIRE et Clémenceau, représentatives du milieu urbain, et d'autre part le Jardin Botanique, assimilable à un parc. Le site d'Entzheim représente quant à lui la station rurale de référence. En premier lieu, l'examen de la dynamique journalière de l'ICU lors de belles journées estivales a confirmé le caractère principalement nocturne du phénomène : l'analyse de l'intensité moyenne horaire de l'ICU a en effet révélé qu'il atteint son paroxysme aux alentours de minuit, avec une valeur maximale moyenne de plus de 5°C pour les stations DRIRE et Clémenceau. La question de savoir si un tel comportement et de telles intensités de l'ICU pouvaient être généralisés à l'ensemble de l'année nous a ensuite conduits à en étudier la **variabilité saisonnière**. Or effectuer des comparaisons de l'ICU sous différentes saisons n'est pas exempt de biais, du fait des changements saisonniers de la durée du jour et de la nuit. Afin de s'affranchir de ces variations saisonnières, nous avons appliqué une normalisation de l'axe temporel où les périodes diurne et nocturne ont chacune la même durée. Par le biais de cette méthode, nous avons exposé les dynamiques saisonnières respectives de l'ICU de la DRIRE et du Jardin Botanique. Par ailleurs, la dépendance du phénomène aux changements saisonniers de couverture végétale au niveau de la station d'Entzheim a également été mise en évidence, soulignant donc à la fois l'importance du choix de la station rurale de référence et le rôle prépondérant de la végétation sur l'ICU saisonnier. L'étude des fréquences d'apparition de l'ICU ayant montré que de fortes intensités du phénomène peuvent survenir en toutes saisons, nous avons examiné ensuite le comportement du phénomène **sous différents types de temps**. **L'impact de la nébulosité et de la vitesse moyenne du vent** sur l'ICU a ainsi été évalué, ainsi que l'évolution de son intensité durant deux **successions de belles journées estivales**. L'intérêt d'étudier de telles successions réside dans le fait que leur occurrence augmente dans le contexte du réchauffement climatique actuel, aggravant dès lors l'ICU et ses conséquences : l'analyse de ces périodes de beau temps a en effet non seulement démontré que l'ICU tend à s'intensifier au fil

des jours, mais aussi que de fortes intensités du phénomène peuvent, sous certaines conditions, se maintenir après la succession de belles journées. Atténuer l'ICU devient donc un enjeu de plus en plus crucial puisque de telles périodes sont amenées à se produire plus fréquemment dans les décennies à venir.

Les investigations sur l'ICU strasbourgeois se sont poursuivies avec l'étude de sa **structure spatiale**. Cette section s'est essentiellement appuyée sur **l'utilisation des Local Climate Zones (LCZ)**. Une **tentative de classification LCZ** de l'EMS a donc été réalisée dans le cadre d'un mémoire de Master 2. Obtenue à partir d'une approche vectorielle, elle a permis de relier chaque site du réseau INTERREG IV à un type de LCZ. Par conséquent, nous avons cherché à associer chaque classe LCZ à un comportement et une plage d'intensités de l'ICU. Cependant, étant donné que les stations météorologiques ont été implantées avant le démarrage des travaux sur les LCZ, elles ne recouvrent malheureusement pas l'ensemble des types présents au sein de l'EMS. La diversité des sites d'étude nous a tout de même permis d'effectuer des comparaisons entre cinq classes de LCZ sur les treize répertoriées. Conformément aux résultats attendus, ces comparaisons ont révélé une importante **hétérogénéité entre les différents types de LCZ** : l'intensité de l'ICU augmente ainsi avec la hauteur et la densité du bâti, atteignant de ce fait des valeurs moyennes élevées dans les LCZ 2. D'ailleurs, le grand nombre de stations rattachées à ce type nous a donné l'occasion de vérifier s'il subsistait une **variabilité au sein d'une seule et même classe de LCZ** : à l'aide de la normalisation de l'axe temporel utilisée précédemment, nous avons pu comparer les cinétiques respectives de l'ICU affectant les différents sites classés en LCZ 2. Ces comparaisons ont révélé qu'hormis le cas très particulier des stations assimilables à un parc urbain, les sites appartenant à des LCZ 2 conservaient une dynamique relativement similaire. Ces résultats ont de ce fait contribué à démontrer la cohérence des LCZ, ainsi qu'à mettre en évidence le potentiel d'atténuation de la végétation au sein de zones pourtant favorables à de fortes intensités d'ICU. Enfin, les **relations entre ICU et paramètres définissant les LCZ** ont permis d'aboutir à une **cartographie de l'ICU maximal moyen** sur l'ensemble de l'EMS. À l'issue de cette première partie, nous disposons dès lors d'un **état des lieux détaillé de l'ICU strasbourgeois**. De plus, les données de terrain collectées au fil des expérimentations sont suffisantes pour envisager le test et la validation de modèles numériques.

L'exploitation de la base de données nous a ainsi permis de définir la structure spatiale de l'ICU strasbourgeois à l'échelle de la ville. Or établir des préconisations détaillées sur des zones restreintes nécessite également de passer à des échelles bien plus fines que celle de l'agglomération, comme celles du quartier ou de la rue. Étudier le phénomène d'ICU à plusieurs échelles spatiales sur l'ensemble du territoire de l'EMS impliquait donc de recourir à la modélisation numérique. Par conséquent, **la deuxième partie** de la thèse a porté sur la **modélisation de zones urbaines à différentes échelles**, et plus particulièrement sur la réalisation d'un **couplage entre modèles méso et microclimatiques**. Ce couplage consiste à utiliser les sorties d'un modèle de méso-échelle pour forcer des modèles de micro-échelle. Il serait alors possible de simuler une agglomération entière tout en modélisant à un niveau de détail élevé n'importe quelle zone d'intérêt.

La mise en place d'une telle démarche exige avant tout de déterminer le degré de confiance qu'il est possible d'accorder aux modèles sur la pertinence de leurs résultats : une phase de **contrôle et de validation des différents modèles employés** au cours de cette thèse a donc été effectuée. En premier lieu, nous avons présenté ces modèles en détail : d'une part, les simulations à méso-échelle ont été effectuées par le système composé du modèle atmosphérique **Méso-NH/SURFEX** et du schéma de surface SURFEX. D'autre part, le modèle thermo-radiatif **LASER/F** et le modèle non hydrostatique **ENVI-Met** ont été employés pour les simulations à micro-échelle. L'utilisation conjointe d'ENVI-Met et LASER/F permet d'estimer la capacité de ce dernier à simuler les indices de confort tout en bénéficiant de l'apport d'un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics) disposant de modules complets de la végétation et du confort thermique. L'évaluation des modèles a ensuite été effectuée à l'aide des stations météorologiques du réseau INTERREG IV. Les résultats des modèles

microclimatiques ont notamment été confrontés aux données du parc du Jardin du Palais Universitaire à Strasbourg pour un grand nombre de variables, allant des composantes du bilan d'énergie aux indices de confort, en passant par les variables climatiques de base. LASER/F et ENVI-Met ont chacun présenté leurs propres forces et des faiblesses, et de ce fait se sont révélés complémentaires : en sa qualité de modèle thermo-radiatif, LASER/F simule particulièrement bien les flux de chaleur turbulents. En tant que modèle CFD, ENVI-Met fournit quant à lui des résultats convaincants en ce qui concerne les variables climatiques. Par ailleurs, LASER/F et ENVI-Met sont tous deux parvenus à modéliser les indices de confort avec un haut degré de pertinence, en particulier l'UTCI (Universal Thermal Comfort Index).

Dans un second temps, le **couplage entre les modèles de méso et de micro-échelles** a été appliqué sur le quartier Malraux de Strasbourg lors de la période caniculaire du 28 juin au 2 juillet 2015, pour laquelle une simulation avec le système Méso-NH/SURFEX avait déjà été effectuée dans le cadre d'un contrat entre l'ARS, Météo France et l'EMS. Pour ce faire, **les résultats de Méso-NH/SURFEX ont été comparés avec ceux de LASER/F et d'ENVI-Met** à l'échelle d'une maille commune. Il s'agissait de vérifier que les sorties des modèles microclimatiques restent cohérentes avec celles du système mésoclimatique. Effectuées sur l'ensemble des composantes du bilan d'énergie et sur l'UTCI, les comparaisons ont montré que la plupart des résultats répondent à cette exigence. Quelques divergences ont tout de même été constatées. Or aucune ne remet en cause la faisabilité du couplage entre méso et micro-échelles. En effet, la plupart des différences constatées résultent du fait qu'en sa qualité de modèle méso-climatique, Méso-NH/SURFEX n'est pas en mesure d'atteindre un niveau de détail géométrique suffisamment haut pour distinguer l'ensemble des processus se produisant à l'échelle d'un quartier ou d'une rue, illustrant ainsi tout l'intérêt de la chaîne de simulation. Ces résultats ont donc pleinement démontré la faisabilité et la pertinence d'une telle démarche.

Une fois la cohérence de la chaîne de simulation éprouvée, il restait à vérifier que ses sorties soient en accord avec des mesures réelles. La **séquence de simulation a donc été confrontée à des données de terrain** issues d'une campagne de mesures sur le quartier Malraux réalisée spécialement à cet effet en juillet 2021. Deux simulations ont été réalisées avec LASER/F et ENVI-Met à partir de deux fichiers de forçage distincts : le premier a été construit à l'aide des sorties de Méso-NH/SURFEX et reposait donc sur la démarche de couplage précédemment exposée. À l'opposé, le second a été conçu à partir de données de terrain. Le but était de vérifier si les résultats obtenus à partir d'un forçage élaboré à partir des sorties d'un modèle mésoclimatique soutenaient la comparaison en termes de performance avec ceux issus d'un forçage construit via des mesures réelles. Les comparaisons ont été réalisées d'une part pour les **principales variables climatiques** (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent), et d'autre part pour l'UTCI. Dans l'ensemble, la chaîne de simulation a réussi à bien reproduire le comportement des variables climatiques, en particulier celui de la température de l'air. S'agissant de l'UTCI, les résultats de LASER/F obtenus à partir du forçage Méso-NH/SURFEX soutiennent la comparaison avec ceux issus de la simulation forcée par les données réelles. D'ailleurs, ils se sont même avérés fréquemment plus pertinents que ces derniers. Les résultats issus d'ENVI-Met ont quant à eux malheureusement souffert d'une sous-évaluation de la température moyenne radiante (TMRT) propre à cette version du logiciel, ce qui a entraîné de facto une sous-estimation de l'indice de confort. Au terme de cette seconde partie, nous avons donc mis au point une chaîne de simulation cohérente et pertinente, qui constitue un **outil de modélisation pouvant être utilisé à des fins d'application** dans le secteur de l'urbanisme et de l'aménagement.

L'obtention d'une chaîne de simulation capable de modéliser n'importe quelle zone de l'EMS, y compris celles pour lesquelles il n'existe aucune donnée de terrain, nous a donc permis d'évaluer l'impact de scénarios d'aménagement sur l'ICU et le confort thermique dans **la troisième et dernière partie** de cette thèse. À partir des résultats de ces scénarios, l'objectif était d'aboutir à des **préconisations à la fois efficaces en termes d'amélioration du confort thermique et tenant compte des contraintes urbanistiques** auxquelles sont confrontées les agglomérations.

Dans un premier temps, nous avons brièvement résumé les **politiques publiques d'urbanisme et de développement durable** actuellement appliquées au sein de l'EMS et dont les scénarios d'aménagement doivent tenir compte. Nous avons ensuite testé le **potentiel d'atténuation de plusieurs solutions de remédiation** exercé sur l'indice de confort UTCI, et dans une moindre mesure sur la température de l'air. Trois scénarios distincts ont été appliqués : le premier s'est appuyé sur la **végétalisation**, le second a augmenté le **pouvoir réfléchissant des matériaux** composant le bâti, et le troisième a réalisé une **combinaison** de ces deux solutions. Ces scénarios ont été d'une part modélisés **à méso-échelle** avec le système Méso-NH/SURFEX, et d'autre part **à micro-échelle** avec le modèle thermo-radiatif LASER/F sur la zone Malraux. La période de simulation est également celle allant du 28 juin au 2 juillet 2015. Les caractéristiques de ces scénarios ont été adaptées à l'échelle spatiale : ceux effectués à l'échelle mésoclimatique ont ainsi été appliqués de manière uniforme dans chacune des mailles composant le domaine de simulation, avec notamment une augmentation fixe de 20% de leur fraction végétale. En ce qui concerne l'échelle microclimatique, les scénarios ont été adaptés à la géométrie réelle du secteur Malraux : de ce fait, l'ajout de surface végétale n'a été effectué que là où c'était possible. Les résultats obtenus pour les deux variables ont illustré la complémentarité des simulations de méso-échelle avec celles de micro-échelle : en appliquant des scénarios exagérés en termes de végétalisation, les modélisations mésoclimatiques ont ainsi permis de définir le seuil limite d'un scénario en termes de potentiel d'atténuation. Grâce à leur prise en compte de la géométrie 3D à un haut niveau de détail, les modélisations microclimatiques ont quant à elles permis d'estimer l'impact d'une solution sur l'ambiance climatique de la zone dans sa configuration réelle. Les résultats ont ainsi mis en évidence **l'effet positif de la végétalisation** tout en soulignant son **efficacité limitée au-delà d'un certain seuil**. D'autre part **l'ambivalence de certaines solutions**, en particulier celles impliquant des matériaux réfléchissants, a également été démontrée : l'effet d'une mesure de remédiation variera ainsi non seulement selon la variable qu'on cherche à atténuer, mais aussi selon le moment de la journée considéré. Dès lors, les résultats ont bien démontré que tout moyen de remédiation finit inévitablement par atteindre ses limites : par conséquent, la **combinaison de plusieurs solutions** constitue le meilleur compromis pour l'atténuation du stress thermique aussi bien de jour que de nuit.

La mise en place de solutions d'atténuation n'est cependant pas la seule problématique à laquelle sont confrontées les agglomérations face à l'ICU et au stress thermique. Au regard des enjeux actuels d'urbanisme et d'habitat, l'application de certaines politiques d'aménagement est en effet inévitable, même si celles-ci présentent un risque d'exacerbation du stress thermique, notamment en période nocturne. Dans ce contexte, nous avons donc cherché à estimer **l'impact d'une densification verticale sur l'ICU et le confort thermique** afin de vérifier s'il était possible d'aboutir à un compromis entre le fait de limiter l'exacerbation du stress thermique et la nécessité de produire des logements neufs. **Trois scénarios d'élévation du bâti** ont ainsi été appliqués au quartier Malraux, entraînant respectivement l'ajout d'un étage supplémentaire, l'augmentation de chaque bâtiment à sa propre hauteur maximale réglementaire telle que définie par le Plan Local d'Urbanisme (PLU), et une hauteur fixée à 60 m pour l'ensemble du parc bâti. Au vu des résultats, la surélévation s'est révélée être un moyen de concilier densification urbaine et enjeux climatiques, sous réserve toutefois d'être appliquée avec parcimonie : si l'ajout d'un étage supplémentaire n'a effectivement entraîné aucune dégradation significative de l'UTCI, l'augmentation de l'ensemble du bâti à 60 m de hauteur a en revanche nettement exacerbé le stress thermique ressenti. De plus, les analyses ont montré que les facteurs géométriques doivent être pris en considération : l'étude de canyons urbains de différentes orientations a par exemple montré que selon la géométrie de la rue, même une surélévation modérée peut potentiellement déboucher sur une augmentation de la durée d'exposition à des niveaux élevés de stress thermique. Enfin, notre analyse a également fait ressortir la nécessité de tenir compte de l'usage du site d'étude : les contraintes inhérentes à une zone résidentielle diffèrent en effet nettement de celles impactant un site commercial ou de loisirs, relativement peu habités.

Même si la rareté du foncier encore disponible à la construction limite la densification horizontale, il reste toujours des projets d'aménagement intra-muros de grande envergure actuellement en cours de

mise en œuvre au sein de l'EMS, dont les conséquences sur l'ICU et le stress thermique nécessitent d'être quantifiées. C'est pourquoi cette partie s'est achevée par **l'évaluation de l'impact d'un projet d'aménagement en cours de réalisation** à Strasbourg, à savoir le projet « Deux-Rives ». L'objectif était de proposer une démarche d'évaluation s'appuyant sur la modélisation numérique et pouvant s'appliquer à tous les futurs projets urbains. Pour commencer, un **état des lieux de la zone d'étude et du projet Deux-Rives** a été dressé : constituant le principal projet urbain mené dans la ville de Strasbourg, le secteur Deux-Rives est voué à accueillir quatre nouveaux quartiers, dont Starlette qui a fait l'objet de cette étude. **Deux scénarios d'aménagement** ont ensuite été modélisés à l'échelle microclimatique : le premier intègre la morphologie du quartier Starlette telle que définie par le Plan Guide établi en 2021, tandis que le second intègre un petit parc urbain qui avait été proposé lors de la phase de conception du projet. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les impacts de chaque scénario modélisé sur le microclimat local, constituant ainsi un outil d'aide à la décision prometteur lorsqu'il s'agit d'effectuer un choix entre plusieurs possibilités d'aménagements.

Perspectives

En cette fin de thèse, nous pouvons affirmer que les objectifs fixés au départ ont été atteints. Or ces travaux ne peuvent absolument pas être considérés comme exhaustifs, aussi bien sur la partie consacrée à la **recherche fondamentale** (chapitres 1 et 2) que sur celle dédiée à des problématiques de **recherche appliquée** (chapitre 3). Loin de clore la problématique du rôle de différents facteurs sur l'îlot de chaleur et le confort thermique urbains, cette thèse ouvre au contraire plusieurs perspectives de recherche sur ce sujet.

Une liste non exhaustive de perspectives est présentée ci-dessous. En tenant compte des outils et moyens à notre disposition, nous pouvons considérer que certaines d'entre elles sont d'ores et déjà à notre portée. En revanche, d'autres perspectives abordées ici s'avèrent plus difficilement envisageables dans l'immédiat, du fait des coûts engendrés et de l'absence de protocole de mise en œuvre bien défini. Ces perspectives sont tout de même développées ici en tant qu'idées et pistes de recherche à développer, tout en ayant conscience des limites induites par les coûts et les moyens techniques.

Plusieurs perspectives nous sont toutefois déjà accessibles dans l'immédiat. Dans un premier temps, il sera ainsi nécessaire de **sérieusement approfondir l'étude de l'impact de la géométrie urbaine sur l'ambiance climatique**. Les analyses conduites dans le cadre de cette thèse ont mis en évidence que le microclimat local, et les phénomènes en découlant comme l'ICU, dépendent en effet de nombreux facteurs géométriques, comme par exemple la densité de bâti, le rapport d'aspect (Hauteur des bâtiments/largeur des rues) et l'orientation des rues. D'ailleurs, l'étude menée sur cette dernière au cours des chapitres 2 et 3 de la thèse démontre bien qu'aucun de ces facteurs ne peut expliquer à lui seul le microclimat local : c'est la **combinaison** de ces différents paramètres qui va contribuer à la mise en place de l'ambiance climatique ressentie au sein d'une zone donnée. Dès lors, devant le nombre considérable de combinaisons possibles et de facteurs supplémentaires à prendre en compte (par exemple la présence ou non d'arbres au sein de la rue étudiée), force est de constater que chaque cas s'avère unique et qu'il est **impossible de fournir des préconisations pouvant s'appliquer à toutes les situations**. Par conséquent, mieux comprendre le rôle des différents paramètres géométriques, et de ce fait être en capacité de proposer des préconisations adaptées au cas par cas, nécessite de **tester une multitude de combinaisons** : cela implique donc forcément de recourir à la modélisation numérique. L'emploi du **couplage entre modèles de méso et de micro-échelles** apparaît particulièrement pertinent dans le cadre de cette perspective, puisqu'il permettrait de simuler n'importe quelle zone de l'agglomération (et donc de recouvrir un très grand nombre de combinaisons géométriques) tout en prenant en compte l'ensemble de la géométrie 3D avec un haut niveau de détail.

Au-delà de la géométrie urbaine, la modélisation permettra également **d'étudier davantage la végétation et son rôle dans la création de microclimats urbains**. Un des premiers aspects qui pourrait

être développé concerne d'ailleurs le lien entre végétation arborée et géométrie des rues : quelle influence exerce par exemple l'orientation ou le rapport H/W sur le potentiel des arbres ? Comment optimiser la plantation d'arbres en fonction de la configuration de la rue ? Là encore, il existe un grand nombre de combinaisons possibles, et il n'est donc pas possible d'effectuer des préconisations pouvant s'appliquer à tous les cas de figure. À l'instar de la géométrie urbaine, approfondir l'étude du rôle de la végétation nécessite de réaliser de nombreuses simulations, dont les conclusions viendraient alimenter des politiques publiques incitant à la végétalisation comme le Plan Canopée de la Ville de Strasbourg.

Par ailleurs, la question de **l'influence des murs et toits végétalisés** n'a pas été abordée dans cette thèse. De telles structures sont effectivement encore rares au sein de l'EMS. De plus, de nombreux travaux ont montré que leur influence sur le confort thermique pédestre reste négligeable, surtout celle des toits. Les murs et toits végétalisés suscitent toutefois de plus en plus d'intérêt, notamment en raison de leur effet positif sur le confort thermique intérieur. À l'aide des outils de modélisation à notre disposition, il serait tout à fait envisageable d'intégrer ces structures dans des scénarios de végétalisation, et de déterminer leur impact sur le confort thermique extérieur, et surtout intérieur. Des résultats convaincants pourraient dès lors justifier d'avoir davantage recours à ces structures végétalisées au sein de l'EMS.

Cette thèse est donc loin d'avoir répondu à l'ensemble des questions concernant le rôle joué par la géométrie urbaine et la végétation dans la création de microclimats urbains. Dans le contexte du réchauffement climatique global, un des aspects qui nécessitera d'être creusé concerne la **détermination du potentiel rafraîchissant de différentes essences d'arbres**. Certaines espèces actuellement présentes sous nos latitudes auront des difficultés à se maintenir sous les conditions climatiques attendues à l'horizon 2050, tandis que d'autres essences, issues notamment des zones méditerranéennes, devraient parvenir à s'acclimater. Il semble de ce fait essentiel de déterminer à quel point l'influence d'un arbre urbain sur l'ambiance climatique varie d'une essence à l'autre, ainsi que d'intégrer ces caractéristiques au sein des modèles microclimatiques. C'est dans cet esprit qu'a été lancé le projet de recherche **ANR TIR4sTREEt** (Thermal InfraRed for Street Trees), démarré en 2022 pour une échéance prévue fin 2025. Ce projet a pour principal objectif d'étudier l'influence de trois essences d'arbres d'alignement sur le confort thermique au sein de trois rues strasbourgeoises. Dès lors, il sera possible de déterminer les différences entre ces trois espèces en termes de potentiel rafraîchissant, ainsi que d'intégrer ces résultats au sein de modèles microclimatiques comme LASER/F afin d'améliorer la simulation du comportement de l'arbre en milieu urbain. Les conclusions de ces études fourniront des informations essentielles dans le choix de l'essence d'arbre la plus adaptée aux conditions climatiques futures à Strasbourg.

Cette focalisation sur la végétation arborée ne doit cependant pas faire oublier qu'il s'avère **impossible d'augmenter la quantité d'arbres partout en ville**. En effet, la configuration de certaines rues ou places ne se prête pas du tout à la plantation de végétation arborée. Cette incapacité à accueillir des arbres peut concerner des zones très fréquentées et soumises à de hauts niveaux de stress thermique. Dans ces lieux, il s'agit par conséquent **d'envisager la mise en place d'autres solutions capables de dispenser suffisamment d'ombre** pour atténuer le stress thermique. Par exemple, les toiles d'ombrage, très utilisées dans les pays méditerranéens, ou encore des structures en bois pouvant accueillir de la végétation constituent des moyens alternatifs pouvant potentiellement se substituer aux arbres là où il n'est pas possible d'en planter. D'ailleurs, au cours des derniers étés, plusieurs structures végétales de ce type ont été installées à Strasbourg au niveau de zones piétonnes dénuées d'arbres. Il apparaît alors intéressant d'évaluer dans quelle mesure ces structures artificielles peuvent représenter une solution efficace de remédiation à la chaleur. Des expérimentations de terrain réalisées en été, lorsque ces aménagements sont mis en place, constitueraient la première étape pour estimer leur potentiel d'amélioration du confort thermique diurne. La simulation de ces installations par le biais de modèles de micro-échelle permettrait ensuite de cibler les endroits où de telles structures s'avèreraient les plus nécessaires et les plus pertinentes.

Le **potentiel d'atténuation du stress thermique par le biais de la diffusion de vapeur d'eau** mériterait également qu'on s'y attarde, dans la mesure où il s'agit d'une solution de remédiation à la chaleur de plus en plus sollicitée par les villes. Au niveau des structures végétales artificielles installées en été, la collectivité a également placé des brumisateurs afin de procurer de la fraîcheur aux piétons. À travers une station météorologique située à proximité d'une cascade artificielle, la campagne de mesures menée durant l'été 2021 sur le secteur Malraux a justement permis de révéler le potentiel d'atténuation du stress thermique des brumisateurs, toutefois de manière trop sommaire. Là encore, la mise en place d'expérimentations de terrain permettrait de **quantifier cet effet rafraîchissant**, et par la suite de le **simuler à l'aide de modèles climatiques**. Dès lors, nous serions en mesure d'établir de nouvelles préconisations à destination des collectivités.

Une autre suite à donner à cette thèse sera d'approfondir la partie consacrée aux **LCZ**, restée exploratoire au sein de ces travaux. La première partie de la thèse a effectivement démontré le potentiel de cet outil dans la spatialisation de l'ICU, sans toutefois pouvoir pleinement l'exploiter. D'une part, huit des treize types de LCZ répertoriés par la classification LCZ de l'EMS n'ont pas pu être étudiés, faute de stations leur étant rattachées. D'autre part, certaines classes de LCZ ne disposent que d'un seul site de mesures. Ces limites résultent essentiellement de la **mise en place du réseau INTERREG IV plusieurs années avant le démarrage des travaux dédiés aux LCZ**, l'emplacement des stations n'ayant de ce fait pas été choisi selon ce critère.

Plusieurs pistes prennent forme suite à l'exposition de ces limites, comme celle d'**approfondir l'analyse de la variabilité inter-LCZ**. L'installation d'un **nouveau réseau de stations météorologiques fixes**, adapté à la classification LCZ, pourrait contribuer à améliorer cet aspect : disposer de données climatiques pour chaque classe de LCZ permettrait en effet **d'affiner la connaissance de la configuration spatiale de l'ICU**, et de mieux déterminer dans quelle mesure chaque paramètre définissant les LCZ influence son intensité et son comportement. Dans l'idéal, les stations recouvriraient l'ensemble des types présents au sein de la classification LCZ de l'EMS. Néanmoins, un tel réseau s'avère **très coûteux** en termes de mise en place et de maintenance à long terme. Il s'agirait donc d'assurer en priorité la représentation des types n'ayant pas pu être analysés au sein de cette thèse, comme les LCZ 4 ou les LCZ 5.

Face au coût élevé d'un grand nombre de stations fixes, les **mesures mobiles** constituent une alternative prometteuse. Nous disposons désormais d'un **dispositif de mesures portatif** conçu par l'équipe TRIO en 2021, adapté aux itinéraires mobiles et dont la fiabilité et l'intérêt ont pu être démontrés lors de la campagne de mesures réalisée sur le quartier Malraux. La réalisation de transects à vélo offre en effet la possibilité de **recouvrir un grand nombre de LCZ** tout en réalisant des itinéraires **à l'intérieur d'une même LCZ**. En plus de fournir un aperçu de l'hétérogénéité inter-LCZ sur plusieurs quartiers, elles permettraient ainsi de comparer plusieurs LCZ appartenant à une même classe, mais qui se distingueraient par exemple par leur fraction de surface végétale. Il serait également possible de déterminer l'influence qu'exercent deux LCZ frontalières l'une sur l'autre.

La plupart des travaux consacrés aux LCZ abordent la relation entre LCZ et microclimat urbain uniquement sous l'angle de la température de l'air. Or appréhender le **lien entre LCZ et confort thermique** représenterait une perspective d'étude prometteuse : idéalement, les résultats de telles analyses permettraient de relier une classe LCZ à une plage d'intensités de l'UTCI, du PET ou de tout autre indice de confort jugé pertinent. L'installation de globes noirs ou gris sur les sites composant un réseau de mesures fixe fournirait déjà un aperçu de la variabilité spatiale du confort thermique à **l'échelle de l'agglomération**. Néanmoins, l'étude des variations du confort thermique d'une zone correspondant à un quartier nécessiterait alors d'installer un grand nombre de stations fixes : en plus d'être très coûteuse, cette option ne permettrait même pas d'obtenir tous les détails de l'ambiance climatique du secteur étudié. À **l'échelle du quartier ou d'une rue**, l'utilisation de **mesures mobiles** représente donc une piste beaucoup plus avantageuse : par le biais des itinéraires à vélo, nous pourrions ainsi obtenir les variations du confort thermique aussi bien entre plusieurs LCZ qu'au sein d'un seul polygone LCZ.

Cependant, cela impliquerait tout d'abord une **amélioration du dispositif de mesures portatif**, qui devra être complété par un capteur mesurant la température du globe, nécessaire à l'obtention de la TMRT. L'utilisation de ce dispositif pourrait être couplée avec celle des chariots, qui permettraient d'obtenir la vitesse du vent, indispensable au calcul de l'UTCI et du PET.

Par ailleurs, il serait encore possible **d'améliorer la classification LCZ de l'EMS**. Actuellement, chaque LCZ repose sur six paramètres parmi les dix qui ont été définis par [Stewart & Oke \(2012\)](#). Compte tenu de l'état actuel de nos connaissances et des données à notre disposition, des travaux complémentaires pourraient permettre d'acquérir jusqu'à deux paramètres supplémentaires, à savoir le rapport d'aspect et la rugosité de terrain. L'ajout de ces paramètres pourrait améliorer significativement la pertinence de la classification, d'autant plus que les parcs urbains font partie des sites pour lesquels l'attribution d'une classe LCZ s'était révélée problématique.

Les différents scénarios d'aménagement éprouvés ont également souligné la nécessité de tenir compte du **confort thermique intérieur** dans l'élaboration de mesures de remédiation. Cette thématique n'a pas été directement abordée lors de cette thèse puisqu'elle dépassait le cadre de nos travaux. Toutefois, climatisation. L'étude du confort thermique extérieur et la prise en compte de l'usage d'une zone urbaine ont également mis en évidence son importance : certaines mesures de remédiation, comme l'augmentation du pouvoir réfléchissant des matériaux de construction, se sont ainsi révélées problématiques en période diurne, du fait de l'augmentation du stress thermique pédestre qu'elles engendrent. Or à l'échelle du bâti, l'impact de cette mesure s'avère positif, puisqu'elle limite l'emmagasinement de chaleur par les matériaux de construction, améliorant par conséquent le confort thermique intérieur. D'autant plus que la problématique de l'ICU nocturne affecte principalement les habitants au moment où ils sont chez eux.

À l'instar de son pendant extérieur, le confort thermique intérieur représente une variable complexe à estimer car dépendant de nombreux facteurs. Parmi ces derniers se trouvent **des paramètres extérieurs** (variables climatiques, orientation des rues, densité du bâti...), mais aussi des **variables propres au bâti** (isolation thermique, structure du bâti, propriétés des matériaux de construction...). Une étude détaillée du confort thermique intérieur nécessiterait donc de s'appuyer sur une **expérimentation adaptée**, ainsi que sur des **simulations numériques réalisées par des modèles capables de simuler ces facteurs** et pouvant par la suite être couplés à des modèles climatiques. Une telle action est actuellement déjà envisagée pour le modèle de micro-échelle LASER/F, qui possède un module lui permettant de simuler l'ambiance climatique à l'intérieur d'un bâtiment. Encore à l'état expérimental, ce module pourrait ainsi être grandement amélioré via un tel couplage.

Enfin, l'expérimentation de terrain estivale réalisée sur le quartier Malraux nous a donné l'occasion d'aborder très brièvement et de manière élémentaire la question du **rôle de l'eau dans la création de microclimats urbains**. Ce dernier reste encore mal compris et relativement peu étudié en climatologie urbaine. Au cours de cette thèse, nous avons été ainsi plusieurs fois confrontés à des difficultés d'interprétation résultant justement de notre manque de connaissances sur le comportement de l'eau en milieu urbain. Quelques constats ont tout de même pu être effectués durant la campagne de mesures sur l'effet d'atténuation exercé par la diffusion de vapeur d'eau, ou sur les différences de comportement entre eau courante et stagnante, mais ils n'en restent pas moins descriptifs et très sommaires. Les données relevées lors de cette expérimentation ne nous permettront donc pas de creuser davantage ces aspects.

Une **meilleure compréhension du lien entre eau et microclimat urbain** apparaît cependant cruciale à l'heure où l'EMS cherche à rendre ses nombreux points d'eau plus accessibles aux habitants, dans le but de leur fournir davantage de fraîcheur en été. Cela nécessiterait donc de mener de toutes nouvelles expérimentations de terrain : elles viseraient à mieux cerner l'influence de l'eau sur l'ambiance climatique d'une zone urbaine, notamment par le biais de l'**obtention des composantes des bilans radiatifs et d'énergie de l'eau**. Par la suite, ces informations serviraient à **alimenter des**

modèles numériques qui pourraient alors mieux reproduire les mécanismes physiques liés au rôle de l'eau dans la création de microclimats urbains. À l'avenir, cette perspective devra être abordée lors des prochaines investigations sur la répartition spatiale des indices de confort à Strasbourg. Elle apparaît cependant difficilement envisageable dans l'immédiat, car pour l'instant nous ne disposons pas des moyens (dispositifs de mesure, procédure expérimentale...) nécessaires à sa réalisation.

Contributions

Publications

Cette thèse a fait l'objet des publications suivantes :

Publications dans des journaux

Philipps, N., Landes, T., Kastendeuch, P.P., Najjar G, 2022. Urban Heat Island based on a Local Climate Zone classification: a case study in Strasbourg city, France. *International Journal of Environment and Geomatics*, 9, 4, 57-67.

Philipps, N., Kastendeuch, P.P., Najjar, G., 2020. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 17, 11 p.

Plusieurs articles sont également en cours de rédaction.

Publications dans des congrès internationaux

Philipps, N., Goret, M., Kastendeuch, P.P., Najjar, G., Gourguechon, C., 2022. Modélisation climatique d'une zone urbaine à différentes échelles. 35^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Toulouse, 6-9 juillet 2022, 6 p. (*présentation orale de la publication, prix de la meilleure présentation orale effectuée par un.e doctorant.e*)

Philipps, N., Landes, T., Kastendeuch, P.P., Najjar, G., 2021. Urban Heat Island mapping using Local Climate Zone classification: a case study in Strasbourg city. *International Symposium on Applied Geoinformatics (ISAG)*, Riga, 2-3 December 2021, 3 p. (*présentation orale de la publication*)

Del Pozo, S., Landes, T., Nerry, F., Kastendeuch, P.P., Najjar G., **Philipps, N.**, Lagüela, S., 2021. Evaluation of the seasonal nighttime LST-air temperature discrepancies and their relation to Local Climate Zone (LCZ) in Strasbourg. *Colloque International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXIV*, 8 p.

Philipps, N., Kastendeuch, P.P., Montauban, O., Najjar, G., 2020. Rôle de la végétation et de la géométrie urbaine dans la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain : cas de la ville de Strasbourg. 33^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, 4-7 juillet 2020, 6 p.

Posters

Philipps, N., Goret, M., Kastendeuch, P.P., Najjar, G., 2022. Combining mesoscale and microscale modelling to get a complete claim of climatic models: a case study in Strasbourg city, France. 11th International Conference on Urban Climate (ICUC), Virtual Poster Session, 30 August-1st September 2022. (*présentation orale du poster*)

Encadrements

Plusieurs mémoires ont contribué à cette thèse ou à des projets menés en parallèle :

- Massing, N., 2022. Étude de la vulnérabilité des populations de l'Eurométropole de Strasbourg face au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Mémoire de Master 2 GAED, 81 p.
- Weiss, V., 2022. Étude cartographique de l'îlot de chaleur et de fraîcheur saisonniers dans l'Eurométropole de Strasbourg entre 2013 et 2016. Mémoire de Master 2 GAED, 80 p.
- Brichler, E., 2022. Le confort thermique dans les cours d'école à Strasbourg. Le cas de l'école maternelle de la Musau au Neudorf. Mémoire de Master 1 GAED, 30 p.
- Schott, E., 2021. Étude exploratoire de la vulnérabilité de l'Eurométropole de Strasbourg face à l'îlot de chaleur urbain atmosphérique. Mémoire de Master 2 GAED, 104 p.
- Galand, N., 2021. Cartographie saisonnière de l'îlot de chaleur strasbourgeois. Mémoire de Master 1., 36 p.
- Weiss, V., 2020. Dynamique spatiale de l'îlot de chaleur urbain dans l'Eurométropole de Strasbourg. Mémoire de Master 1 GAED, 57 p.
- Schott, E., 2020. Bioclimatologie et indices de confort en zone urbaine et rurale : climatologie comparative de l'évolution des températures ressenties par l'Homme mesurées par l'indice de confort de température effective nette dans le milieu urbain et rural. Mémoire de Master 1 GAED, 82 p.
- Semina, A., 2019. Adaptation de la ville de Strasbourg au changement climatique : état de l'art de la climatologie urbaine aux collectivités territoriales. Mémoire de Master 1 GAED, 56 p.
- Wiss, J., 2019. Étude comparative des indices de confort simples et rationnels au sein des différents types de zones urbaines : le cas de l'Eurométropole de Strasbourg. Mémoire de Master 1 GAED, 56 p.

Références bibliographiques

- Abd Elraouf, R.A., Elmokadem, A., Megahed, N., Eleinen, O.A., Eltarabily, S., 2022. The impact of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot-humid climate. *Building and Environment*, 225, 109632.
- Abdallah, A.S.H., Mahmoud, R.M.A., 2022. Urban morphology as an adaptation strategy to improve outdoor thermal comfort in urban residential community of new assiut city, Egypt. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103648.
- Abdollahzadeh, N., Bioria, N., 2021. Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. *Frontiers of Architectural Research*, 10, 2, 394-409.
- Acero, J.A., Arrizabalaga, 2016. Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 131, 455-469.
- Agence Technique Départementale Haute Garonne, 2021. Loi climat et résilience : le principe de zero artificialisation nette (ZAN). Retrieved March 2023 from <https://www.atd31.fr/fr/base-doc/urbanisme/loi-climat-et-resilience-le-principe-de-zero-artificialisation-nette-zan.html>
- Alchapar, N., Correa, E.N., 2016. The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid “OASIS” city. *Sustainable Cities and Society*, 27, 1-14.
- Aleksandrowicz, O., Vuckovic, M., Kiesel, K., Mahdavi, A., 2017. Current trends in urban heat island mitigation research: observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*, 21, 1-26.
- Alexander, P.J., Mills, G., 2014. Local Climate classification and Dublin’s urban heat island. *Atmosphere*, 5, 755-774.
- Ali-Toudert, F., 2005. Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate. PhD thesis, University of Freiburg, 224 p.
- Alsaad, H., Hartmann, M., Hilbel, R., Voelker, C., 2022. The potential of facade greening in mitigating the effects of heatwaves in Central European cities. *Building and Environment*, 216, 109021.
- Amorim, M.C.C.T., Dubreuil, V., 2017. Intensity of Urban Heat Islands in tropical and temperate climates. *Climate*, 5, 91, 13 p.
- Ampatzidis, P., Cintolesi, C., Petronio, A., Di Sabatino, S., Kershaw, T., 2022. Evaporating waterbody effects in a simplified urban neighbourhood: A RANS analysis. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 227, 20 p.
- Arifwido, S.D., Tanaka, T., 2015. The characteristics of Urban Heat island in Bangkok, Thailand. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 195, 423-428.
- Arnfield, A.J., 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, 1-26.
- Ayyad, Y.N., Sharples, S., 2019. ENVI-Met validation and sensitivity analysis using field measurements in a hot arid climate. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 329, 012040.
- Bakarman, M., Chang, J., 2015. The influence of height/width ratio on Urban Heat Island in hot-arid climates. *Procedia Engineering*, 118, 101-108.
- Balany, F., Ng, A.W.M., Muttill, N., Muthukumar, S., Wong, M.S., 2020. Green infrastructure as an Urban Heat Island mitigation strategy – A review. *Water*, 12, 3577.
- Balany, F., Muttill, N., Muthukumar, S., Wong, M.S., Ng, A.W.M., 2022. Studying the effect of blue-green infrastructure on microclimate and human thermal comfort in Melbourne’s central business district. *Sustainability*, 14, 9057.

- Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., Garcia-Herrera, R., 2011. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332, 220-224.
- Battista, G., De Lieto Vollaro, E., Oclon, P., De Lieto Vollaro, R., 2023. Effects of urban heat island mitigation strategies in an urban square: A numerical modelling and experimental investigation. *Energy & Buildings*, 282, 112809.
- Bechtel, B., Alexander, P.J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, Linda, Stewart, I., 2015. Mapping Local Climate Zones for a worldwide database of the form and function of cities. *International Journal of Geo-Information*, 4, 199-219.
- Bernard, J., Musy, M., Calmet, I., Bocher, E., Kéramec, P., 2017. Urban heat island temporal and spatial variations: Empirical modeling from geographical and meteorological data. *Building and Environment*, 125, 423-438.
- Bernard, J., Bocher, E., Le Saux Wiederhold, E., Leconte, F., Masson, V., Nous, C., 2022. Estimation of missing building height in OpenStreetMap data: a French case study using GeoClimate 0.0.1. *Geoscientific Model Development*, 15, 19, 7505-7532.
- Boukhelkhal, I., Bourbia, F., 2016. Thermal comfort conditions in outdoor urban spaces: hot dry climate – Ghardaia, Algeria. *Procedia Engineering*, 169, 207-215.
- Blazejczyk, K., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A., 2010. Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Miscellanea Geographica*, 14, 91-102.
- Bottyán, Z., Unger, J., 2003. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 75, 233-243.
- Bouchet-Blancou, G., 2020. Densifier et rénover à l'échelle urbaine par la surélévation ? Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 506 p.
- Bournez, E., 2018. Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 217 p.
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 3, 147-155.
- Bröde, P., Krüger, E.L., Rossi, F.A., Fiala, D., 2012. Predicting urban outdoor thermal comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI – a case study in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 56, 471-480.
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Software and Modelling*, 13, 373-384.
- Cantat, O., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 2, 75-102.
- Cárdenas-Jirón, L.A., Graw, K., Gangwisch, M., Matzarakis, A., 2023. Influence of street configuration on human thermal comfort and benefits for climate-sensitive urban planning in Santiago de Chile. *Urban Climate*, 47, 101361.
- Cerema, 2020. Outils de l'aménagement. Retrieved August 2022 from www.outil2amenagement.cerema.fr
- Chandler, T.J., 1965. *The Climate of London*. Hutchinson. 292 p.
- Changnon, S.A., Kunkel, K.E., Reinke, B.C., 1996. Impacts and responses to the 1995 heatwave: a call to action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1497-1506.
- Chatzidimitriou, A., Axarli, 2017. Street canyon geometry effects on microclimate and comfort: A case study in Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 643-650.
- Chen, Y.-C., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2014. Comparison of mean radiant temperature from field experiment and modelling: a case study in Freiburg, Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 118, 535-551.

Références bibliographiques

- Cheung, H.K.W., 2011. An Urban Heat Island for building and urban design. Phd thesis, University of Manchester, 273 p.
- Chow, W., Roth, M., 2006. Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology*, 26, 2243-2260.
- Conry, P., Sharma, A., Potosniak, M., Leo, L.S., Bensman, E., Hellman, J.J., Fernando, H.J.S., 2015. Chicago's Heat Island and climate change: bridging the scales via dynamical downscaling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54, 1430-1448.
- Cool Roof France, 2021. Fiches techniques. Retrieved March 2023 from <https://www.coolroof-france.com/fr/nos-expertises/nos-solutions-anti-chaueur>
- Cortes, A., Rejuso, A.J., Santos, J.A., Blanco, A., 2022. Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. *Journal of Urban Management*, 11, 1, 97-106.
- Coutts, A., Beringer, J., Tapper, N.J., 2007. Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46, 4, 477-493.
- Crank, P.J., Sailor, D.J., Ban-Weiss, G., Taleghani, M., 2018. Evaluating the ENVI-Met model for suitability in analysis of targeted urban heat mitigation strategies. *Urban Climate*, 26, 188-197.
- De Almeida, C.R., Teodoro, A.C., Gonçalves, A., 2021. Study of the Urban Heat Island (UHI) using remote sensing data/techniques: a systematic review. *Environments*, 8, 10, 105.
- De Hatten, A., 2003. Utilisation d'une approche géostatistique pour la cartographie de l'îlot de chaleur urbain de Strasbourg. Mémoire de DEA, 61 p.
- Deilami, K., Kamruzzaman, Md., Liu, Y., 2018. Urban Heat Island effect: a systematic review of spatio-temporal factors, data, methods and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30-42.
- Del Pozo, S., Landes, T., Nerry, F., Kastendeuch, P., Najjar, G., Philipps, N., Lagüela, S., 2020. UHI estimation based on ASTER and MODIS satellite imagery: first results on Strasbourg city, France. Colloque ISPRS XXIV, Nice, 31 août – 2 septembre 2020, 8 p.
- Del Pozo, S., Landes, T., Nerry, F., Kastendeuch, P., Najjar, G., Philipps, N., Lagüela, S., 2021. Evaluation of the seasonal LST-Air temperature discrepancies and its relation to Local Climate Zones (LCZ) in Strasbourg. Colloque ISPRS XXIV, 8p.
- De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poef, P., Marchadier, C., 2013a. How much air conditioning can increase air temperatures for a city like Paris? *International Journal of Climatology*, 33, 210-227.
- De Munck, C., Lemonsu, A., Masson, V., Le Bras, J., Bonhomme, M., 2018. Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, 23, 260-286.
- De Munck, C., 2013. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse de doctorat, 219 p.
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhave, A.G., Mittal, N., Feliu, E., Faehnle, M., 2014. Mitigating and adapting to climate change: multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107-115.
- Detommaso, H., Costanzo, V., Nocera, F., 2021. Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-Met microclimate models. Results and critical issues. *Urban Climate*, 38, 100895.
- Di Giuseppe, E., Ulpiani, G., Cancellieri, C., Di Perna, C., D'Orazio, M., Zinzi, M., 2021. Numerical modelling and experimental validation of the microclimatic impacts of water mist cooling in urban areas. *Energy & Buildings*, 231, 110638.

- Dimoudi, A., Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the Urban Environment: Microclimate Analysis and Benefits. *Energy and Buildings*, 35, 69-76.
- Direction Urbanisme et Territoires, 2022. La ceinture verte de Strasbourg: développements contemporains 1950-2022. *Carnets de ville*, n°8, 32 p.
- Eastin, M.D., Baber, M., Boucher, A., Di Bari, S., Hubler, R., Stimac-Spalding, B., Winesett, T., 2018. Temporal variability of the Charlotte (Sub) Urban Heat Island. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57, 81-102.
- Eliasson, I., Holmer, B., 1990. Urban heat island circulation in Göteborg, Sweden. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 3, 187-196.
- Eliasson, I., Svensson, M.K., 2003. Spatial air temperature variations and urban land use – a statistical approach. *Meteorological Applications*, 10, 135-149.
- Ellefsen, R., 1991. Mapping and measuring buildings in the canopy layer in ten U.S. cities. *Energy and Buildings*, 16, 1025-1049.
- Erell, E., Williamson T., 2007. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal of Climatology*, 27, 1243-1255.
- Erell, E., Pearlmutter, D., Boneh, D., Kutiel, P.B., 2014. Effect on high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, 10 (P2), 367-386.
- Eurométropole de Strasbourg, 2019a. Plan Climat Air Énergie de l'Eurométropole de Strasbourg. Retrieved October 2022 from <https://www.strasbourg.eu/plans-climat>
- Eurométropole de Strasbourg, 2019b. Avenant au Contrat Local de Santé II Eurométropole de Strasbourg. Juin 2015- juin 2020. 10 p.
- Eurométropole de Strasbourg, 2021a. Plan Local d'Urbanisme de l'Eurométropole de Strasbourg. Retrieved October 2022 from <https://www.strasbourg.eu/plan-local-urbanisme-eurometropole-strasbourg>
- Eurométropole de Strasbourg, 2021b. Présentation de la stratégie de l'habitat de l'Eurométropole de Strasbourg. Dossier de presse, 10 février 2021, 10 p.
- European Commission, 2015. Towards an UE Research and Innovation Policy Agenda for Nature-based Solutions and re-naturing cities: Final report of the Horizon 2020 expert group on “Nature-based solutions and re-naturing cities. Full Version. Publications Office, LU.
- Fahed, J., Kinab, E., Ginestet, S., Adolphe, L., 2020. Impact of urban heat island mitigation measures on microclimate and pedestrian comfort in a dense urban district of Lebanon. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102375.
- Fenner, D., Meier, F., Scherer, D., Polze, A., 2014. Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. *Urban Climate*, 10, 308-331.
- Fischer, L., 2001. Étude de paramètres climatiques pertinents en vue de l'amélioration de la prévision des pointes de pollution par l'ozone dans l'agglomération de Strasbourg. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg I, 152 p.
- Fischer, L., 2005. Phénomènes radiatifs et îlot de chaleur urbain dans l'agglomération de Strasbourg. *Revue Géographique de l'Est*, 45, 99-112.
- Fonticelli, C., 2018. Ce que les politiques de densification font au périurbain francilien. *GREP “Pour”*, 236, 4, 39-46.

Références bibliographiques

- Frantzeskaki, N., 2019. Seven lessons for planning nature-based solutions in cities. *Environmental Science and Policy*, 93, 101-111.
- Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J., 2013. The city and urban heat islands: a review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749-758.
- Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Synnefa, A., Vassilakopoulou, K., Papadopoulou, K., Pavlou, K., Santamouris, M., Papaioannou, M., Lagoudaki, A., 2011. Improving the microclimate in urban areas: a case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research & Technology*, 32, 1, 53-71.
- Gál, T., Skarbit, N., Molnár, G., Gyöngyösi, A.Z., 2018. Weather and climate modelling possibilities using Local Climate Zone concept and observation network in Szeged, Hungary. *International Conference on Urban Climate*, New York, 6-10 August 2018, 5 p.
- Galand, N., 2021. Cartographie saisonnière de l'îlot de chaleur urbain nocturne dans l'Eurométropole de Strasbourg au cours de la période de 2013 à 2016. *Mémoire de Master 1 GAED*, 36 p.
- Gallagher, J., Gill, L.W., McNabola, A., 2012. Numerical modelling of the passive control of air pollution in asymmetrical urban street canyons using refined mesh discretization schemes. *Building and Environment*, 56, 232-240.
- Garcia-Herrera, R., Diaz, J., Trigo, R.M., Luterbacher, J., Fischer, E.M., 2010. A review of the European summer heat wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40, 4, 267-306.
- Gao, J., O'Neill, B.C., 2020. Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. *Nature Communications*, 11, 11p.
- Geletič, J., Lehnert, M., Savić, Milošević, D., 2018. Modelled spatiotemporal variability of outdoor thermal comfort in Local Climate Zones of the city of Brno, Czech Republic. *Science of the Total Environment*, 624, 385-395.
- Giannopoulou, K., Santamouris, M., Livada, I., Georgakis, C., Caouris, Y., 2010. The impact of canyon geometry on intra urban and urban: suburban night temperature differences under warm weather conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 167, 1433-1449.
- Giannopoulou, K., Livada, I., Santamouris, M., Saliari, M., Assimakopoulos, M., Caouris, Y.G., 2011. On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society*, 1, 1, 16-28.
- Gonçalves, A., 2018. Urban cold and heat island in the city of Bragança (Portugal), 2018. *Climate*, 6, 3, 70.
- Goret, M., 2021. Diagnostic de surchauffe Eurométropole de Strasbourg. *Rapport d'étude, Météo France*, 37 p.
- Gourguechon, C., 2018. Classification de données images et vecteur et de nuages de points dans le but d'extraire des zones climatiques types dans des quartiers de Strasbourg. *Mémoire de Projet de Recherche Technologique*, INSA Strasbourg, 55 p.
- Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., 1995. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 4, 873-889.
- Guo, H., Teitelbaum, E., Houchois, N., Bozlar, M., Meggers, F., 2018. Revisiting the use of globe thermometers to estimate radiant temperature in studies of heating and ventilation. *Energy & Buildings*, 180, 83-94.
- Hami, A., Abdi, B., Zarehagi, D., Bin Maulan, S., 2019. Assessing the thermal comfort effect of green spaces: a systematic review of methods, parameters, and plants 'attributes. *Sustainable Cities and Society*, 49, 11p.
- Hathway, E.A., Sharples, S., 2012. The interactions of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: a UK case study. *Building and Environment*, 58, 14-22.

- Heaviside, C., Vardoulakis, S., Cai, X.-M., 2016. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. *Environmental Health*, 15 (Suppl 1), 27, 49-59.
- Heris, M.P., Middel, A., Muller, B., 2020. Impacts of form and design policies on urban microclimate: Assessment of zoning and design guideline choices in urban redevelopment projects. *Landscape and Urban Planning*, 202, 103870.
- Heusinkveld, B.G., Steeneveld, G.J., Van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Holtslag, A.A.M., 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., Gimeno, L., 2008. Advances in urban climate modeling. *Trends and directions in climate research*, 1146, 1, 354-374.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R., Mills, G., 2019. Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, 27, 64-89.
- Hinkel, K.M., Nelson, F.E., Klene, A.E., Bell, J.H., 2003. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *International Journal of Climatology*, 23, 15, 1889-1905.
- Holmer, B., Thorsson, S., Lindén, J., 2013. Evening evapotranspirative cooling in relation to vegetation and urban geometry in the city of Ouagadougou, Burkina Faso. *International Journal of Climatology*, 33, 15, 3089-3105.
- Höppe, P., 1992. A new procedure to determine the mean radiant temperature outdoors. *Wetter und Leben*, 44, 147-151.
- Höppe, P., 1999. The Physiological Equivalent Temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75.
- Howard, L., 1818-1819. The climate of London deduced from meteorological observations at different places in the neighbourhood of the metropolis. Vol I & II.
- Huang, L., Li, J., Zhao, D., Zhu, J., 2008. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 43, 7-17.
- Huttner, S., 2012. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-Met. PhD. Johannes Gutenberg-University Mainz, 147 p.
- Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., Bounoua, L., 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114, 504-513.
- Imran, H.R., Shammass, M.I., Rahman, A., Jacobs, S.J., Ng, A.W.M., Muthukumaran, S., 2021. Causes, modelling and mitigation of Urban Heat Island: A review. *Earth Sciences*, 10, 6, 244-264.
- INSEE, 2016. IRIS. Retrieved August 2022 from <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1523>
- INSEE, 2017. Évolution et structure de la population en 2017. Intercommunalité – Eurométropole de Strasbourg. Retrieved August 2022 from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4515315?sommaire=4515349&geo=EPCI-246700488>
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press.

Références bibliographiques

- Jacob, A., 2016. Étude des températures de surface en zone urbaine – mesures, modélisation et tentative de validation sur la rue de l’Argonne. Mémoire de Master 2 GE, 76 p.
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., Jamei, Y., 2016. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1002-1017.
- Jamei, E., Ossen, D.R., Rajagopalan, P., 2017. Investigating the effect of urban configurations on the variation of air temperature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6, 389–399.
- Jänicke, B., Milošević, D., Manavvi, S., 2021. Review of user-friendly models to improve the urban microclimate. *Atmosphere*, 12, 10, 1291.
- Jauregui, E., 1997. Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31, 22, 3821-3831.
- Johansson, E., 2006. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41, 1326-1338.
- Johansson, E., Spangenberg, J., Lino Gouvêa, M., Freitas, E.D., 2013. Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil. *Urban Climate*, 6, 24-43.
- Kántor, N., Unger, J., 2011. The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment – the mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*, 3, 1, 90-100.
- Kántor, N., Lin, T.-P., Matzarakis, A., 2014. Daytime relapse of the mean radiant temperature based on the six-directional method under unobstructed solar radiation. *International Journal of Biometeorology*, 58, 1615-1625.
- Kastendeuch, P.P., 2022. Climatologie urbaine à Strasbourg, îlot de chaleur nocturne et confort thermique : de la mesure à la modélisation. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Strasbourg, 24-03-2022, 150 p.
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., Ringenbach, N., 2006. Modélisation du bilan radiatif et d’énergie dans un canyon urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 3, 25-42.
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., 2009. Simulation de l’îlot de chaleur urbain à Strasbourg. 5^{ème} réunion des utilisateurs de Méso-NH, 12-13 octobre 2009, Météo France (Toulouse).
- Kastendeuch, P.P., Najjar G., Lacarrere, P., Colin, J., 2010. Modélisation de l’îlot de chaleur urbain à Strasbourg. *Climatologie*, 7, 21-37.
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., 2015. Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : application sur Strasbourg. *Climatologie*, 12, 44-64.
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., Philipps, N., Nerry, F., Roupioz, L., Colin, J., Luhahe, R., 2016. Mesures pour l’étude des ambiances climatiques à Strasbourg lors de la canicule de juillet 2015. Colloque AIC, Besançon, 6-9 juillet 2016, 6 p.
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., Colin, J., 2017. Thermo-radiative simulation of an urban district with LASER/F. *Urban Climate*, 21, 43-65.
- Kastendeuch, P.P., Najjar, G., Philipps, N., 2019. Ilot de sécheresse et d’humidité à Strasbourg (France). *Climatologie*, 16, 72-90.
- Kastendeuch, P.P., Massing, N., Philipps, N., Najjar, G., 2022. L’îlot de fraîcheur urbain à Strasbourg : mythe ou réalité ? Colloque AIC, Toulouse, 6-9 juillet 2022, 6 p.

- Ketterer, C., Matzarakis, A., 2014. Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 122, 78-88.
- Kim, Y.-H., Baik, J.-J., 2002. Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 6, 651-659.
- Kim, Y.-H., Baik, J.-J., 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44, 5, 591-605.
- Klemm, W., Heusinkveld, B.G., Lenzholzer, S., Jacobs, M.H., Van Hove, B., 2015. Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 120-128.
- Klysik, K., Fortuniak, K., 1998. Intensity of the urban heat island in Łódź under winter conditions and its simple model. *Acta Universitatis Lodzianis, Folia Geographica Physica*, 3, 83-90.
- Kolokotroni, M., Shittu, E., Santos, T., Ramowski, L., Mollard, A., Rowe, K., Wilson, E., Pereira, J., Filho, D.B., Novieto, D., 2018. Cool roofs: high tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low-rise low income houses in high solar radiation countries. *Energy & Buildings*, 176, 58-70.
- Kolokotsa, D., Psomas, A., Karapidakis, E., 2009. Urban heat island in southern Europe: the case study of Hania, Crete. *Solar Energy*, 83, 10, 1871-1883.
- Konarska, J., Holmer, B., Lindberg, F., Thorsson, S., 2015. Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. *International Journal of Climatology*, 36, 5, 2379-2395.
- Kotharkar, R., Bagade, A., 2018. Evaluating urban heat island in the critical Local Climate Zones of an Indian city. *Landscape and Urban Planning*, 169, 92-104.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologisches Zeitschrift*, 15, 259-263.
- Koukou-Arnaud, R., Desplat, J., Lemonsu, A., Salagnac, J.-L., Lauffenburger, M., 2012. Méthodologie pour la quantification de l'impact d'aménagements urbains sur un climat urbain modifié. *Climatologie*, 9, 35-62.
- Kwok, Y.T., Schoetter, R., Lau, K.K., Hidalgo, J., Ren, C., Pigeon G., et al., 2019. How well does the Local Climate Zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *International Journal of Climatology*, 39, 14, 5292-5315.
- Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., Beaudeau, P., 2012. The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environmental Health Perspectives*, 120 (2), 254-259.
- Lac, C., Chaboureau, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Riche, M., et al., 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11, 1929-1969.
- Lafore, J.P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fischer, C., Hereil, P., Mascart, P., Pinty, J.P., Redelsperger, J.L., Richard, E., Vila-Guerau de Arellano, J., 1998. The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16, 90-109.
- Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., Saudreau, M., Colin, J., Luhahe, R., Guillemin, S., 2014. Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *XYZ*, 141, 55-62.
- Landes, T., Najjar G., Koehl, M., Montauban, O., Gourguechon, C., Kastendeuch, P., Slisse, P., 2020. Création de cartes de zones climatiques locales pour le suivi des îlots de chaleur urbains à Strasbourg. *XYZ*, 163, 53-61.

Références bibliographiques

- Leconte, F., Bouyer, J., Claverie, R., Pétrissans, M., 2015. Using local climate zones scheme for UHI assessment: evaluation of the method using mobile measurements. *Building and Environment*, 83, 39-49.
- Lee, H., Mayer, H., Chen, L., 2016. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning*, 148, 37-50.
- Lee, H., Mayer, H., Kuttler, W., 2020. Impact of the spacing between tree crowns on the mitigation of daytime heat stress for pedestrians inside E-W urban street canyons under Central European conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48, 126558.
- Légi France, 2023. Décret n° 2023-173 du 8 mars 2023 pris pour l'application des articles L. 152-5-2 et L. 151-28 du code de l'urbanisme et modifiant les critères d'exemplarité énergétique et d'exemplarité environnementale définis aux articles R. 171-1 à R. 171-3 du code de la construction et de l'habitation. Retrieved March 2023 from <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000047283640/2023-03-11>
- Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L., Masson, V., 2013. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climate Change*, 116, 679-692.
- Lemonsu, A., Viguié, V., Daniel, M., Masson, V., 2015. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, 14, 586-605.
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J.P., Rybski, D., 2020. On the influence of density and morphology on the urban heat island intensity. *Nature communications*, 11, 2647.
- Lowry, W.P., 1977. Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16, 129-135.
- MacGregor, G.R., 2011. Human biometeorology. *Progress in Physical Geography*, 36, 96-109.
- Manteghi, G., Lamit, H., Ossen, D.R., 2015. Water bodies and urban microclimate: a review. *Modern Applied Science*, 9,6, 12 p.
- Martilli, A., Scott Krayenhoff, E., Nazarian, N., 2020. Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31, 100541.
- Martins, T., Adolphe, L., Bonhomme, M., Bonneaud, F., Faraut, S., Ginestet, S., Michel, C., Guyard, W., 2016. Impact of urban cool island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, 26, 9-26.
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer Meteorology*, 94, 357-397.
- Masson, V., Lion, Y., Peter, A., Pigeon, G., Buyck, J., Brun, E., 2013a. "Grand Paris": Regional landscape change to adapt city to climate warming. *Climatic Change*, 117, 4, 769-782.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., et al., 2013b. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6, 929-960.
- Matzarakis, A., Muthers, S., Rutz, F., 2014. Application and comparison of UTCI and PET in temperate climate conditions. *Finisterra*, XLIX, 98, 21-31.
- Memon, R.A., Leung, D.Y.C., Liu, C.-H., 2009. An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 491-500.
- Météo France, 2020. Vague de chaleur tardive du 23 au 27 août 2016. Retrieved August 2022 from <https://meteofrance.com/magazine/meteo-histoire/les-grands-evenements/vague-de-chaleur-tardive-du-23-au-27-aout-2016>
- Météo France, 2022. Canicule intense et durable de juillet 2022 : que faut-il retenir ? Retrieved March 2023 from www.meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/canicule-intense-et-durable-de-juillet-2022-que-faut-il-retenir

- Middel, A., Häb, K., Brazel, A.J., Martin, C.A., Guhathakurta, S., 2014. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16-28.
- Mittermüller, J., Erlwein, S., Bauer, A., Trokai, T., Duschinger, S., Schönemann, M., 2021. Context-specific, user-centred: Designing urban green infrastructure to effectively mitigate urban density and heat stress. *Urban Planning*, 6, 4, 40-53.
- Mohammad, P., Aghlmand, S., Fadaei, A., Gachkar, S., Gachkar, D., Karimi, A., 2021. Evaluating the role of the albedo of material and vegetation scenarios along the urban street canyon for improving pedestrian thermal comfort outdoors. *Urban Climate*, 40, 100993.
- Montauban, O., 2019. Une approche vectorielle pour classifier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, INSA Strasbourg, 90 p.
- Morakinyo, T., E., Dahanayake, K.K.C., Adegun, O.B., Balogun, A.A., 2016. Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Buildings*, 130, 721-732.
- Morris, C.J.G., Simmonds, I., Plummer, N., 2001. Quantification of the influences of wind and on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 169-182.
- Müller, N., Kuttler, W., Barlag, A.-B., 2014. Counteracting urban climate change: adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theoretical and Applied Climatology*, 115, 243-257.
- Musy, M., 2014. Une ville verte : les rôles du végétal en ville. Editions Quae, 200 p.
- Najjar, G., 2006. Études méso-climatiques en milieu hétérogène : de la moyenne montagne à la ville. Habilitation à Diriger des Recherches, II document scientifique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 8-12-2006, 143 p.
- Najjar, G., Kastendeuch, P.P., Fischer, L., Paul, P., Viville, D., 2000. Techniques et mesures en climatologie urbaine : l'exemple de Strasbourg. *Publications de L'Association Internationale de Climatologie*, 13, 420-425.
- Najjar, G., Kastendeuch, P.P., Stoll, M.P., Colin, J.R., Nerry, F., Ringenbach, N., Bernard, J., De Hatten, A., Luhache, R., Viville, D., 2004. Le projet RECLUS, télédétection, rayonnement et bilan d'énergie en climatologie urbaine à Strasbourg. *La Météorologie*, 46, 44-50.
- Najjar, G., Kastendeuch, P.P., Stoll, M.P., Nerry, F., Ringenbach, N., Bernard, J., De Hatten, A., Luhache, R., Viville, D., 2005. Bilans radiatif et d'énergie dans un canyon urbain. *Climatologie*, 2, 41-54.
- Najjar, G., Colin, J., Kastendeuch, P.P., Ngao, J., Saudreau, M., Landes, T., Ameglio, T., Luhache, R., Guillemin, S., Schreiner, G., Kleinpeter, J., Nerry, F., 2015. A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg, France. *International conference on urban climate*, 12th symposium, Toulouse, France 20-24 July, 6 p.
- Nasrohali, N., Namazi, Y., Taleghani, M., 2021. The effect of urban shading and canyon geometry on outdoor thermal comfort in hot climates: A case study of Ahvaz, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102638.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C., 2012. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256-271.
- Norton, B.A., Coutts, A.M., Livesley, S.J., Harris, R.J., Hunter, A.M., Williams, N.S.G., 2015. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138.
- Oke, T.R., 1976. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14, 4, 268-277.
- Oke, T.R., 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1, 237-254.

Références bibliographiques

- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quart. Journal of Royal Meteorology Society*, 108, 1-24.
- Oke, T.R., 1987. *Boundary layer climates*. 2nd edition. Routledge, London, 435 p.
- Oke, T.R., 1998. An algorithmic scheme to estimate hourly heat island magnitude. *Proceedings of 2nd Symposium Urban Environment*, November 1998, Albuquerque, 80-83.
- Oke, T.R., 2004. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Geneva: World Meteorological Organization/TD. No. 1250.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, A., 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press. 548 p.
- Ooka, R., 2007. Recent development of assessment tools for urban climate and heat-island investigation especially based on experiences in Japan. *International Journal of Climatology*, 27, 1919-1930.
- Ouyang, W., Morakinyo, T.E., Ren, C., Ng, E., 2020. The cooling efficiency of variable greenery coverage ratios in different urban densities: A study in a subtropical climate. *Building and Environment*, 174, 106772.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., 2014. Le climat de la France au XXI^e siècle. Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat, www.developpement-durable.gouv.fr, 64p.
- Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C., Kontoulis, N., 2017. Mortality associated with high ambient temperatures, heatwaves, and the urban heat island in Athens, Greece. *Sustainability*, 9, 606, 22p.
- Parlow, E., Vogt, R., Feigenwinter, C., 2014. The urban heat island of Basel – seen from different perspectives. *Die Erde*, 145, 1-2, 96-110.
- Peron, F., De Maria, M.M., Spinazzè, F., Mazzali, U., 2015. An analysis of the urban heat island of Venice mainland. *Sustainable Cities and Society*, 19, 300-309.
- Pisello, A.L., 2015. High-albedo roof coatings for reducing building cooling needs. In Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Cabeza, L.F., Granqvist, C.-G. (dir.), *Eco-efficient materials for mitigating building cooling needs. Design, properties and applications* (p. 243-268), Elsevier Science.
- Potchter, O., Cohen, P., Bitan, A., 2006. Climatic behaviour of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 26, 12, 1695-1711.
- Quaid, A., Bin Lamit, H., Ossen, D. R., Shahminan, R.N.R., 2016. Urban heat island and thermal comfort conditions at a micro-climate scale in a tropical planned city. *Energy and Buildings*, 133, 577-595.
- Redon, E., Lemonsu, A., Masson, V., 2020. An urban trees parametrization for modelling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geoscientific Model Development*, 13, 385-399.
- Région Grand Est, 2019. Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) de la Région Grand Est. Retrieved March 2023 from <https://www.grandest.fr/politiques-publiques/sraddet>
- Richard, Y., Emery, J., Dudek, J., Pergaud, J., Chateau-Smith, C., Zito, S., Rega, M., Vairet, T., Castel, T., Thévenin, T., Pohl, B., 2018. How relevant are Local Climate Zones and Urban Climate Zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, 26, 258-274.
- Ringebach, N., 2004. Bilan radiative et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg I, 166 p.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Parshall, L., Gaffin, S., Lynn, B., Goldberg, R., Cox, J., Hodges, S., 2006. Mitigating New York City's urban heat island with urban forestry, living roofs, and light surfaces. Rep. 06-06, N.Y. State Energy Res. Dev. Authority.
- Roupioz, L., Kastendeuch, P., Najjar, G., Landes, T., Nerry, F., Colin, J., Luhache, R., 2016. Validation du modèle Laser/F par des images thermiques dans le cadre de la campagne bio-climatologique sur Strasbourg. Colloque AIC, Besançon, 6-9 juillet 2016, 6 p.

- Roupioz, L., Kastendeuch, P., Nerry, F., Colin, J., Najjar, G., Luhahe, R., 2018. Description and assessment of the building surface temperature modelling in LASER/F. *Energy and Buildings*, 173, 91-102.
- Rozoff, C.M., Cotton, W.R., Adegoke, J.O., 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *Journal of Applied Meteorology*, 42, 716-738.
- Ruddiman, W.F., 2001. *Earth's climate: Past and future*. W.H. Freeman ed., 1st edition, 465 p.
- Runnalls, K.E., Oke, T.R., 2000. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. *Physical Geography*, 21, 4, 283-304.
- Salata, F., Golasi, I., De Lieto Vollaro, R., De Lieto Vollaro, A., 2016. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318-343.
- Salata, F., Golasi, I., Petitti, D., De Lieto Vollaro, E., Coppi, M., De Lieto Vollaro, A., 2017. Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*, 30, 79-96.
- Salvati, A., Kolokotroni, M., Kotopouleas, A., Watkins, R., Giridharan, R., Nikolopoulou, M., 2022. Impact of reflective materials on urban canyon albedo, outdoor and indoor microclimates. *Building and Environment*, 207, 108459.
- Santamouris, M., 2013. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island – A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.
- Santamouris, M., Ding, L., Fiorito, F., Oldfield, P., Osmond, P., Paolini, R., Prasad, D., Synnefa, A., 2017. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, 154, 14-33.
- Santé Publique France. (2019). Canicule et santé. *Bulletin de santé publique*. Été 2019, 9 p.
- Sashua-Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E., 2011. The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31, 1498-1506.
- Saudreau, M., Kastendeuch, P.P., Ngao, J., Najjar, G., Améglie, T., 2015. Régulation du climat thermique par les arbres : ombrage et température du couvert. *Innovations Agronomiques*, 45, 23-34.
- Schatz, J.D., Kucharik, C.J., 2015. Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA. *Environmental Research Letters*, 10, 9, 094024.
- Sinsel, T., Simon, H., Ouyang, W., Dos Santos Guisson, C., 2022. Implementation and evaluation of mean radiant temperature schemes in the microclimate model ENVI-met. *Urban Climate*, 45, 101279.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., et al., 2008. A description of the advanced research WRF Version 3: NCAR Technical Note (National Center for Atmospheric Research).
- Snyder, R.L., Moratier, R., Song, Z., Swelam, A., Jomaa, I., Shapland, T., 2011. Evapotranspiration response to climate change. *Acta Horticulturae*, 922, 91-98.
- Sodoudi, S., Shahmohamadi, P., Vollack, K., Cubasch, U., Che-Ani, A.I., 2014. Mitigating the Urban Heat Island Effect in Megacity Tehran. *Advances in Meteorology*, vol.2014, Article ID 547974, 19p.
- Solcerova, A., Van de Ven, F., Van de Giesen, N., 2019. Nighttime cooling of an urban pond. *Frontiers in Earth Science*, 7, 10 p.
- Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R., Tocquer, F., 2020. Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la Métropole. *Rapport Météo France*. 98 p.

Références bibliographiques

- Spronken-Smith, R.A., Oke, T.R., 1998. The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 11, 2085-2104.
- Staiger, H., Matzarakis, A., 2020. Accuracy of mean radiant temperature derived from active and passive radiometry. *Atmosphere*, 11, 805.
- Stavropoulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Andrieu, H., Lemonsu, A., Calmet, I., Keravec, P., Masson, V., 2021. Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model: Towards an assessment tool for nature based solution performances. *Urban Climate*, 39, 100925.
- Straka, M., Sodoudi, S., 2019. Evaluating climate change adaptation strategies and scenarios of enhanced vertical and horizontal compactness at urban scale: a case study for Berlin. *Landscape and Urban Planning*, 183, 68-78.
- Steeneveld, G.J., Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., Theeuwes, N.E., 2014. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*, 121, 92-96.
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.
- Strasbourg Deux Rives, 2022. Le projet urbain Strasbourg Deux Rives/Zwei Ufer. Retrieved March 2023 from www.strasbourgdeuxrives.eu
- Straub, A., Berger, K., Breitner, S., Cyrus, J., Geruschkat, U., Jacobeit, J., Kühbach, B., Kusch, T., Philipp, A., Schneider, A., Umminger, R., Wolf, K., Beck, C., 2019. Statistical modelling of spatial patterns of the urban heat island intensity in the urban environment of Augsburg, Germany. *Urban Climate*, 29, 21 p.
- Sun, D.J., Wu, S., Shen, S., Xu T., 2021. Simulation and assessment of traffic pollutant dispersion at an urban signalized intersection using multiple platforms. *Atmospheric Pollution Research*, 12, 7, 101087.
- Sundborg, A., 1950. Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. *Tellus*, 2, 3, 222-232.
- Synnefa, A., Santamouris, M., Apostolakis, K., 2007. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 81, 488-497.
- Szymanowski, M., 2005. Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island in Wrocław, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 82, 207-224.
- Szymanowski, M., Kryza, M., 2009. GIS-based techniques for urban heat island spatialization. *Climate Research*, 38, 171-187.
- Taha, H., Akbari, H., Rosenfeld, A., 1991. Heat island and oasis effects of vegetative canopies: Micro-meteorological field measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 44, 123-138.
- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., Van Den Dobbelen, A., 2015. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65-78.
- Taleghani, M., Sailor, D., Ban-Weiss, G.A., 2016. Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighbourhood. *Environmental Research Letters*, 11, 024003.
- Taleghani, M., 2018. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2011-2018.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, B., 2007. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*, 27, 1983-1993.

- Thorsson, S., Rocklöv, J., Konarska, J., Lindberg, F., Holmer, B., Dousset, B., Rayner, D., 2014. Mean radiant temperature – A predictor of heat related mortality. *Urban Climate*, 10, 332-345.
- Touati, A., 2010. Histoire des discours politiques sur la densité. *Etudes foncières*, Compagnie d'édition foncière, 24-26.
- Tremeac, B., Bousquet, P., De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poeuf, P., Meunier, F., 2012. Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy*, 95, 102-110.
- Triollet, L., Laille, P., Saudreau, M., 2021. COOLTREES: les résultats du programme de recherche ANR. INRAE, Plante & Cité, 46 p.
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., Theodosiou, T., 2018. Analyzing the ENVI-Met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications – A review. *Sustainable Cities and Society*, 43, 55-76.
- Tukey, J.W., 1977. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Tzavali, A., Paravantis, J.P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A., Stigka, E., 2015. Urban Heat Island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24, 12b, 4537-4554.
- Ulpiani, G., Di Giuseppe, E., Di Perna, C., D'Orazio, M., Zinzi, M., 2019. Thermal comfort improvement in urban spaces with water spray systems: Field measurements and survey. *Building and Environment*, 156, 46-61.
- 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, 1/2/3, 59-80.
- Unger, J., Lelovics, E., Gal, T., 2014. Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63, 1, 29-41.
- Van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., Van Driel, B.L., Holtslag, A.A.M., 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment*, 83, 91-103.
- Varentsov, M., Fenner, D., Meier, F., Samsonov, T., Demuzere, M., 2021. Quantifying local and mesoscale drivers of the urban heat island of Moscow with reference and crowdsourced observations. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 21 p.
- Ville de Strasbourg, 2020. Plan Canopée de la Ville de Strasbourg. Retrieved August 2022 from <https://www.strasbourg.eu/plan-canopee>
- Vukovic, M., Loibl, W., Tötzer, T., Stollnberger, R., 2019. Potential of urban densification to mitigate the effects of heat island in Vienna, Austria. *Environments*, 6, 82, 12 p.
- Wang, Y., Akbari, H., 2014. Effect on Sky View Factor on outdoor temperature and comfort in Montreal. *Environmental Engineering Science*, 31, 6, 272-287.
- Wang, Y., Berardi, U., Akbari, H., 2015. The Urban Heat Island effect in the city of Toronto. *Procedia Engineering*, 118, 137-144.
- Wang, Y., Berardi, U., Akbari, H., 2016. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada. *Energy and Buildings*, 114, 2-19.
- Weiss, V., 2020. Dynamique spatiale de l'îlot de chaleur urbain dans l'Eurométropole de Strasbourg. Mémoire de Master 1 GAED, 57 p.

Références bibliographiques

- Weiss, V., 2022. Étude cartographique de l'îlot de chaleur et de fraîcheur saisonniers dans l'Eurométropole de Strasbourg entre 2013 et 2016. Mémoire de Master 2 GAED, 80 p.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 2, 184-194.
- WMO, 2020. Statement on the state of the global climate in 2019. World Meteorological Organization, No. 1248, 43p.
- Wong, N.H., He, Y., Nguyen, N.S., Raghavan, S.V., Martin, M., Hii, D.J.C., Yu, Z., Deng, J., 2021. An integrated multiscale urban microclimate model for the urban thermal environment. *Urban Climate*, 35, 100730.
- World Bank, 2021. Urban Development. Retrieved August 2022 from <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
- Yang, C., Wang, R., Zhang, S., Ji, C., Fu, X., 2019. Characterizing the hourly variations of urban heat island in a snowy climate city during summer. *International Journal of Environment Research and Public Health*, 16, 2467, 19 p.
- Yang, P., Ren, G., Hou, W., 2020. Impact of daytime precipitation duration on urban heat island intensity over Beijing city. *Urban Climate*, 28, 100463.
- Yang, X., Li, Y., Luo, Z., Chan, P.W., 2017. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, 37, 2, 890-904.
- Yin, C., Yuan, M., Lu, Y., Huang, Y., Liu, Y., 2018. Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. *Science of the Total Environment*, 634, 696-704.
- Zhang, L., Zhan, Q., Lan, Y., 2017. Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters. *Building and Environment*, 130, 27-39.
- Zhang, G., He, B.-J., Zhu, Z., Dewancker, B.J., 2019. Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 179.
- Zinzi, M., 2016. Exploring the potentialities of cool facades to improve the thermal response of Mediterranean residential buildings. *Solar Energy*, 135, 386-397.

Liste des figures

Figure 1 – Localisation des stations météorologiques mises en place lors de la campagne de mesures 2013-2016 à l'échelle du territoire de l'EMS par le laboratoire Icube, en plus des stations d'ATMO Grand Est et de Météo France.	14
Figure 2 – Évolution du ΔT_{ur} moyen en fonction de l'heure lors des journées estivales de beau temps (à gauche) et sur l'ensemble de l'été (à droite).	17
Figure 3 – Évolution du ΔT_{ur} moyen en fonction du temps standardisé lors des journées estivales de beau temps sur la période 2013-2019.	18
Figure 4 – Évolution des taux de refroidissement/réchauffement moyens en fonction du temps standardisé lors des journées estivales de beau temps. Le lever et le coucher de soleil sont identifiés par les barres verticales.	19
Figure 5 – Évolution des taux de refroidissement/réchauffement moyens cumulés à partir de 15h lors des journées estivales de beau temps.	19
Figure 6 – Fréquence d'apparition du ΔT_{ur} max des stations Clémenceau et DRIRE en fonction de l'heure normalisée lors des journées estivales de beau temps issues de la période 2013-2019.	20
Figure 7 – Évolution des ΔT_{ur} moyens saisonniers pour les jours de beau temps en fonction de l'heure pour DRIRE-Entzheim (à gauche) et Botanique-Entzheim (à droite) pour la période 2009-2019.	22
Figure 8 – Évolution des ΔT_{ur} moyens saisonniers pour les jours de beau temps en fonction du temps normalisé pour DRIRE-Entzheim (à gauche) et Botanique-Entzheim (à droite) pour la période 2009-2019.	23
Figure 9 – Évolution saisonnière des taux de refroidissement/réchauffement moyens pour les belles journées de la période 2009-2019, en fonction de l'heure normalisée pour l'ensemble des saisons.	24
Figure 10 – Distribution des fréquences d'apparition saisonnières des écarts de température diurnes et nocturnes pour le couple DRIRE-Entzheim pour les jours de beau temps de la période 2009-2019.	25
Figure 11 – Intensité du ΔT_{ur} max journalier des journées de la période 2009-2019 en fonction de la FINS pour la DRIRE (à gauche) et Botanique (à droite). Pour plus de lisibilité, il a été choisi de ne pas conserver la même échelle graphique et de l'adapter à chaque figure.	27
Figure 12 – Intensité du ΔT_{ur} min journalier des journées de la période 2009-2019 en fonction de la FINS pour la DRIRE (à gauche) et Botanique (à droite). Pour plus de lisibilité, il a été choisi de ne pas conserver la même échelle graphique et de l'adapter à chaque figure.	28
Figure 13 – Régression linéaire simple ΔT_{ur} max-Fraction d'insolation journalière pour DRIRE-Entzheim.	29
Figure 14 – Intensité des ΔT_{ur} max (à gauche) et ΔT_{ur} min (à droite) journaliers en fonction de la vitesse moyenne journalière du vent pour DRIRE-Entzheim.	30
Figure 15 – Relation entre le ΔT_{ur} max et la vitesse moyenne journalière du vent pour DRIRE-Entzheim.	30

Figure 16 – Intensité des ΔT_{ur} max journaliers en fonction de la durée des précipitations lors des journées à FINS comprise entre 0 (non inclus) et 20% pour DRIRE-Entzheim.	31
Figure 17 – Évolution du ΔT_{ur} horaire sur cinq jours successifs de beau temps durant la vague de chaleur de fin août 2016 pour DRIRE (en haut) et pour Botanique (en bas).	33
Figure 18 – Évolution du ΔT_{ur} horaire sur cinq jours successifs de beau temps durant la vague de chaleur de fin août 2019 pour DRIRE (en haut) et pour Botanique (en bas).	35
Figure 19 – Cartographie LCZ de l’EMS.	38
Figure 20 – Régressions linéaires entre ΔT_{ur} max moyen de plusieurs sites d’études et facteurs liés à la géométrie urbaine et à l’occupation du sol : SVF (Sky View Factor), PSF (Pervious Surface Fraction), BSF (Building Surface Fraction) et VgSF (Vegetation Surface Fraction).	40
Figure 21 – ΔT_{ur} max journaliers répertoriés pour différentes classes de LCZ (en haut) et évolution des ΔT_{ur} moyens horaires pour différentes stations appartenant à différents types de LCZ (en bas).	42
Figure 22 – Évolution des ΔT_{ur} moyens horaires pour différentes stations appartenant à différents types de LCZ.	43
Figure 23 – ΔT_{ur} max journaliers répertoriés en période de beau temps pour les stations LCZ 2 (en haut) et évolution de leurs ΔT_{ur} moyens horaires (en bas).	44
Figure 24 – Cartographie de l’ICU maximal moyen pour des journées de beau temps.	47
Figure 25 – Principe du couplage entre le modèle atmosphérique Méso-NH et le schéma de surface SURFEX.	52
Figure 26 – Cartographie de l’ICU de l’EMS le plus fréquent entre 0h et 2h du matin simulé par Méso-NH/SURFEX à 250 m de résolution pour la période estivale caniculaire du 28 juin au 2 juillet 2015 (à gauche), comparée à la cartographie de l’ICU maximal moyen obtenue pour des belles journées de l’été 2015 par la méthodologie mise au point par Unger (à droite).	53
Figure 27 – Maquette 3D de la zone du Jardin du Palais Universitaire représentée par LASER/F. Les carrés représentent le maillage appliqué au domaine de simulation (ici des mailles de dimension 150 x 150 m).	54
Figure 28 – Maquette 3D de la zone du Jardin du Palais Universitaire représentée par ENVI-Met, à résolution horizontale 4 m (en haut) et 1 m (en bas). Les différents objets (murs en gris, toits en orange, arbres en vert foncé et végétation basse en vert clair) sont représentés sous forme de cubes.	55
Figure 29 – Visualisation aérienne de la zone du Jardin du Palais Universitaire (à gauche) et aperçu du cœur du parc urbain (à droite).	56
Figure 30 – Comparaison du flux de chaleur sensible simulé par LASER/F et ENVI-Met avec les données mesurées pour la journée du 7 juillet 2016.	58
Figure 31 – Comparaison du flux de chaleur latente simulé par LASER/F et ENVI-Met avec les données mesurées pour la journée du 7 juillet 2016.	59
Figure 32 – TMRT simulée par LASER/F à 2 mètres comparée à celle mesurée par le globe noir (à gauche) et celle mesurée par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016 au Jardin du Palais U.	61

Figure 33 – UTCI simulé par LASER/F à 2 mètres comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016 au Jardin du Palais U.	62
Figure 34 – PET simulé par LASER/F à 2 mètres comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016 au Jardin du Palais U.	63
Figure 35 – Comparaison de la température de l’air simulée par ENVI-Met selon différentes résolutions horizontales avec les données mesurées pour la journée du 7 juillet 2016.	64
Figure 36 – Comparaison de l’humidité relative simulée par ENVI-Met à 2 mètres selon différentes résolutions horizontales avec les données mesurées lors de la journée du 7 juillet 2016 pour le Jardin du Palais U.	65
Figure 37 – Comparaison de la pression partielle en vapeur d’eau simulée par ENVI-Met selon différentes résolutions horizontales avec les données mesurées lors de la journée du 7 juillet 2016 pour le Jardin du Palais U.	66
Figure 38 – Comparaison de la vitesse du vent simulée par ENVI-Met avec celle obtenue via les mesures de terrain pour la journée du 7 juillet 2016.	67
Figure 39 – Température moyenne radiante simulée par ENVI-Met à résolutions 1m et 4m comparée à celle mesurée par le globe noir (à gauche) et celle mesurée par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016.	68
Figure 40 – UTCI simulé par ENVI-Met à résolutions 1m et 4m comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016.	68
Figure 41 – PET simulé par ENVI-Met à résolutions 1m et 4m comparé à celui mesuré par le globe noir (à gauche) et celui mesuré par le globe gris (à droite) le 7 juillet 2016.	69
Figure 42 – Ensemble de la chaîne de simulation multi-échelle et des modèles impliqués.	71
Figure 43 – Aperçu du site d’études Malraux et de ses principales zones d’intérêt.	72
Figure 44 – Ensemble de la zone Malraux modélisée par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite). La zone délimitée en blanc pour LASER/F, et en bleu pour ENVI-Met, est la maille pour laquelle les résultats des modèles microclimatiques sont comparés avec ceux de Méso-NH/SURFEX.	73
Figure 45 – Comparaison du rayonnement net simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu’Ile lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015.	74
Figure 46 – Comparaison du rayonnement net simulé par LASER/F, ENVI-Met et Méso-NH/SURFEX pour les routes issues de la maille Presqu’Ile le 2 juillet 2015.	75
Figure 47 – Comparaison du flux de chaleur sensible simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu’Ile lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015.	75
Figure 48 – Comparaison du flux de chaleur sensible simulé par ENVI-Met, LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour les routes issues de la maille Presqu’Ile le 2 juillet 2015.	76
Figure 49 – Comparaison du flux de chaleur latente simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour l’ensemble de la maille Presqu’Ile du 30 juin au 2 juillet 2015.	77

- Figure 50** – Comparaison du flux de chaleur latente simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour l'eau (à gauche) et la pelouse (à droite) de la maille Presqu'Ile du 30 juin au 2 juillet 2015. 78
- Figure 51** – Comparaison du flux de chaleur dans le sol simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu'Ile lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015. 79
- Figure 52** – Comparaison du flux de chaleur dans le sol simulé par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour les routes issues de la maille Presqu'Ile le 2 juillet 2015. 79
- Figure 53** – Comparaison de l'indice UTCI simulé par ENVI-Met, LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu'Ile le 2 juillet 2015. 80
- Figure 54** – Localisation des différents dispositifs de mesures météorologiques utilisés pour la campagne de mesures estivale 2021 sur le site Malraux. La disposition des chariots mobiles correspond à celle mise en place pour la journée du 21 juillet 2021. Les configurations utilisées lors des journées du 19 et 20 juillet 2021 sont disponibles en annexe A. 82
- Figure 55** – Ensemble du dispositif de mesures utilisé lors de la campagne Malraux 2021. Chariot mobile équipé de l'appareillage nécessaire à la mesure d'indices de confort (en haut à gauche, exemple du chariot 3 le 21 juillet 2021). Station météorologique fixe (en haut à droite, exemple de la station Helbling). Perche portative (au centre). Vélos équipés (en bas à gauche) et leurs centrales électroniques d'acquisition des données comprenant une batterie d'alimentation et une antenne GPS (en bas à droite) 83
- Figure 56** – Tracés des transects à vélo Place Austerlitz – Parc du Heyritz (à gauche) et Rue Blaise Pascal – Place du Marché Neudorf (à droite). 83
- Figure 57** – Températures de l'air relevées sur Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas) 84
- Figure 58** – Températures de l'air (en °C) relevées au cours des transects à vélo A-H (à gauche) et B-R (à droite) lors de la journée du 20 juillet 2021. Les heures sont données en TU. 85
- Figure 59** – Cartes de la température de l'air simulée sur le secteur Malraux par ENVI-Met le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas). 86
- Figure 60** – Coupe verticale Ouest-Est de la température de l'air passant par l'Avenue du Rhin et le centre commercial Rivétoile (au centre) le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas). 87
- Figure 61** – Coupe verticale Ouest-Est de la température de l'air passant par le Quai des Alpes le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas). 87
- Figure 62** – Températures de l'air simulées par ENVI-Met sur le transect A-H à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (à gauche) et du forçage DRIRE (à droite) pour la journée du 20 juillet 2021. 88
- Figure 63** – Humidités relatives relevées sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas). 89
- Figure 64** – Humidité relative (en %) relevée au cours des transects à vélo A-H (à gauche) et B-R (à droite) lors de la journée du 20 juillet 2021. Les heures sont données en TU. Humidités relatives relevées sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas). 90

Figure 65 – Cartes de l’humidité relative simulée sur le secteur Malraux par ENVI-Met le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas). 90

Figure 66 – Humidités relatives simulées par ENVI-Met sur le transect A-H à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (à gauche) et du forçage DRIRE (à droite) pour la journée du 20 juillet 2021.....91

Figure 67 – Comparaison des vitesses du vent mesurées par les chariots avec celles obtenues à partir des deux simulations ENVI-Met sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 (à gauche) et le 21 juillet 2021 (à droite)92

Figure 68 – UTCI relevés sur la zone Malraux le 20 juillet 2021 à 11h TU (en haut) et 19h TU (en bas)93

Figure 69 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé sur le secteur Malraux par LASER/F le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas)94

Figure 70 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé sur le secteur Malraux par ENVI-Met le 20 juillet 2021 à 11h TU, à partir du forçage Méso-NH/SURFEX (en haut) et du forçage DRIRE (en bas)95

Figure 71 – Comparaison de l’UTCI de la station Rivétoile simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.96

Figure 72 – Comparaison de l’UTCI de la station Cascade simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.97

Figure 73 – Comparaison de l’UTCI du chariot n°1 simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.98

Figure 74 – Comparaison de l’UTCI de la station UGC simulé par LASER/F (à gauche) et ENVI-Met (à droite) avec celui calculé à partir des données mesurées lors de la période du 20 au 21 juillet 2021.....98

Figure 75 – Cartographie de l’ICU maximal moyen lors de journées de beau temps pour les secteurs Malraux et Starlette.....104

Figure 76 – Découpage de la zone d’étude en quatre secteurs : Krutenau, Esplanade, Malraux et Neudorf.....105

Figure 77 – Maquette 3D de la zone Malraux représentée par LASER/F selon les scénarios *État initial* et *Albédo* (à gauche) et les scénarios *Végétation* et *VégAlbédo* (à droite). 106

Figure 78 – Évolution de la température de l’air (à gauche) et des écarts horaires de température de l’air (à droite) entre l’état initial et les différents scénarios simulés par Méso-NH/SURFEX sur la Presqu’Ile Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....108

Figure 79 – Évolution de l’UTCI (à gauche) et des écarts horaires d’UTCI (à droite) entre l’état initial et les différents scénarios simulés par Méso-NH/SURFEX sur la Presqu’Ile Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....109

Figure 80 – Évolution de la température de l’air (à gauche) et des écarts horaires de température de l’air (à droite) entre l’état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F sur la Presqu’Ile Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	110
Figure 81 – Évolution de l’UTCI (à gauche) et des écarts horaires d’UTCI (à droite) entre l’état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F sur la Presqu’Ile Malraux lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	111
Figure 82 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 13h TU en fonction des quatre scénarios.....	113
Figure 83 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 23h TU en fonction des trois scénarios d’adaptation.	114
Figure 84 – Comparaison de l’UTCI simulé par LASER/F pour les sites Helbling (à gauche) et UGC (à droite) en fonction des quatre scénarios lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	116
Figure 85 – Durées d’exposition horaires à chaque niveau de stress thermique pour les stations Helbling (à gauche) et UGC (à droite) sur la période du 30 juin au 2 juillet 2015 lors de l’application des différents scénarios.....	117
Figure 86 – Hauteur maximale réglementaire autorisée par le PLU pour l’ensemble des bâtiments composant la zone Malraux.	119
Figure 87 – Maquette 3D de la zone Malraux représentée par LASER/F selon les scénarios <i>État initial</i> (en haut à gauche), <i>Étage supplémentaire</i> (en haut à droite), <i>PLU</i> (en bas à gauche) et <i>60 m</i> (en bas à droite)	120
Figure 88 – Évolution de la température de l’air (à gauche) et de la différence de température de l’air (ΔT_{air}) entre l’état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Neudorf, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	122
Figure 89 – Évolution de la température de l’air (à gauche) et de la différence de température de l’air (ΔT_{air}) entre l’état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Presqu’Ile, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	123
Figure 90 – Évolution de l’UTCI (à gauche) et de la différence d’UTCI ($\Delta UTCI$) entre l’état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Neudorf, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	124
Figure 91 – Évolution de l’UTCI (à gauche) et de la différence d’UTCI ($\Delta UTCI$) entre l’état initial et les différents scénarios de densification verticale simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Presqu’Ile, lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015....	125
Figure 92 – Durées horaires d’exposition à chaque niveau de stress thermique pour les mailles Neudorf (en haut à gauche), Presqu’Ile (en haut à droite), Esplanade (en bas à gauche) et Krutenau (en bas à droite) durant la période du 30 juin au 2 juillet 2015 lors de l’application des différents scénarios.	126
Figure 93 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 13h TU en fonction des trois scénarios de densification verticale.	127

Figure 94 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Malraux le 2 juillet 2015 à 23h TU en fonction des trois scénarios de densification verticale.....	128
Figure 95 – Localisation des différents canyons sur le domaine de simulation. Le canyon d’orientation Nord-Sud est situé au niveau de la Presqu’Ile Malraux. Celui d’orientation Est-Ouest est localisé au sein du quartier Esplanade. Le canyon d’orientation NordEst-SudOuest se trouve à la Krutenau et celui d’orientation NordOuest-SudEst est situé dans le quartier Neudorf....	129
Figure 96 – Comparaison de l’UTCI simulé pour un canyon d’orientation Nord-Sud (en haut à gauche), Est-Ouest (en haut à droite), NordEst-SudOuest (en bas à gauche) et NordOuest-SudEst (en bas à droite), en fonction des trois scénarios pour la période du 30 juin au 2 juillet 2015.	130
Figure 97 – État actuel du futur quartier Starlette s’inscrivant au cœur du territoire Deux Rives (à gauche) et situation prévue selon le projet défini conjointement par la SPL Deux Rives (à droite)	133
Figure 98 – Maquette 3D de la zone Starlette représentée par LASER/F selon les scénarios <i>État initial</i> (à gauche), <i>Parc urbain</i> (au centre) et <i>Plan Guide</i> (à droite)	134
Figure 99 – Évolution de la température de l’air (à gauche) et de la différence de température (ΔT_{air}) entre l’état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.	135
Figure 100 – Évolution de l’indice de confort UTCI (à gauche) et de la différence d’UTCI ($\Delta UTCI$) entre l’état initial et les différents scénarios simulés par LASER/F (à droite) sur la maille Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.	136
Figure 101 – Durée d’exposition à chaque niveau de stress thermique pour Starlette durant la période du 30 juin au 2 juillet 2015 lors de l’application des différents scénarios.	137
Figure 102 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Starlette le 2 juillet 2015 à 13h TU en fonction des trois scénarios.....	138
Figure 103 – Cartes de l’indice de confort UTCI simulé par LASER/F sur la zone Starlette le 2 juillet 2015 à 23h TU en fonction des trois scénarios.....	139
Figure 104 – Disposition des capteurs fictifs le long de la Promenade des Quais sur le domaine de simulation de Starlette <i>État initial</i> (à gauche), <i>Starlette Parc urbain</i> (au centre) et <i>Starlette Plan Guide</i> (à droite).....	140
Figure 105 – UTCI simulé par LASER/F sur l’itinéraire de la Promenade des Quais le 2 juillet 2015 à 13h UTC (en haut) et 20h UTC (en bas) en fonction des trois scénarios.	140
Figure 106 – Comparaison de l’UTCI simulé d’un canyon d’orientation Nord-Sud issu du quartier Citadelle avec celui d’un canyon d’orientation Est-Ouest issu du quartier Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	141
Figure 107 – Comparaison de l’UTCI simulé d’un canyon d’orientation Nord-Sud issu du quartier Citadelle avec celui d’un canyon d’orientation Est-Ouest issu du quartier Starlette lors de la période caniculaire du 30 juin au 2 juillet 2015.....	142

Annexes

Annexe A.1 : principales stations météorologiques de la campagne de mesures 2013-2016

STATION ARQ

 48° 35'25"N
7° 45'31"E

Nom complet : Arquebusiers
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : rue des Arquebusiers
67000 STRASBOURG



LCZ 2
Proximité LCZ B

Période d'activité : Du 04/06/2015 à 13h00
Au 23/11/2015 à 09h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

STATION BIM

 48° 36'54"N
7° 45'06"E

Nom complet : Bischheim
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : Parking de la mairie
37 route de Bischwiller
67800 BISCHHEIM



LCZ 3

Période d'activité : Du 14/08/2012 à 10h00
Au 08/03/2016 à 09h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

STATION BOTA

 48° 34'54.86"N
7° 46'8.1"E

Nom complet : Botanique
Organisme : Météo France
Adresse : Jardin Botanique
67000 STRASBOURG
Période d'activité : Du 01/01/1993 à 00h00
Encore en activité



LCZ B

Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

STATION CAR

 48° 33'05"N
7° 44'04"E

Nom complet : Carsat
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : espaces verts de la Carsat
36 rue du Doubs
67000 STRASBOURG

Période d'activité : Du 09/02/2015 à 16h00
Au 08/03/2016 à 13h00

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), température d'ambiance (°C)



LCZ 8

STATION CLEM

 48° 35'25.6"N
7° 44'41.9"E

Nom complet : Clémenceau
Organisme : ATMO Grand Est
Adresse : Faubourg de Pierre
67000 STRASBOURG

Période d'activité : Du 19/07/2012 à 14h00
Au 28/02/2021 à 23h00

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)



LCZ 2

STATION DRIRE

 48° 34'47"N
7° 45'44"E

Nom complet : DRIRE
Organisme : ATMO Grand Est
Adresse : 1 rue Pierre Montet
67000 STRASBOURG (toiture)

Période d'activité : Du 28/04/2008 à 15h00
Au 31/12/2021 à 23h00

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)



LCZ 2

STATION DUR

 48° 35'24"N
7° 45'19"E

Nom complet : Durkheim
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : rue Strauss-Durkheim
67000 STRASBOURG



Période d'activité : Du 21/04/2015 à 13h00
Au 23/11/2015 à 08h00

Type de station : météo

LCZ 2

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

STATION ECE

 48° 34'42.9"N
7° 41'20.6"E

Nom complet : Eckbolsheim
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : école élémentaire Les Cigognes
16 rue Traversière
67201 ECKBOLSHEIM



Période d'activité : Du 07/01/2013 à 10h00
Au 08/03/2016 à 09h00

Type de station : météo

LCZ 6
Proximité LCZ 8

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

STATION ENTZ

 48° 32'58"N
7° 38'25"E

Nom complet : Entzheim
Organisme : Météo France
Adresse : proximité aéroport d'Entzheim



Période d'activité : Du 01/01/1990 à 00h00

Toujours en activité
Type de station : météo

LCZ D

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), vitesse du vent (m/s), direction du vent (°), précipitations (mm), rayonnement global (Joules/cm²), couverture nuageuse (octas), pression atmosphérique (hPa), durée d'insolation (minutes)

STATION GEISPO

 48° 31'19"N
7° 40'46"E

Nom complet : Geispolsheim
Organisme : ATMO Grand Est
Adresse : Allée du Stade
67118 GEISPOLSHEIM
Période d'activité : Du 01/01/1999 à 00h00
Au 31/12/2021 à 23h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)



LCZ D

STATION ILE

 48° 31'19.8"N
7° 42'56.0"E

Nom complet : Illkirch
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : 78 route Burkel
67400 ILLKIRCH-GRAFFENSTADEN
Période d'activité : Du 28/03/2013 à 11h00
Au 07/12/2015 à 09h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)



LCZ 6
Proximité LCZ 3

STATION IPR

 48° 34'46.5"N
7° 45'57.0"E

Nom complet : IPCB
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : 21 rue René Descartes
67000 STRASBOURG
Période d'activité : Du 15/09/2012 à 10h50
Au 03/10/2016 à 08h20
Type de station : station de rayonnement située en toiture
Variables mesurées : rayonnement global (W/m^2), direct, diffus, IR atmosphérique, photosynthétiquement actif (PAR)



LCZ 5

STATION JU - Flux

48° 35'04"N
7° 45'48"E

Nom complet : Jardin du Palais Universitaire
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : 3 rue de l'Université
67000 STRASBOURG

Période d'activité : Du 01/09/2015 à 11h00
Au 01/12/2016 à 08h00

Type de station : flux

Variables mesurées : flux de chaleur sensible (W/m^2),
flux de chaleur latente (W/m^2)



LCZ 2

STATION JU - Météo

48° 35'04"N
7° 45'48"E

Nom complet : Jardin du Palais Universitaire
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : 3 rue de l'Université
67000 STRASBOURG

Période d'activité : Du 05/06/2014 à 14h00
Au 31/12/2017 à 23h00

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air à 2 et 20m ($^{\circ}C$), humidité relative à 2 et 20m (%), vitesse du vent (m/s), direction du vent ($^{\circ}$)



LCZ 2

STATION KLE

48° 34'57.94"N
7° 44'42.84"E

Nom complet : Kléber
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : 34 rue du 22 Novembre
67000 STRASBOURG

Période d'activité : Du 20/12/2012 à 03h45
Au 22/09/2016 à 08h00

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air ($^{\circ}C$), humidité relative (%), température d'ambiance ($^{\circ}C$)



LCZ 2

STATION NEUD
 48° 34'13"N
7° 46'03"E

Nom complet : Neudorf
Organisme : ATMO Grand Est
Adresse : Square de la Ménagerie
67100 STRASBOURG
Période d'activité : Du 01/01/2013 à 00h00
Au 05/06/2020 à 09h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

**LCZ 3****STATION NIED**
 48° 36'37"N
7° 46'51"E

Nom complet : Niederau
Organisme : ATMO Grand Est
Adresse : 12 rue de la Papeterie
67000 STRASBOURG
Période d'activité : Du 01/01/2013 à 00h00
Au 01/01/2021 à 00h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%)

**LCZ 6****STATION RER**
 48° 39'45"N
7° 45'35"E

Nom complet : Reichstett
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : Tour de la raffinerie
D37
67116 REICHSTETT
Période d'activité : Du 26/10/2012 à 10h00
Au 17/10/2016 à 08h00
Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), température d'ambiance (°C), vitesse du vent (m/s), direction du vent (°)

**LCZ B**

STATION SCHILTIG

 48° 36'32"N
7° 42'32"E

Nom complet : Schiltigheim Ouest
Organisme : ATMO Grand Est
Adresse : 5 rue de Madrid
67300 SCHILTIGHEIM



Période d'activité : Du 18/01/1995 à 17h00
Au 31/12/2021 à 23h00

Type de station : météo

LCZ 6

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), vitesse du vent (m/s), direction du vent (°)

STATION SCM - Flux

 48° 36'19.9"N
7° 44'54.5"E

Nom complet : Schiltigheim Mairie
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : Mairie
110 Route de Bischwiller
67300 SCHILTIGHEIM



Période d'activité : Du 04/01/2015 à 02h00
Au 01/12/2016 à 08h00

Type de station : flux

LCZ 2

Variables mesurées : flux de chaleur sensible (W/m²),
flux de chaleur latente (W/m²)

STATION SCM - Météo

 48° 36'19.9"N
7° 44'54.5"E

Nom complet : Schiltigheim Mairie
Organisme : Laboratoire ICube
Adresse : Mairie
110 Route de Bischwiller
67300 SCHILTIGHEIM



Période d'activité : Du 08/09/2012 à 02h00
Au 17/10/2016 à 09h00

Type de station : météo

LCZ 2

Variables mesurées : température de l'air à 2 et 20m (°C), humidité relative à 2 et 20m (%), vitesse du vent (m/s), direction du vent (°)

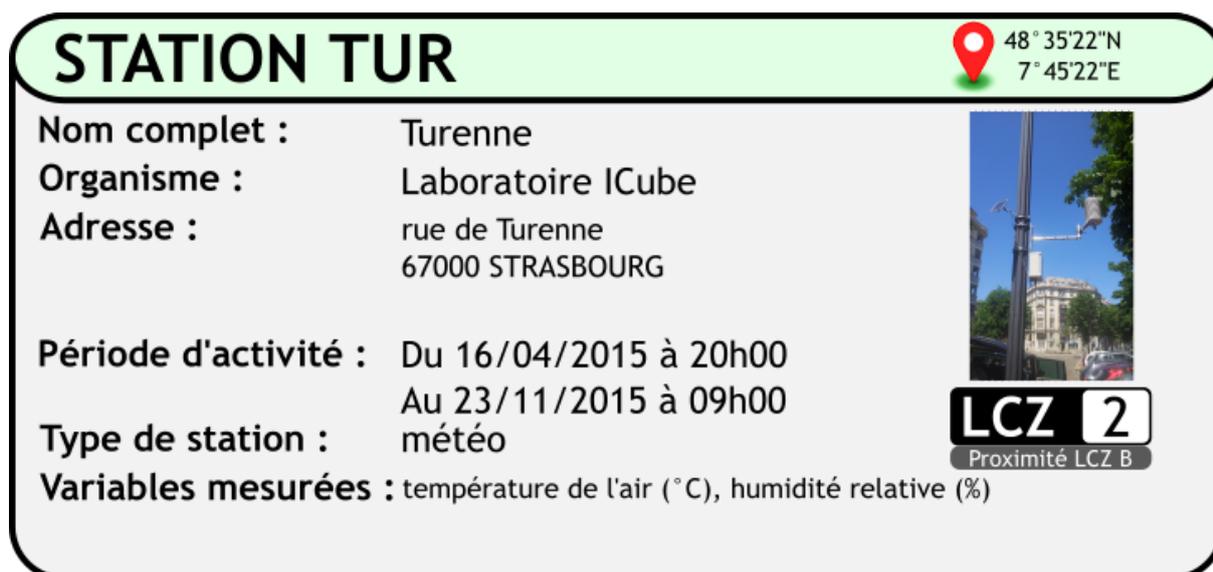


Figure 1 – Fiches d'identité des différentes stations météorologiques issues du réseau INTERREG IV utilisées au cours de la thèse.

La figure 2 permet de visualiser l'emplacement des principales stations météorologiques du réseau INTERREG IV sur la cartographie LCZ de la ville de Strasbourg.

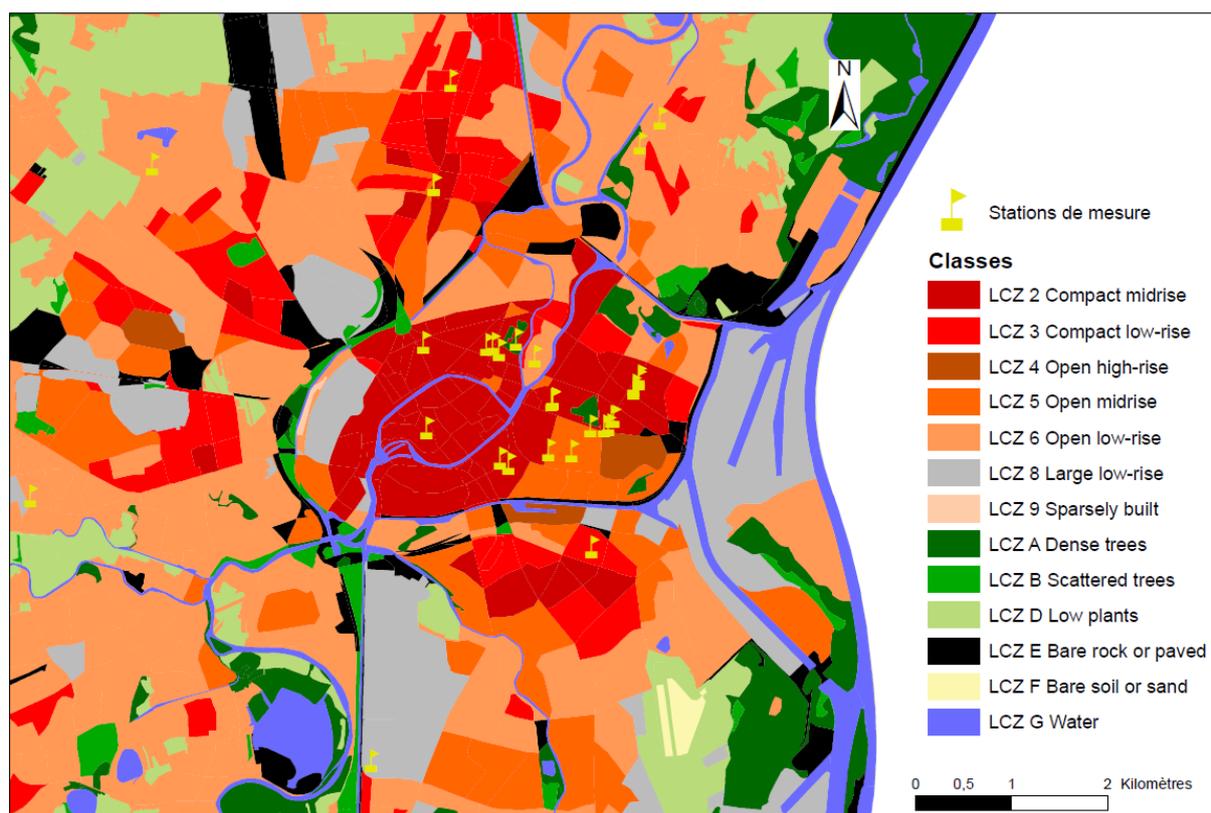


Figure 2 – Classification en Local Climate Zones (LCZ) de l'Eurométropole de Strasbourg - Zoom effectué sur la ville de Strasbourg (d'après [Montauban \(2019\)](#)).

Annexe A.2 : principales stations météorologiques de la campagne de mesures 2021

STATION CASCADE



48° 34'27"N
7° 45'25"E

Nom complet : Malraux Cascade
 Organisme : ICube
 Adresse : Quai Jeanne Helbling
 67100 STRASBOURG
 Période d'activité : Du 02/07/2021 à 10h00
 Au 06/09/2021 à 08h00



LCZ 4

Type de station : météo
 Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%),
 température du globe (°C)

STATION HELBLING



48° 34'25"N
7° 45'42"E

Nom complet : Malraux Jeanne Helbling
 Organisme : ICube
 Adresse : Quai Jeanne Helbling
 67100 STRASBOURG
 Période d'activité : Du 02/07/2021 à 12h00
 Au 06/09/2021 à 08h00



LCZ 4

Type de station : météo
 Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%),
 température du globe (°C)

STATION MIE



48° 34'27"N
7° 45'45"E

Nom complet : Malraux Maison Internationale de l'Etudiant
 Organisme : ICube
 Adresse : Presqu'île Malraux
 67100 STRASBOURG
 Période d'activité : Du 02/07/2021 à 13h00
 Au 06/09/2021 à 08h30



LCZ 4

Type de station : météo
 Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%),
 température du globe (°C)

STATION RIVETOILE



48° 34'26"N
7° 45'36"E

Nom complet : Malraux Rivétoile
Organisme : ICube
Adresse : Quai Jeanne Helbling
67100 STRASBOURG
Période d'activité : Du 02/07/2021 à 10h00
Au 06/09/2021 à 08h00



LCZ 4

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%),
température du globe (°C)

STATION UGC



48° 34'24"N
7° 45'51"E

Nom complet : Malraux UGC
Organisme : ICube
Adresse : Quai Jeanne Helbling
67100 STRASBOURG
Période d'activité : Du 02/07/2021 à 12h30
Au 06/09/2021 à 08h00



LCZ 4

Type de station : météo

Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%),
température du globe (°C)

CHARIOT ALPES

 48° 34'30"N
7° 45'42"E

Nom complet : Chariot Quai des Alpes
Organisme : ICube
Adresse : 18 Quai des Alpes
67100 STRASBOURG
Période d'activité : Du 21/07/2021 06h30-16h30



LCZ 4

Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), température du globe (°C), rayonnement (W/m2), vitesse du vent (m/s)

CHARIOT CLAUDEL

 48° 34'25"N
7° 45'45"E

Nom complet : Chariot Passerelle Claudel
Organisme : ICube
Adresse : Passerelle Claudel
67100 STRASBOURG
Période d'activité : Du 21/07/2021 06h30-16h30



LCZ 4

Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), température du globe (°C), rayonnement (W/m2), vitesse du vent (m/s)

CHARIOT PILE N

 48° 34'28"N
7° 45'46"E

Nom complet : Chariot Malraux Presqu'île Nord
Organisme : ICube
Adresse : Rue du Bassin d'Austerlitz
67100 STRASBOURG
Période d'activité : Du 20/07/2021 07h00-19h30



LCZ 4

Type de station : météo
Variables mesurées : température de l'air (°C), humidité relative (%), température du globe (°C), rayonnement (W/m2), vitesse du vent (m/s)

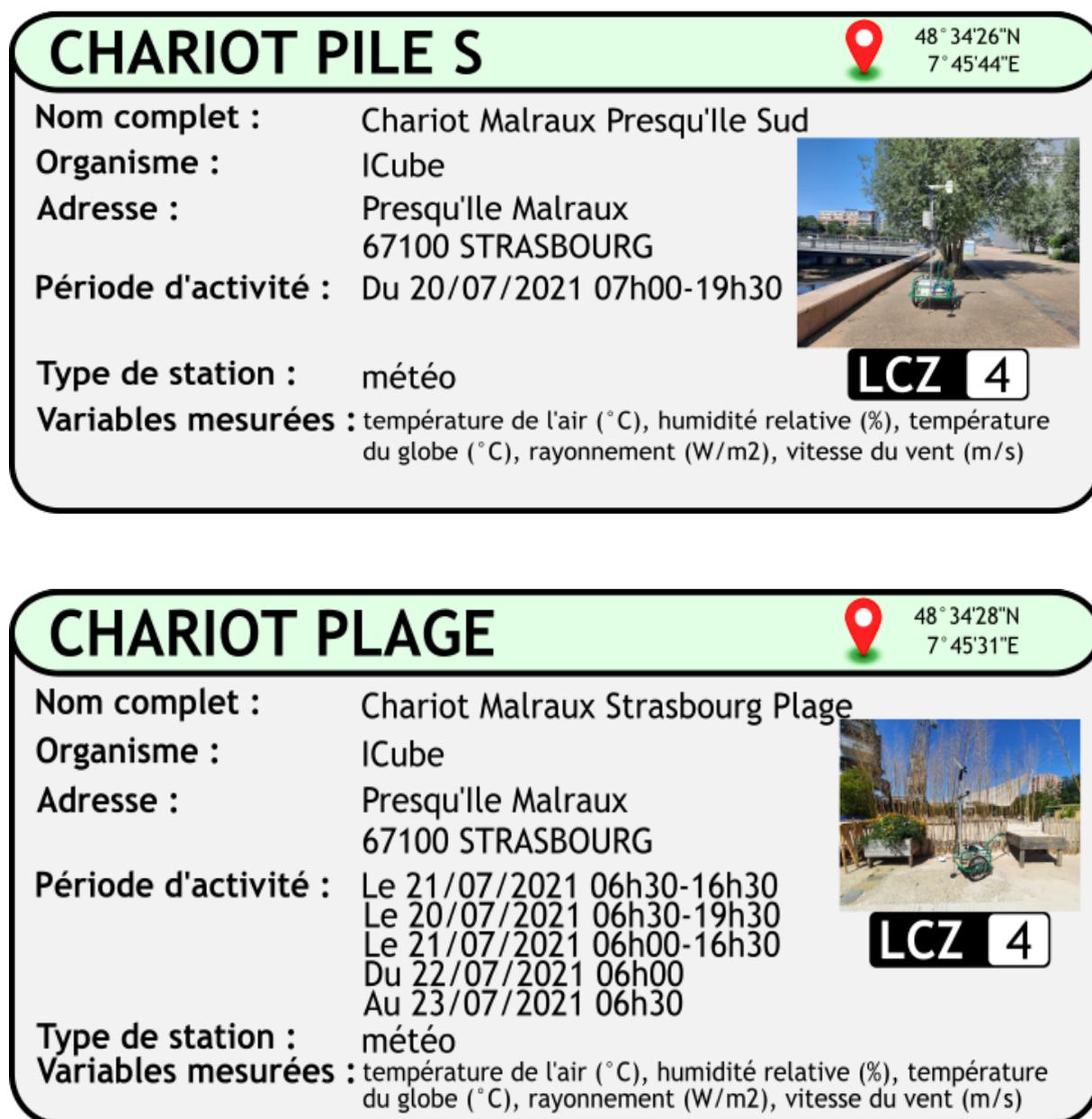


Figure 3 – Fiches d'identité des différentes stations météorologiques issues de la campagne de mesures menée entre le 19 et le 22 juillet 2021 sur le secteur Malraux.

Annexe B : distribution des fréquences d'apparition saisonnières des écarts de températures diurnes et nocturnes pour le couple Botanique-Entzheim

La figure 1 présente les fréquences d'apparition saisonnières des ΔT_{ur} pour le site du Jardin Botanique. À l'opposé de la station DRIRE (cf. chapitre 1.2.2), la distribution des fréquences change nettement d'une saison à l'autre. L'été s'avère être la saison où l'ICU survient le plus fréquemment, avec 89,9% des ΔT_{ur} nocturnes positifs. En revanche, c'est en hiver que des intensités d'ICU particulièrement intenses se produisent le plus souvent : plus de 3% des ΔT_{ur} nocturnes hivernaux présentent en effet des valeurs supérieures à 4°C, contre moins de 1,2% pour ceux relevés lors des autres saisons. Cette particularité hivernale pourrait résulter de l'activation du chauffage à cette période de l'année. De telles valeurs restent cependant très anecdotiques, notamment par rapport à la DRIRE où les intensités d'ICU atteignant 4°C ou plus représentent de 53% (hiver) à 75% (été) des ΔT_{ur} nocturnes.

En période diurne, l'été se révèle être la saison la plus propice à la survenue de ΔT_{ur} inférieurs à zéro (plus de 5%). Or c'est en automne que les ΔT_{ur} les plus négatifs se manifestent le plus fréquemment (14,4% des $\Delta T_{ur} \leq -2^\circ\text{C}$). Cette particularité résulte sans doute du comportement de la référence rurale, dénuée de végétation en cette saison et s'échauffant de ce fait plus rapidement que le Jardin Botanique (cf. chapitre 1.2.2). En outre, à l'instar de ce qui a été constaté lors de l'étude de l'ICU moyen (cf. figure 10), l'occurrence d'intensités négatives est plus faible en hiver (moins de 50%), et la distribution des fréquences des ΔT_{ur} se rapproche un peu plus de celles observées pour la DRIRE (cf. figure 12). Cela s'explique par l'absence de feuilles des arbres, qui entraîne une disparition de l'effet d'ombrage couplée à une très forte réduction de l'évapotranspiration.

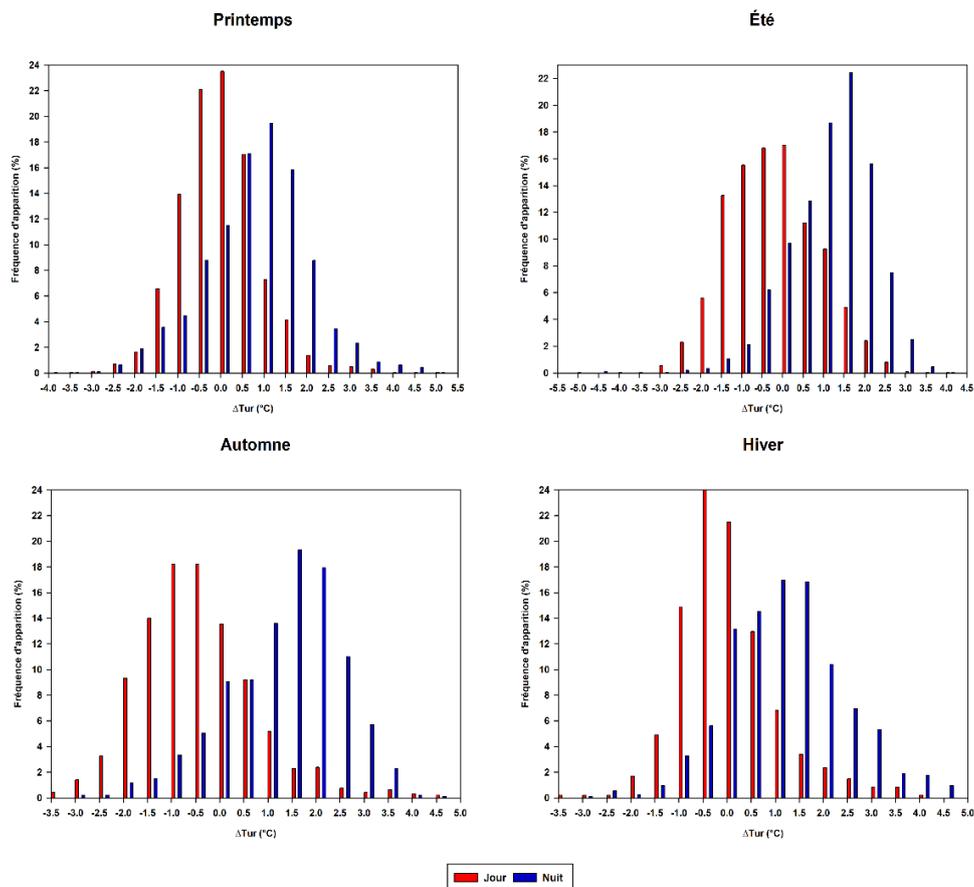


Figure 1 – Distribution des fréquences d'apparition saisonnières des écarts de température diurnes et nocturnes pour le couple Botanique-Entzheim pour les jours de beau temps de la période 2009-2019.

Annexe C : Fréquence des types de temps favorables à l'ICU sur la période 2009-2019 (adapté d'après Cantat (2004))

La relative faible occurrence de journées idéales au développement d'un fort ICU est illustrée par la figure 1 : les jours de beau temps ne représentent ainsi que 11,28% de l'ensemble des journées de la période 2009-2019. Cette proportion est toutefois un peu plus élevée que celle de la période 1998-2008 (10,25%), et reste bien plus importante que la fréquence parisienne (6,7%) obtenue par Cantat (2004) sur la décade 1990-1999.

L'ensemble des diagrammes de la figure 1 permet donc de constater que Strasbourg présente tout de même une importante probabilité de connaître des conditions météorologiques synoptiques favorable à l'installation d'un ICU d'une intensité non négligeable, et ceci rien que par le pourcentage élevé de journées à vent faible (figure 1, en haut à droite) et dénuées de précipitations (figure 1, en bas à gauche).

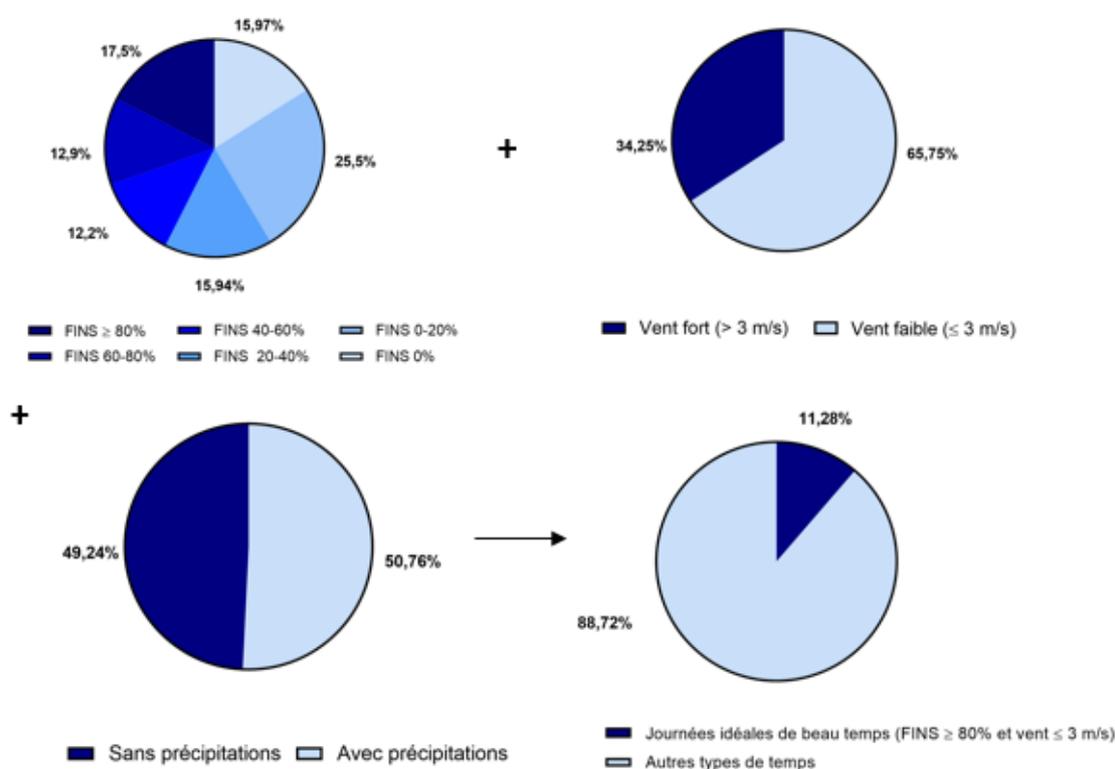


Figure 1 – Répartition de la fréquence des différentes intensités de la FINS journalière (en haut à gauche). Distribution de la fréquence de journées à vent faible et à vent fort (en haut à droite). Distribution de la fréquence de journées avec et sans précipitations (en bas à gauche). Fréquence des journées idéales au développement de l'ICU par rapport à l'ensemble des journées de 2009-2019 (en bas à droite).

Annexe D : Taux de refroidissement/réchauffement cumulés des stations lors des successions de belles journées de fin août 2016 et 2019

Dans cette annexe, les graphiques des taux de refroidissement/réchauffement des deux successions de belles journées estivales, étudiées dans la partie traitant du lien entre îlot de chaleur urbain et types de temps, sont exposés à titre informatif. Les informations relatives à leur contenu sont détaillées dans le premier chapitre de la thèse (cf. 1.2.3.2).

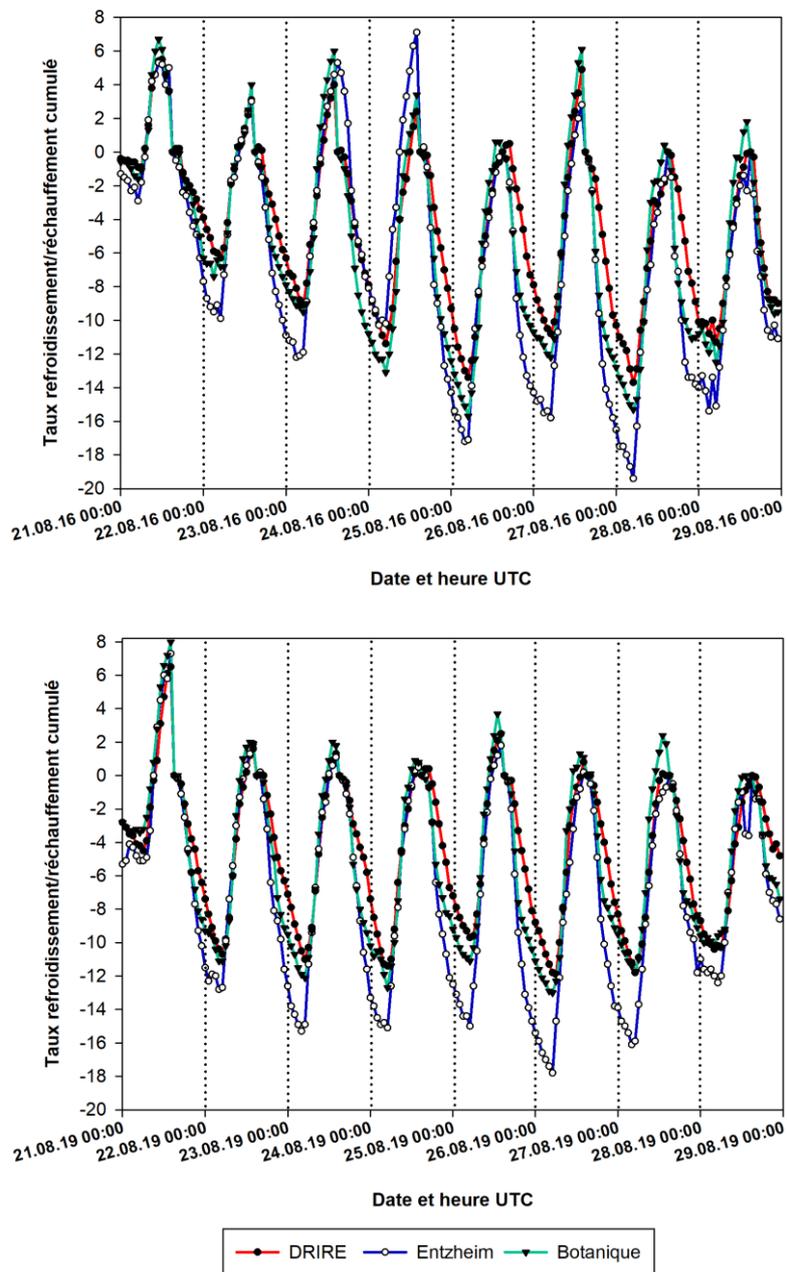


Figure 1 – Taux de refroidissement/réchauffement cumulés des stations DRIRE, Botanique et Entzheim lors de la succession de belles journées de fin août 2016 (en haut) et de celle de fin août 2019 (en bas).

Annexe E : Méthodologie de cartographie de l'îlot de chaleur urbain à partir du logiciel SAGA GIS (d'après Unger (2006))

Cette annexe détaille la procédure d'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG) SAGA GIS permettant de réaliser la cartographie de l'ICU maximal moyen présentée dans le premier chapitre. La méthodologie a fait l'objet de trois mémoires de Master effectués au cours de la thèse (Weiss, 2020 ; Galand, 2021 ; Weiss, 2022), qui ont tenté d'aboutir à des cartographies de l'ICU horaire et saisonnier. Un article reprenant l'ensemble de la procédure a également été publié (Philipps et al., 2022). Les couches raster contenant la valeur des différents paramètres LCZ pour chaque polygone de l'EMS ont toutes été conçues par Montauban (2019).

Pour rappel, la première étape consiste à déterminer l'équation de régression linéaire multiple (MLR) à partir des paramètres LCZ de chaque station météorologique (**variables explicatives**) et de leurs ΔT_{ur} max moyens respectifs (**variable expliquée**). Le tableau 1 présente ainsi, pour les dix-huit sites utilisés, les valeurs des facteurs LCZ et des ΔT_{ur} max moyens calculés sur une vingtaine de belles journées, majoritairement estivales, de l'année 2015. La combinaison entre Building Surface Fraction (BSF), Impervious Surface Fraction (ISF) et Vegetated Surface Fraction (VgSF) a été sélectionnée du fait qu'il s'agit de celle aboutissant au coefficient de détermination le plus élevé ($R^2 = 0,71$).

Station	Building Surface Fraction (%)	Impervious Surface Fraction (%)	Vegetated Surface Fraction (%)	ΔT_{ur} max moyen
ARQ	28,411	45,77	33,804	3,89
BIM	37,058	51,814	14,355	4,44
BOTA	26,548	50,385	31,416	2,98
CARSAT	18,847	45,742	35,933	3,56
CLEM	37,626	51,091	16,819	5,4
DRIRE	34,379	52,803	16,636	6,27
DUR	32,544	47,944	28,316	4,8
ECE	24,603	54,707	23,79	4,24
GEISPO	11,468	38,847	20,633	2,11
ILE	20,727	58,618	24,765	4,47
JARDIN U	28,281	45,87	29,234	3,43
KLEBER	50,736	39,524	7,264	6,02
NEUD	26,959	61,267	19,804	4,9
NIED	20,273	49,761	33,21	3,92
RER	2,428	44,574	14,664	3,15
SCHILTIG Ouest	13,092	47,986	17,925	3,01
SCM	38,777	47,114	19,073	5,37
TUR	30,269	47,816	30,706	4,38

Tableau 1 - Paramètres LCZ des différentes stations et ΔT_{ur} max moyen associé.

Nous obtenons donc l'équation suivante :

$$\Delta T_{ur} \max = 0,0699 * BSF + 0,0572 * ISF - 0,0329 * VgSF + 0,03268. \quad (1)$$

La deuxième étape consiste à importer une par une dans SAGA GIS les couches raster contenant les valeurs des trois paramètres LCZ utilisés dans l'équation (1). Les informations qu'elles contiennent permettent d'aboutir respectivement à des cartographies du BSF, de l'ISF et du VgSF sur l'ensemble de l'EMS (Figure 2).

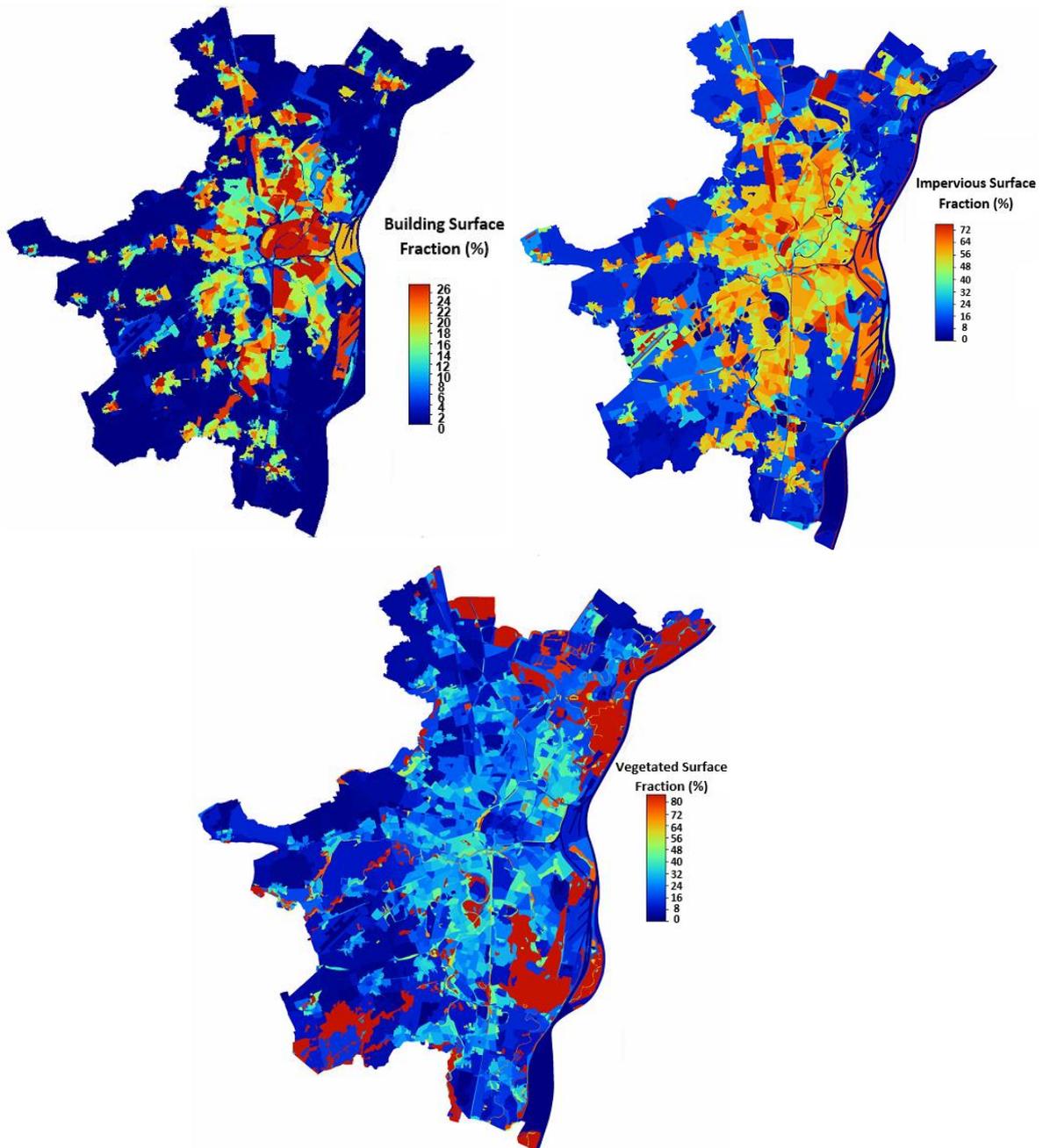


Figure 2 – Cartographies du BSF, de l’ISF et du VgSF de l’EMS. Chaque polygone LCZ possède des valeurs de ces trois paramètres lui étant propres.

Une fois les trois couches raster importées, il s’agit d’intégrer l’équation (1) dans SAGA GIS. Ce dernier possède un module qui lui permet d’appliquer une formule de calcul sur l’ensemble des données d’une couche raster. Le chemin permettant d’y accéder est le suivant :

Geoprocessing => Grid => Calculus => Grid Calculator

Chacune des couches raster est alors chargée dans la section *Grid* du module (Figure 3), puis l’équation (1) est entrée dans le champ *Formule*. L’application de cette équation va ainsi aboutir à la

création d'une quatrième carte qui contiendra pour chaque polygone LCZ une valeur de ΔT_{ur} max moyen calculée à partir des valeurs de BSF, d'ISF et de VgSF des couches raster.

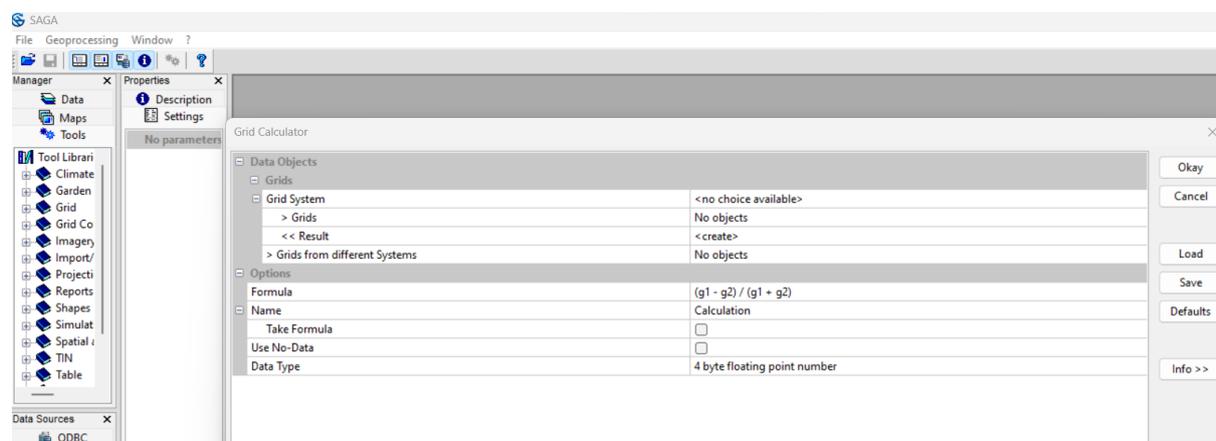


Figure 3 – Aperçu du module *Grid Calculator* du logiciel SAGA GIS.

Cette première cartographie obtenue fournit déjà un aperçu de la structure spatiale de l'ICU eurométropolitain (Figure 4), avec des valeurs de ΔT_{ur} max moyen élevées au sein des zones densément bâties du centre-ville strasbourgeois, et nettement plus faibles dans les secteurs de seconde couronne. Or beaucoup de transitions très abruptes subsistent entre certains polygones LCZ voisins : les différences peuvent ainsi atteindre des valeurs très élevées et irréalistes (jusqu'à 8°C entre deux polygones adjacents). Un lissage par moyenne mobile est alors appliqué via l'outil *Average with Threshold* afin d'effacer ces écarts trop importants.

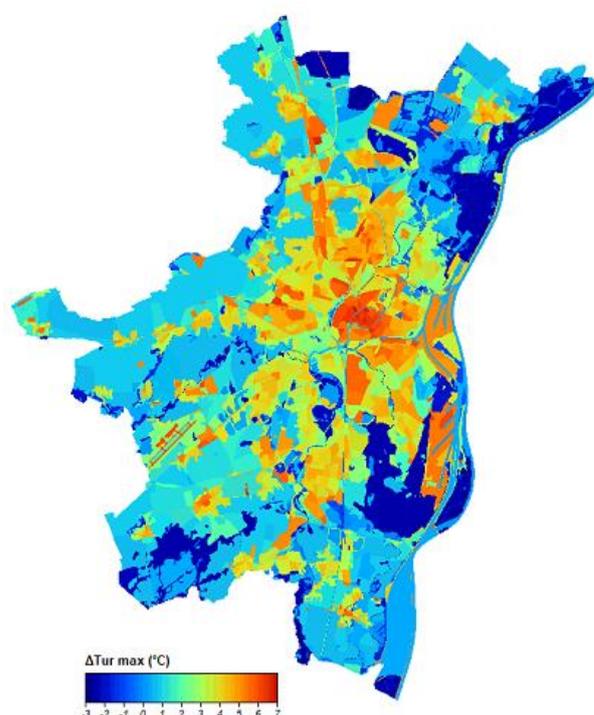


Figure 4 – Cartographie non lissée de l'îlot de chaleur urbain maximal moyen sur l'Eurométropole de Strasbourg pour des journées de beau temps.

Annexe F : formules des grandeurs statistiques utilisées

Coefficient de détermination :

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i - \frac{\sum_{i=1}^n O_i \sum_{i=1}^n P_i}{n}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n O_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n O_i)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n P_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}{n} \right]}} \right)^2 \quad [1]$$

Erreur moyenne quadratique :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}} \quad [2]$$

Erreur moyenne :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad [3]$$

Erreur moyenne absolue :

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad [4]$$

Coefficient d'accord de [Willmott \(1981\)](#) :

$$dr = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i|)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad [5]$$

Avec : P_i la valeur simulée, O_i la référence (mesurée ou simulée), n la taille de l'échantillon, $e_i = P_i - O_i$ l'erreur par rapport à la référence et \bar{O} la valeur moyenne de l'échantillon de référence.

Annexe G : Paramétrage et forçage de LASER/F (d'après <https://sites.google.com/view/laserf>)

Sept fichiers doivent être fournis en entrée pour concevoir un projet LASER/F :

- Le fichier de configuration **.CSL**
- La maquette 3D de la zone de simulation, contenue dans le fichier **.GEO**
- Les caractéristiques de la surface, décrites dans le fichier **MATERIEL.MAT**
- Les propriétés thermo-physiques des différents types de revêtements, décrites dans le fichier **REVETEMENT.MAT**
- Les propriétés thermo-physiques des différents types de matériaux, décrites dans le fichier **MATERIAU.MAT**
- L'indice de surface foliaire (LAI) de la végétation, décrit dans le fichier **REVETEMENT.LAI**
- Le forçage météorologique, contenu dans un fichier **.CSV**

Des exemples de chacun des fichiers d'entrée sont présentés dans la partie qui suit. Tous proviennent de la simulation effectuée sur la zone Malraux pour la période estivale caniculaire allant du 28 juin au 2 juillet 2015.

- **Fichier .CSL de configuration**

0.1 ; Version du fichier *.CSL
 20 ; Superficie Min. pour la fragmentation
 0.001000000047; Superficie Max. pour la fragmentation
 20; Superficie Seuil pour la fragmentation
 0 ; Flag pour la fragmentation progressive
 3 ; Nb divisions du ciel
 0; Coordonnée de référence (X) pour la fragmentation progressive
 0; Coordonnée de référence (Y) pour la fragmentation progressive
 0; Coordonnée de référence (Z) pour la fragmentation progressive
 1; Flag pour savoir si les objets sont fragmentés
 1; Flag pour savoir si la canopée urbaine est construite automatiquement
 250.000; Dimension utilisateur pour les boîtes de canopée urbaine
 20; Superficie spécifique pour la fragmentation du terrain
 20; Superficie spécifique pour la fragmentation de l'eau
 20; Superficie spécifique pour la fragmentation des toits
 20; Superficie spécifique pour la fragmentation des façades
 1; Flag pour savoir si on raffine la fragmentation sous les arbres

Le fichier CSL contient des informations sur la fragmentation appliquée à tous les éléments composant le domaine de simulation (toits, murs, surfaces d'eau, terrain), ainsi que sur le nombre de divisions du ciel. Ce sont ces informations qui vont définir la finesse de la simulation réalisée. Ce fichier fournit également les dimensions des mailles atmosphériques qui divisent la canopée urbaine.

- **Fichier .GEO contenant la maquette 3D de la zone de simulation**

```

0; // Altitude du point le plus bas de la scène (m)
7.76352259; // Longitude du centre(°)
48.58458157; // Latitude du centre(°)
4191;44749; // Nb total d'objets et de faces dans la scène (faces non obligatoires)
batiment; // Type de l'objet N°0 *****
SURFACE_BATIMENT542; // Nom
1; // Nb sous-objets
c; // Objet complexe
6; // Nb faces
soubassement; // Type de la face 0
Mur;4
-277.2597656;-444.9335938;140
-275.1533203;-437.8222656;140
-265.4101562;-440.9394531;140
-267.5830078;-447.9628906;140
facade; // Type de la face 1
Mur;4
-275.1533203;-437.8222656;155
-265.4101562;-440.9394531;155
-265.4101562;-440.9394531;140
-275.1533203;-437.8222656;140
...

```

Le fichier .GEO décrit l'ensemble de la géométrie 3D du domaine de simulation. Il fournit des informations sur les différents objets que contient la scène : chaque objet est ainsi identifié par son type (bâtiment, terrain, végétation, capteur...) et par le nombre de faces le composant. Chacune de ces faces est également associée à un type (soubassement, façade, toit, feuille...), à un matériel (mur, prairie, sol nu, route, eau...) et aux coordonnées de ses sommets.

- **Fichier MATERIEL.MAT définissant la composition des surfaces**

Liste des figures

```
Numero;Nom;Revetement;Sol;NbCouches;Materiau0;DeltaZ0Materiau1;DeltaZ1Materiau2;DeltaZ2Materiau
3;DeltaZ3Materiau4;DeltaZ4Materiau5;DeltaZ5Materiau6;DeltaZ6
0;General;0;4;3;0;0.015000;0;0.075000;0;0.400000;
1;Prairie;1;6;6;0;0.015000;0;0.030000;0;0.0600000;0;0.1200000;0;0.2400000;0;0.3600000;
2;C3;2;4;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
3;C4;3;4;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
4;Foret;4;4;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
5;Sol_nu;5;4;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
6;Irrigation;6;4;6;0;0.015000;0;0.080000;0;0.100000;0;0.300000;0;0.400000;0;0.500000;
7;Roche;7;0;3;5;0.04000;5;0.075000;5;0.400000;
8;Mur;9;0;5;82;0.01000;83;0.0340000;84;0.0460000;85;0.034;82;0.01;
9;Toit;10;0;4;79;0.01000;80;0.01200;81;0.0085;81;0.009;
10;Vitre;11;0;6;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;8;0.002500;
11;Feuilles;12;0;0;
12;Tronc;13;0;3;13;0.025000;13;0.025000;13;0.025000;
13;Eau_flaques;14;0;10;9;0.500;9;0.5000;9;0.5;9;0.5;9;0.5;9;0.500000;9;0.500000;3;0.100000;3;0.300000;3;
0.500000;
14;Route;15;0;4;86;0.005000;86;0.0150000;87;0.03000;88;0.05000;
15;Capteur_rayonnement;16;0;0;
16;Eau_mer_riviere;17;0;0;
```

Le fichier MATERIEL.MAT fait le lien entre le fichier .GEO et les matériels qui sont associés aux différentes faces composant la scène. Il décrit le revêtement et la nature du sol associés à chaque matériel, ainsi que le nombre de couches le constituant.

- **Fichier REVETEMENT.MAT décrivant les propriétés des revêtements**

```

Numero;Nom;Red;Green;Blue;Type;RootDepth;H_Arbres;Reflection lamb;Emissivite;
0;General;0.500000;0.500000;0.000000;GRAS;0.500000;0.000000;
1;Prairie;0.000000;0.500000;0.000000;GRAS;0.500000;0.000000;
2;C3;1.000000;1.000000;0.000000;C3;1.500000;0.000000;
3;C4;1.000000;0.500000;0.250000;C4;1.500000;0.000000;
4;Foret;0.000000;0.320000;0.000000;TREE;2.000000;20.000000;
5;Sol_nu;0.500000;0.250000;0.250000;NO;
6;Irrigation;0.310000;0.310000;1.000000;IRR;1.500000;0.000000;
7;Roche;0.500000;0.500000;0.500000;ARTIF;-99999;-99999;0.37000;0.900000;
8;Neige_Glace;1.000000;1.000000;1.000000;SNOW;
9;Mur;0.750000;0.750000;0.750000;ARTIF;-99999;-99999;0.3000;0.900000;
10;Toit;1.000000;0.000000;0.000000;ARTIF;-99999;-99999;0.25000;0.80000;
11;Vitre;0.000000;1.000000;1.000000;ARTIF;-99999;-99999;0.200000;0.980000;
12;Feuilles;0.000000;1.000000;0.000000;FOLTREE;2.000000;
13;Tronc;0.500000;0.250000;0.250000;ARTIF;-99999;-99999;0.350000;0.930000;
14;Eau_flaques;0.000000;0.500000;0.750000;WAT;
15;Route;0.320000;0.320000;0.320000;ARTIF;-99999;-99999;0.12000;0.940000;
16;Capteur_rayonnement;1.000000;1.000000;0.000000;CAPT;
17;Eau_mer_riviere;0.000000;0.250000;0.500000;RIV;
18;Mur_Geo;1.000000;1.000000;1.000000;ARTIF;-99999;-99999;0.050000;0.90000;

```

Les informations sur le revêtement de chaque matériel sont décrites dans le fichier REVETEMENT.MAT. Ce dernier contient notamment des données sur l'émissivité, le coefficient de réflexion, et sur la profondeur racinaire pour les surfaces naturelles.

- **Fichier MATERIAU.MAT décrivant les propriétés des matériaux**

```

Numero;Nom;Conductivite thermique (W/m.K);Chaleur specifique (J/kg.K);Masse volumique (kg/m3);Indice
Refraction solaire;Coefficient attenuation lineaire solaire;
0;Undefined;0.100000;1000;1.000000;0.000000;0.000000;
1;Vegetation;0.580000;4190;1000.000000;0.000000;0.000000;
2;Air;0.026000;1000;1.200000;1.000300;0.000000;
3;SolPrairie;1.000000;1000;2100.000000;0.000000;0.000000;
4;Platre;0.350000;1000;900.000000;0.000000;0.000000;
5;Beton;1.880000;1000;2000.000000;0.000000;0.000000;

```

```
6;Tuile_rouge;1.000000;871;1634.000000;0.000000;0.000000;
7;Polystyrene_Isolant;0.040000;1450;20.000000;0.000000;0.000000;
8;Vitre;1.000000;750;2500.000000;1.500000;0.000100;
9;Eau;600.000000;4190;1000.000000;1.330000;0.001200;
10;Asphalte;1.000000;467;2400.000000;0.000000;0.000000;
...
```

De par les matériaux qui le constituent, chaque matériel est également relié à des propriétés thermo-physiques qui sont décrites dans le fichier MATERIAU.MAT. Il s'agit de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique, de la masse volumique, de l'indice de réflexion solaire et du coefficient d'atténuation linéaire solaire.

- **Fichier REVETEMENT.LAI décrivant la végétation**

```
Numero;Nom;LAI decadaire(1..36)
0;General;1.000000;1.000000;1.100000;1.100000;1.200000;1.300000;1.300000;1.400000;1.400000;1.500000;
1.500000;1.700000;1.800000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;
1.900000;1.900000;1.900000;1.900000;1.900000;1.800000;1.700000;1.600000;1.500000;1.500000;1.400000;
1.300000;1.200000;1.100000;1.100000;
1;Prairie;1.000000;1.000000;1.100000;1.100000;1.200000;1.300000;1.300000;1.400000;1.400000;1.500000;
1.500000;1.700000;1.800000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;2.000000;
1.900000;1.900000;1.900000;1.900000;1.900000;1.800000;1.700000;1.600000;1.500000;1.500000;1.400000;
1.300000;1.200000;1.100000;1.100000;
2;C3;0.500000;0.500000;0.700000;1.000000;1.200000;1.500000;1.700000;2.000000;2.300000;2.700000;3.000000;
3.300000;3.700000;4.000000;3.900000;3.700000;3.600000;3.500000;3.300000;3.200000;3.100000;2.900000;2.800000;
2.800000;2.800000;2.800000;2.600000;2.500000;2.300000;1.900000;1.400000;1.000000;0.900000;0.700000;0.600000;
0.600000;
...
```

Le fichier .LAI fournit l'indice de surface foliaire (LAI) pour chaque type de végétation et par décade.

- **Fichier .CSV du forçage météorologique**

```

300 //Pas de temps du forçage (s)
141.29 //altitude au point de forçage (m)
7.747 //geographic (=geodesic) Longitude (°)
48.588 //geographic (=geodesic) Latitude (°)
20 //Hauteur du forçage pour T et Q (m)
10 //Hauteur du forçage pour le vent (m)
26.11 141.29 //Température profonde (°C ou K) et altitude associée (m)
19.5 141.29 //Température Rivière (°C ou K) et altitude associée (m)
20 //Température des bâtiments (°C ou K)
0.38 //0 //Indice d'humidité du sol en surface pour l'eau liquide (-)
0.38 //0.1 //Indice d'humidité du sol en profondeur pour l'eau liquide (-)

```

Le fichier de forçage se divise en deux parties : la première partie fixe les **conditions initiales de la simulation**. Certaines de ces variables sont **constantes** (pas de temps du forçage, coordonnées géographiques du site, altitude, hauteur des capteurs mesurant la température de l'air, l'humidité relative et le vent), tandis que d'autres (indices d'humidité du sol, température des bâtiments et de l'eau, température en profondeur) seront amenées à **évoluer** au cours de la simulation.

La deuxième partie constitue le **forçage météorologique**. Les variables devant être fournies au modèle sont des **variables climatiques** (température de l'air, humidité relative, vitesse et direction du vent mesurées aux hauteurs indiquées dans les conditions initiales, quantités de précipitations solides et liquides et pression atmosphérique) et de **rayonnement** (rayonnement direct perpendiculaire, diffus et atmosphérique).

12	//annee	mois	jour	heure	minute	direct_perp	diffus_hor	Viratmo	horiz	Tair(C)	hr(%)	Vitesse(m/s)	Direction(de	Précipitation	Psolide(mm)	Pression(hPa)
13	2015	6	28	0	0	0	0	317.660945	17.0532213	61.0831877	1.18400046	0	0	0	1020.0498	
14	2015	6	28	0	5	0	0	317.660945	16.9918908	61.3615386	1.19946484	0	0	0	1020.3805	
15	2015	6	28	0	10	0	0	317.660945	16.8659578	61.8928056	1.22806785	0	0	0	1020.4363	
16	2015	6	28	0	15	0	0	323.74843	16.7298675	62.483027	1.2449573	0	0	0	1020.5038	

Annexe H : Paramétrage et forçage d'ENVI-Met (d'après www.envi-met.info)

Lancer une simulation avec ENVI-Met nécessite de fournir quatre fichiers en entrée :

- Le fichier **.SIMX** de configuration
- La maquette 3D de la zone de simulation, contenue dans le fichier **.INX**
- Les caractéristiques de la végétation, des revêtements et des matériaux ajoutés par l'utilisateur dont la description est fournie par le fichier **.edb**
- Le forçage météorologique, contenu dans le fichier **.fox**

Comme pour le modèle LASER/F (cf. annexe G), des exemples de chacun des fichiers d'entrée sont présentés dans cette annexe. Tous proviennent de la simulation effectuée sur la zone Malraux pour la période estivale allant du 19 au 21 juillet 2021.

- **Fichier .SIMX de configuration**

```
<ENVI-MET_Datafile>
<Header>
<filetype>SIMX</filetype>
<version>2</version>
<revisiondate>08.06.2022 08:42:33</revisiondate>
<remark></remark>
<checksum>0</checksum>
<encryptionlevel>0</encryptionlevel>
</Header>
<mainData>
  <simName> MalrauxCampagneMesures2021 </simName>
  <INXFile> GrandeZoneMalraux4mMesoNHCampagneMesuresCapteurs.INX </INXFile>
  <filebaseName> MalrauxCampagneMesures2021 </filebaseName>
  <outDir> D:\ENVI Met version 5\Malraux Campagne de mesures 2021 </outDir>
  <startDate> 19.07.2021 </startDate>
  <startTime> 00:00:00 </startTime>
  <simDuration> 72 </simDuration>
  <windSpeed> 2.00000 </windSpeed>
  <windDir> 135.00000 </windDir>
  <z0> 0.00100 </z0>
  <T_H> 293.00000 </T_H>
  <Q_H> 8.00000 </Q_H>
```

```

    <Q_2m> 50.00000 </Q_2m>

</mainData>

<TThread>

    <UseTThread_CallMain> 0 </UseTThread_CallMain>

    <TThreadPRIO> 4 </TThreadPRIO>

</TThread>

<ModelTiming>

    <surfaceSteps> 30 </surfaceSteps>

    <flowSteps> 900 </flowSteps>

    <radiationSteps> 600 </radiationSteps>

    <plantSteps> 600 </plantSteps>

    <sourcesSteps> 600 </sourcesSteps>

</ModelTiming>

<Soil>

    <tempUpperlayer> 294.85001 </tempUpperlayer>

    <tempMiddlelayer> 297.23001 </tempMiddlelayer>

    <tempDeeplayer> 297.23001 </tempDeeplayer>

    <tempBedrockLayer> 297.23001 </tempBedrockLayer>

    <waterUpperlayer> 65.00000 </waterUpperlayer>

    <waterMiddlelayer> 70.00000 </waterMiddlelayer>

    <waterDeeplayer> 75.00000 </waterDeeplayer>

    <waterBedrockLayer> 75.00000 </waterBedrockLayer>

</Soil>

...

```

Le fichier .SIMX présente les informations sur les **conditions initiales** de la simulation (température et humidité des différentes couches du sol, température intérieure du bâti et pas de temps de la simulation). De plus, il est possible d'y renseigner les concentrations de certains polluants. Il s'agit du fichier devant être chargé dans le principal module d'ENVI-Met (ENVI-core), qui permet de faire tourner une simulation. Il regroupe donc également les informations des fichiers .INX et .fox.

- **Fichier .INX contenant la maquette 3D de la zone de simulation**

```

<ENVI-MET_Datafile>

<Header>

<filetype>INPX ENVI-met Area Input File</filetype>

```

```
<version>440</version>
<revisiondate>10/03/2022 20:59:15</revisiondate>
<remark>Created with SPACES 5.0.2</remark>
<checksum>0</checksum>
<encryptionlevel>0</encryptionlevel>
</Header>
<baseData>
  <modelDescription> [Add a remark] </modelDescription>
  <modelAuthor> [Enter model author name] </modelAuthor>
  <modelcopyright> [Define the data copyright of your model] </modelcopyright>
</baseData>
<modelGeometry>
  <grids-I> 271 </grids-I>
  <grids-J> 212 </grids-J>
  <grids-Z> 65 </grids-Z>
  <dx> 4.00000 </dx>
  <dy> 4.00000 </dy>
  <dz-base> 3.00000 </dz-base>
  <useTelescoping_grid> 0 </useTelescoping_grid>
  <useSplitting> 0 </useSplitting>
  <verticalStretch> 0.00000 </verticalStretch>
  <startStretch> 0.00000 </startStretch>
  <has3DModel> 1 </has3DModel>
  <isFull3DDesign> 0 </isFull3DDesign>
</modelGeometry>
<nestingArea>
  <numberNestinggrids> 0 </numberNestinggrids>
  <soilProfileA> 000000 </soilProfileA>
  <soilProfileB> 000000 </soilProfileB>
</nestingArea>
<locationData>
  <modelRotation> 0.00000 </modelRotation>
  <projectionSystem> Metric </projectionSystem>
```

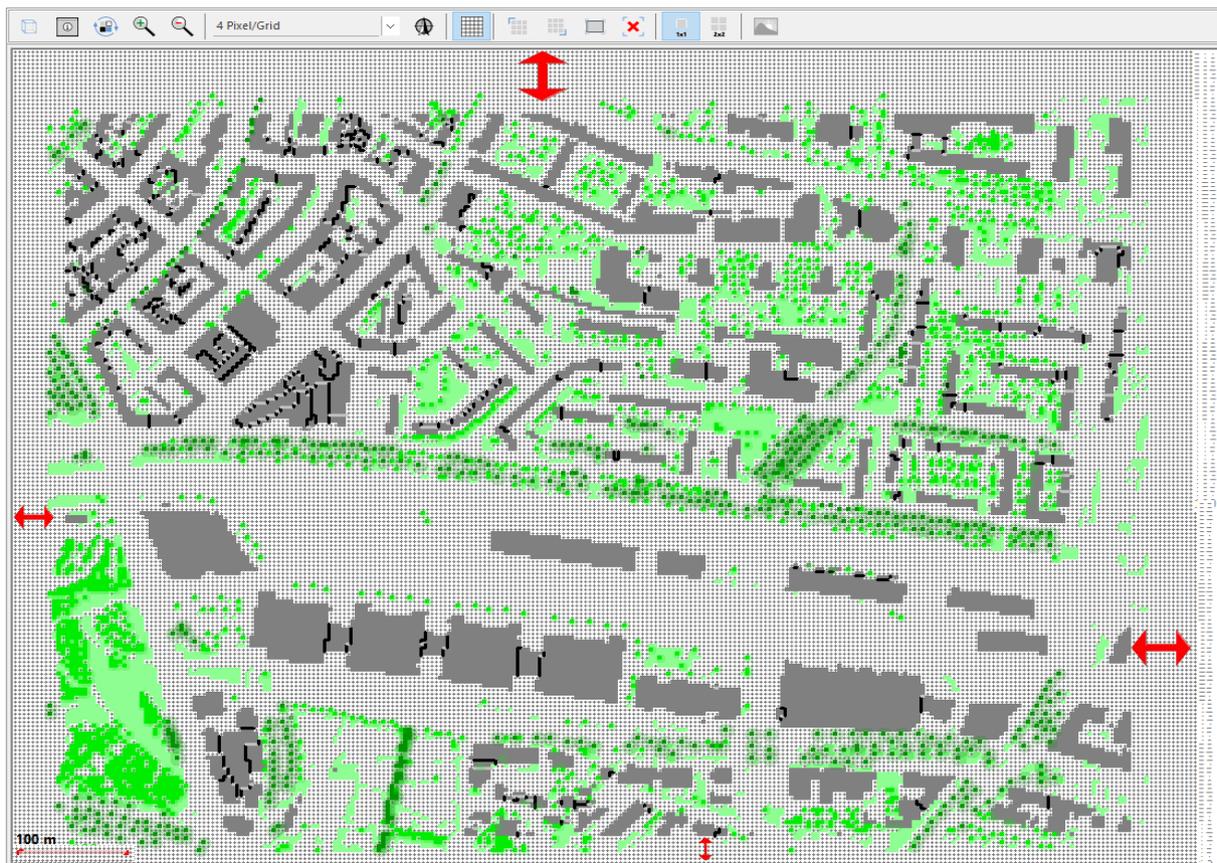



Figure 1 – Domaine de simulation Malraux à résolution horizontale 4 m matérialisée dans le module Spaces. L’ajout de zones en bordures (flèches rouges) vise à éviter la survenue d’instabilités.

- **Fichier .edb contenant les informations relatives aux éléments composant la zone de simulation**

```

<ENVI-MET_Datafile>
<Header>
<filetype>DATA</filetype>
<version>1</version>
<revisiondate>21/12/2021 17:28:12</revisiondate>
<remark>Envi-Data</remark>
<checksum>1702548</checksum>
<encryptionlevel>1701121</encryptionlevel>
</Header>
<SOIL>
  <ID> ORDLF1 </ID>
  <Description> Road LASER F 1 </Description>
  <versiegelung> 1 </versiegelung>
  
```

```
<ns> 0.00000 </ns>

<nfc> 0.00000 </nfc>

<nwilt> 0.00000 </nwilt>

<matpot> 0.00000 </matpot>

<hydro_lf> 0.00000 </hydro_lf>

<volumenw> 2.25000 </volumenw>

<b> 0.00000 </b>

<waerme_lf> 0.17000 </waerme_lf>

<Group> </Group>

<Color> 5195081 </Color>

<AddValue1> 0.00000 </AddValue1>

<AddValue2> 0.00000 </AddValue2>

</SOIL>

<PROFILE>

  <ID> 020RD1 </ID>

  <Description> Road LASER F 1 </Description>

  <z0_Length> 0.01000 </z0_Length>

  <soilprofil>
ORDLF1,ORDLF1,ORDLF1,ORDLF1,ORDLF2,ORDLF2,ORDLF2,ORDLF3,0000SL,0000SL,0000SL,0000SL,0000SL,
0000SL,0000SL,0000SL,0000SL,0000SL,0000SL </soilprofil>

  <Albedo> 0.12000 </Albedo>

  <Emissivität> 0.94000 </Emissivität>

  <ExtraID> 0 </ExtraID>

  <Irrigated> 0 </Irrigated>

  <Color> 8388863 </Color>

  <Group> </Group>

  <AddValue1> 0.00000 </AddValue1>

  <AddValue2> 0.00000 </AddValue2>

</PROFILE>

<MATERIAL>

  <ID> 020RF1 </ID>

  <Description> Roof 1 LASER F </Description>

  <DefaultThickness> 0.01000 </DefaultThickness>
```

```
<Absorption> 0.75000 </Absorption>
<Transmission> 0.00000 </Transmission>
<Reflection> 0.25000 </Reflection>
<Emissivity> 0.80000 </Emissivity>
<SpecificHeat> 1193.00000 </SpecificHeat>
<ThermalConductivity> 1.00000 </ThermalConductivity>
<Density> 1193.00000 </Density>
<ExtralD> 0 </ExtralD>
<Color> 65535 </Color>
<Group> </Group>
</MATERIAL>
```

Les utilisateurs peuvent, s'ils le souhaitent, ajouter à la base de données affiliée au projet de simulation des objets (matériaux, revêtements, végétation) aux caractéristiques personnalisées (émissivité, albédo, épaisseur, conductivité thermique...). C'est le fichier .edb qui intègre les informations relatives à ces nouveaux éléments.

- **Fichier .fox de forçage**

```
<ENVI-MET_Datafile>
<Header>
<filetype>FULL FORCING FOR ENVI_MET V-1</filetype>
<version>3</version>
<revisiondate>6/8/2022 1:52:56 PM</revisiondate>
<remark>1</remark>
<checksum>-999</checksum>
<encryptionlevel>0</encryptionlevel>
</Header>
<impulse>
  <date> 01.01.2018 </date>
...
<impulse>
<date> 19.07.2018 </date>
  <time> 00:00:00 </time>
  <dataSrc> inValid </dataSrc>
```

```

<radSurface> horizontal </radSurface>

<dirRad> 0.00000 </dirRad>

<difRad> 0.00000 </difRad>

<lwRad> 369.75101 </lwRad>

<lClouds> -999.00000 </lClouds>

<mClouds> -999.00000 </mClouds>

<hClouds> -999.00000 </hClouds>

<precipitation> 0.00000 </precipitation>

<atmPressure> 1013.00000 </atmPressure>

<backgroundpollutants>0.00000,0.00000,0.00000,0.00000,0.00000,0.00000,0.00000,0.00000,0.00000
</backgroundpollutants>

<profileData type="matrix-data" dataI="5" dataJ="3" signcount="5">
    0.0000, 0.0000, 294.2700, 0.0000, 0.0000, 10.7510
    0.0000, 2.0000, 294.2700, -0.2447, -0.6724, 10.7510
    0.0000, 2500.0000, 294.2700, -0.8273, -2.2730, 10.7510
</profileData>
</impulse>
...

```

Le fichier.fox contient le forçage météorologique d'ENVI-Met. Les données pouvant être forcées par le modèle sont les variables climatiques de base (température de l'air, humidité relative, vitesse et direction du vent, précipitations) et les données de rayonnement (rayonnement direct, diffus et atmosphérique). Le pas de temps du forçage est fixé à **30 minutes**.

1	Date	Time	SW down	SW DIF	LW down	TA	RH	Wind speed	Wind dir	Precipitation
2	19.07.2021	00:00:00	0	0	369.751	294.27	71.2	1.1	20	0
3	19.07.2021	00:30:00	0	0	365.302	294.09	72	1.1	20	0
4	19.07.2021	01:00:00	0	0	362.745	293.98	72.3	1.14	20	0

Annexe I : Données météorologiques utilisées pour la conception des fichiers de forçage

- Période estivale caniculaire du 28 juin 2015 au 2 juillet 2015 (simulée pour les zones Malraux et Starlette)

Pour cette période, les données ayant permis de forcer les modèles microclimatiques LASER/F et ENVI-Met ont été obtenues à partir des **résultats du système Més0-NH/SURFEX** (cf. chapitre 2.2.1). Les données mesurées à la même période pour les sites de la DRIRE (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) et de l'IPCB (rayonnement atmosphérique) sont uniquement ajoutées à titre informatif.

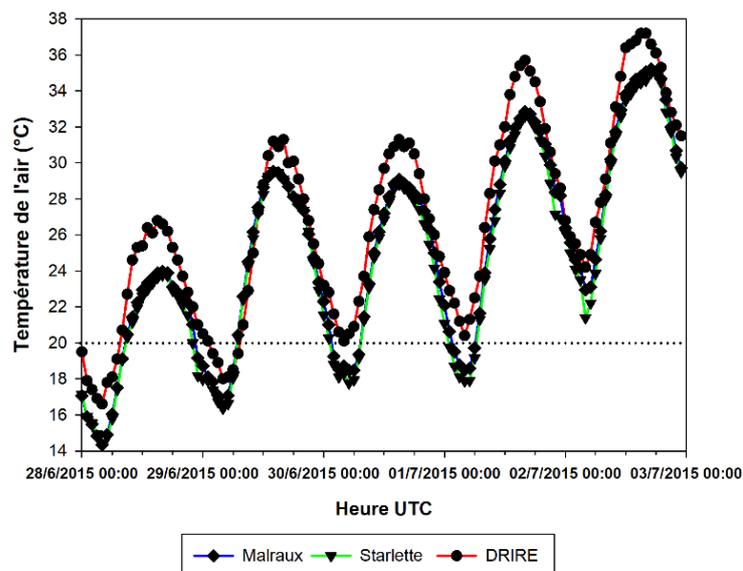


Figure 1 – Comparaison de la température de l'air obtenue à partir des forçages Més0-NH/SURFEX sur les secteurs Malraux et Starlette avec celle de la station DRIRE lors de la période du 28 juin au 2 juillet 2015.

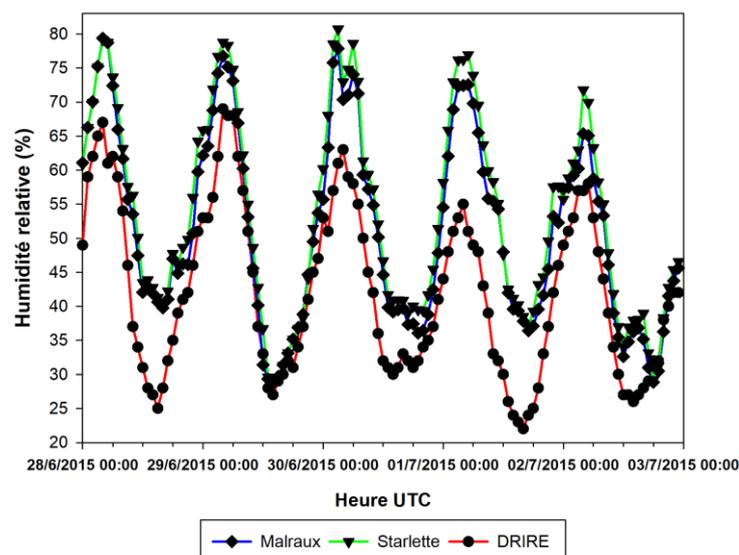


Figure 2 – Comparaison de l'humidité relative obtenue à partir des forçages Més0-NH/SURFEX sur les secteurs Malraux et Starlette avec celle de la station DRIRE lors de la période du 28 juin au 2 juillet 2015.

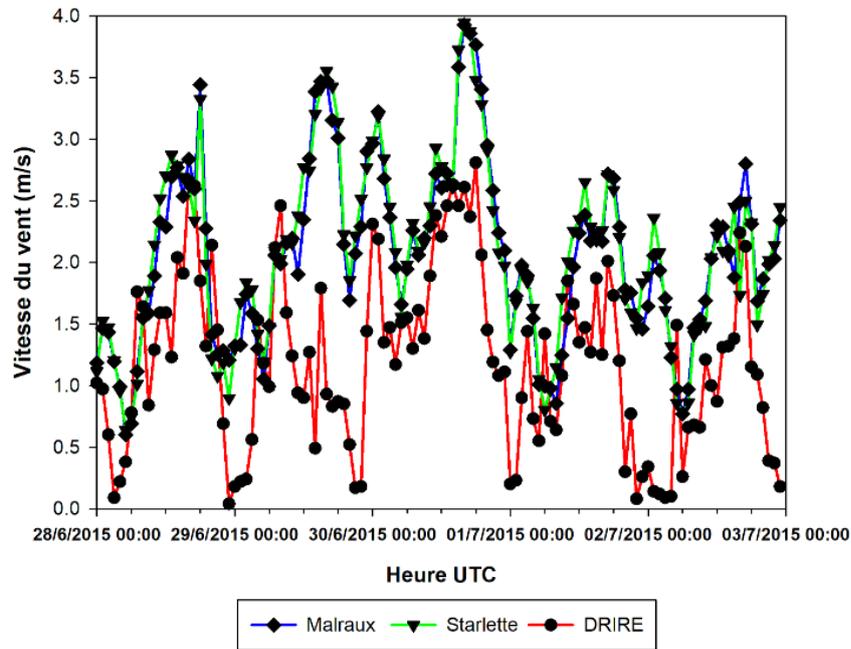


Figure 3 – Comparaison de la vitesse du vent obtenue à partir des forçages Més0-NH/SURFEX sur les secteurs Malraux et Starlette avec celle de la station DRIRE lors de la période du 28 juin au 2 juillet 2015.

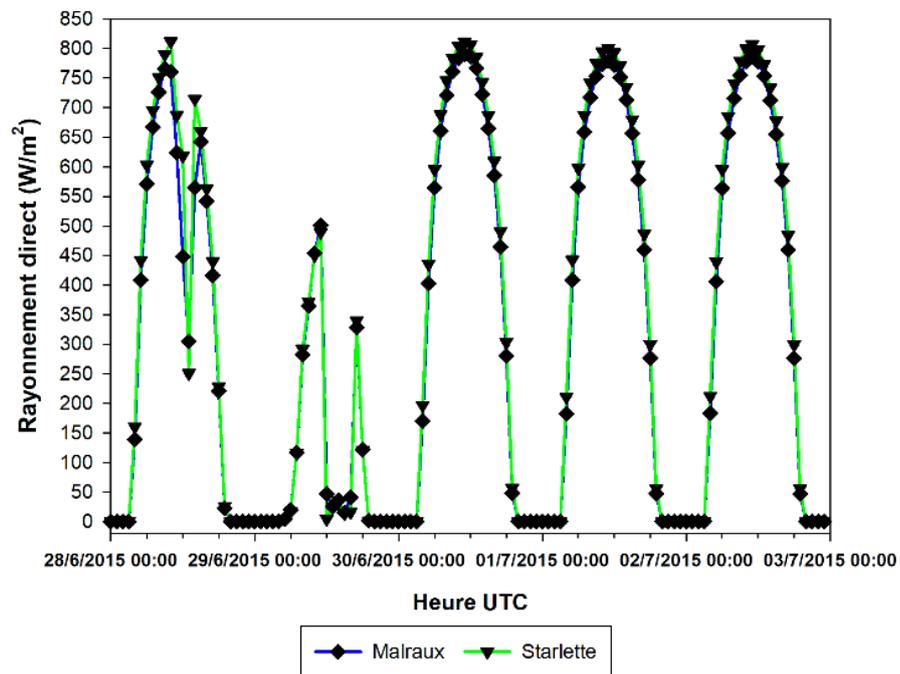


Figure 4 – Rayonnement direct obtenu à partir des forçages Més0-NH/SURFEX sur les secteurs Malraux et Starlette lors de la période du 28 juin au 2 juillet 2015. Les données du site de l'IPCB n'ont malheureusement pas pu être obtenues du fait d'une défaillance du dispositif entre le 21 juin et le 16 juillet 2015.

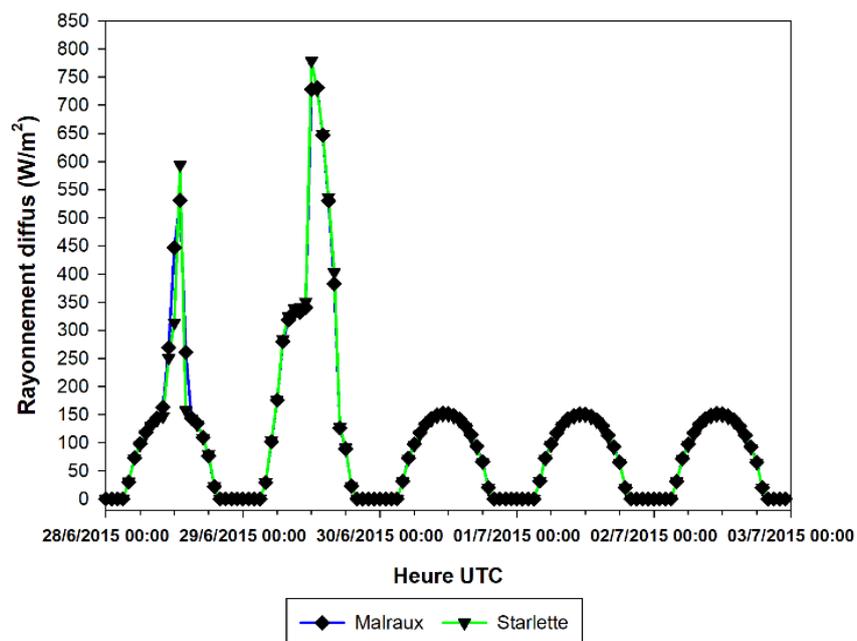


Figure 5 – Rayonnement diffus obtenu à partir des forçages Méso-NH/SURFEX sur les secteurs Malraux et Starlette lors de la période du 28 juin au 2 juillet 2015. Les données du site de l’IPCB n’ont malheureusement pas pu être obtenues du fait d’une défaillance du dispositif entre le 21 juin et le 16 juillet 2015.

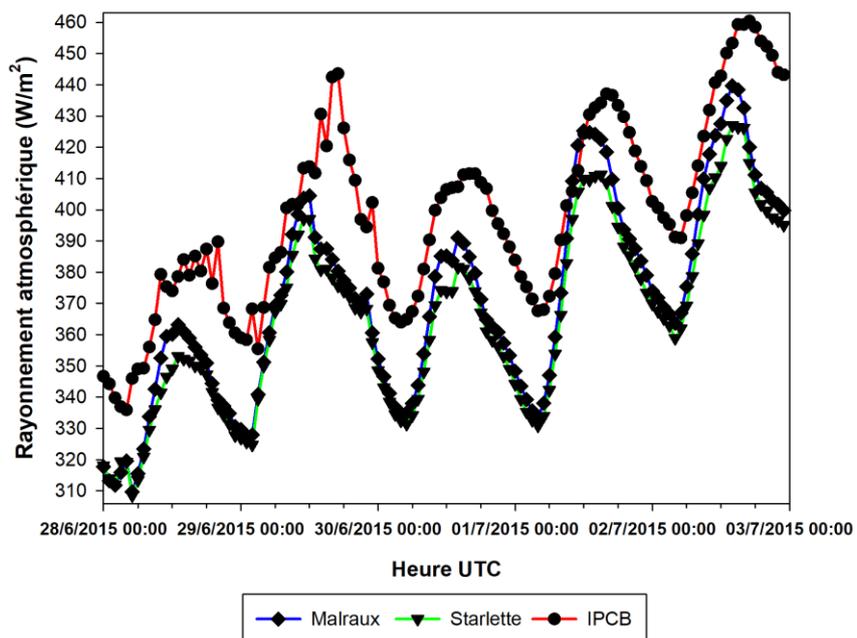


Figure 6 – Comparaison du rayonnement atmosphérique obtenu à partir des forçages Méso-NH/SURFEX sur les secteurs Malraux et Starlette avec celui mesuré sur le site de l’IPCB lors de la période du 28 juin au 2 juillet 2015.

- Période estivale du 6 au 7 juillet 2016 (simulée pour le site du Jardin du Palais Universitaire)

Les données météorologiques de ces deux journées estivales sont issues du **Jardin du Palais U** (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) et du site de l'**IPCB** (données de rayonnement). Elles ont directement alimenté le forçage météorologique de la simulation consacrée au contrôle et à la validation des modèles microclimatiques LASER/F et ENVI-Met (cf. chapitre 2.1).

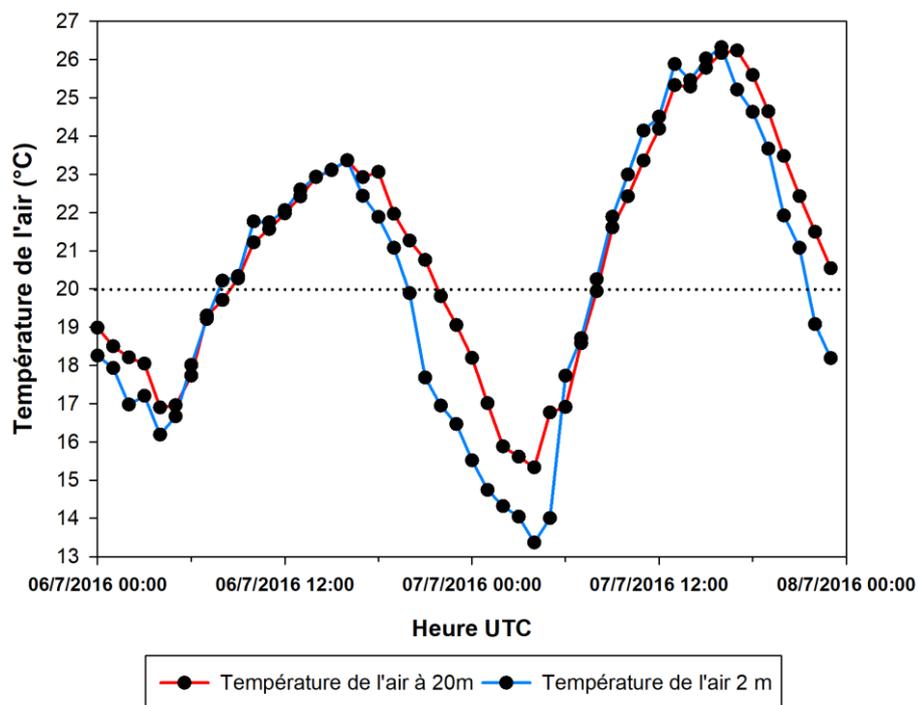


Figure 7 – Température de l'air mesurée au Jardin du Palais U à 20 m et 2 m les 6 et 7 juillet 2016.

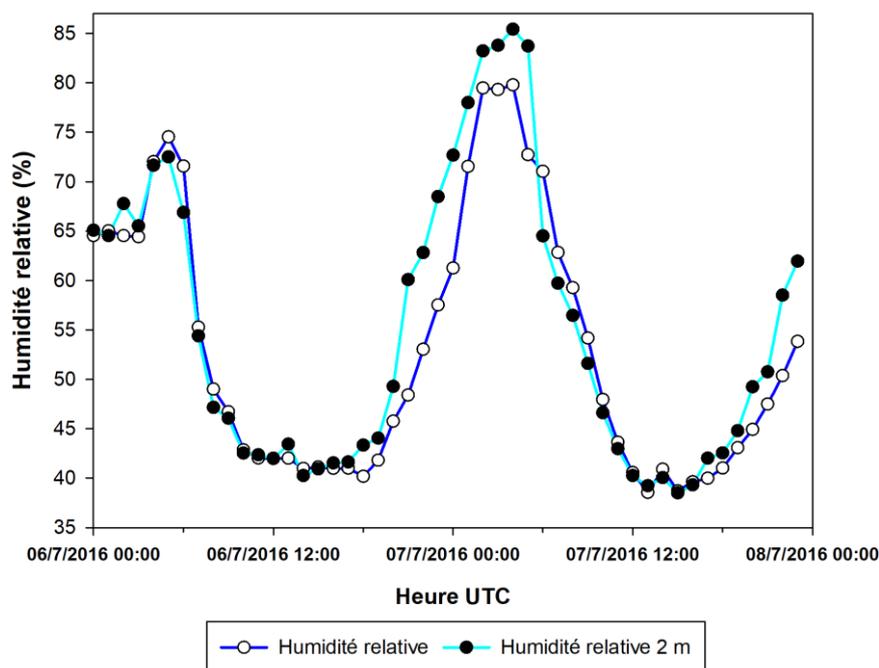


Figure 8 – Humidité relative mesurée au Jardin du Palais U à 20 m et 2 m les 6 et 7 juillet 2016.

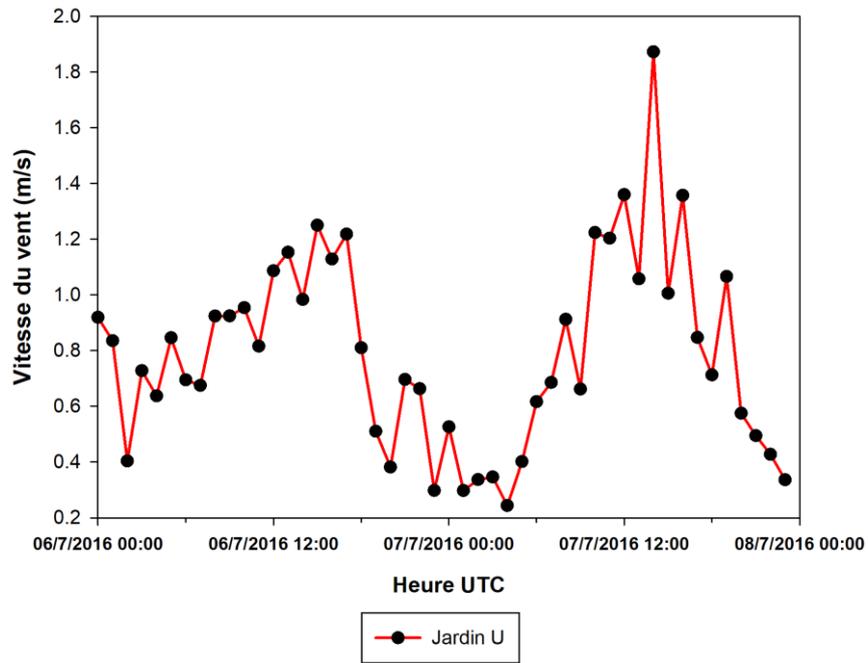


Figure 9 – Vitesse du vent mesurée au Jardin du Palais U à 10 m les 6 et 7 juillet 2016.

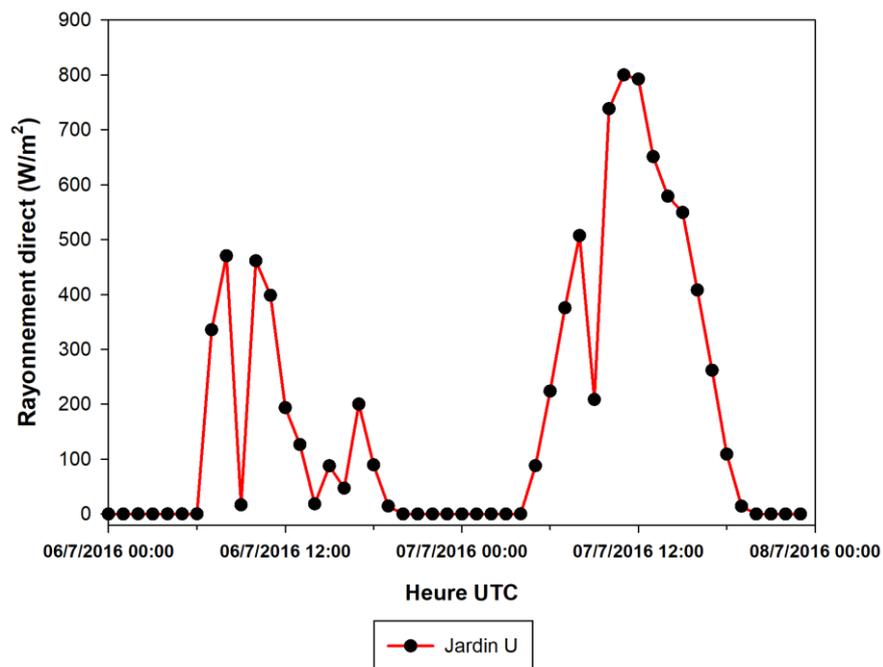


Figure 10 – Rayonnement direct mesuré sur le site de l’IPCB et utilisé pour le forçage météorologique de la simulation du Jardin du Palais U les 6 et 7 juillet 2016.

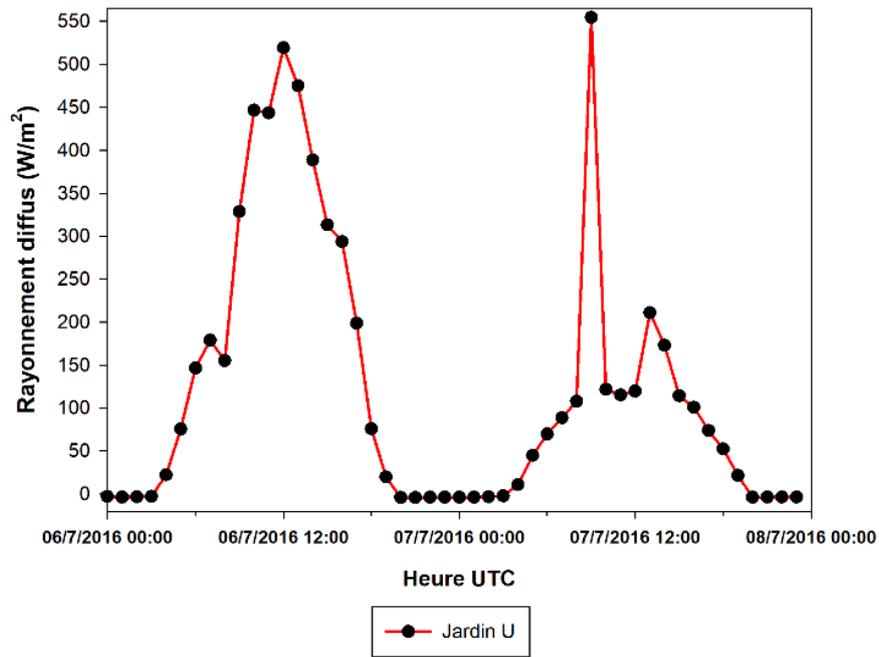


Figure 11 – Rayonnement diffus mesuré sur le site de l’IPCB et utilisé pour le forçage météorologique de la simulation du Jardin du Palais U les 6 et 7 juillet 2016.

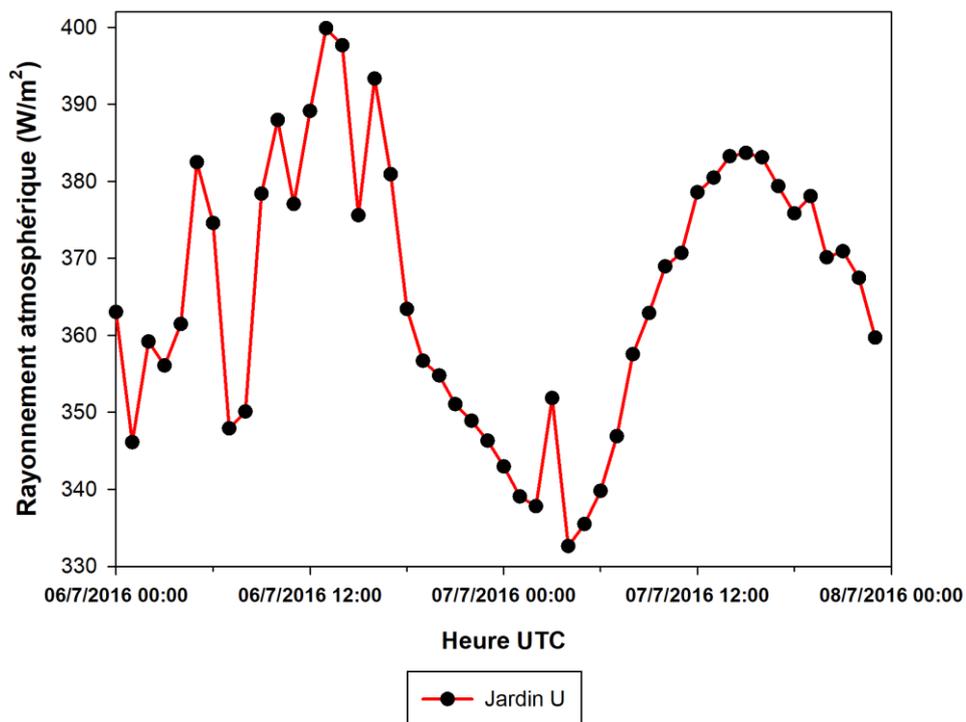


Figure 12 – Rayonnement atmosphérique mesuré sur le site de l’IPCB et utilisé pour le forçage météorologique de la simulation du Jardin du Palais U les 6 et 7 juillet 2016.

- **Période estivale du 19 au 21 juillet 2021 (simulée pour la zone Malraux)**

Deux simulations ont été effectuées avec les modèles microclimatiques LASER/F et ENVI-Met sur le secteur Malraux les 20 et 21 juillet 2021, la journée du 19 juillet étant considérée comme du spin-up (cf. chapitre 2.3). La première modélisation s’est appuyée sur les **sorties du système MésO-NH/SURFEX**, tandis que la seconde simulation a été forcée avec les **données des sites de la DRIRE et de l’IPCB**.

Le site de l’IPCB ayant fonctionné entre 2013 et 2016, aucune donnée de rayonnement n’a pu être mesurée en 2021. Afin de pouvoir tout de même obtenir des valeurs de rayonnement direct, diffus et atmosphérique pour la période du 19 au 21 juillet 2021, nous avons comparé le rayonnement global relevé à la station rurale d’Entzheim pour ces journées avec celui mesuré pour plusieurs jours de beau temps des mois de juillet 2013-2016. Nous avons ensuite sélectionné pour chaque jour de la période 2021 la journée située entre 2013 et 2016 dont le rayonnement global correspondait le mieux avec celui relevé : l’exemple du 20 juillet 2021 est montré figure 13.

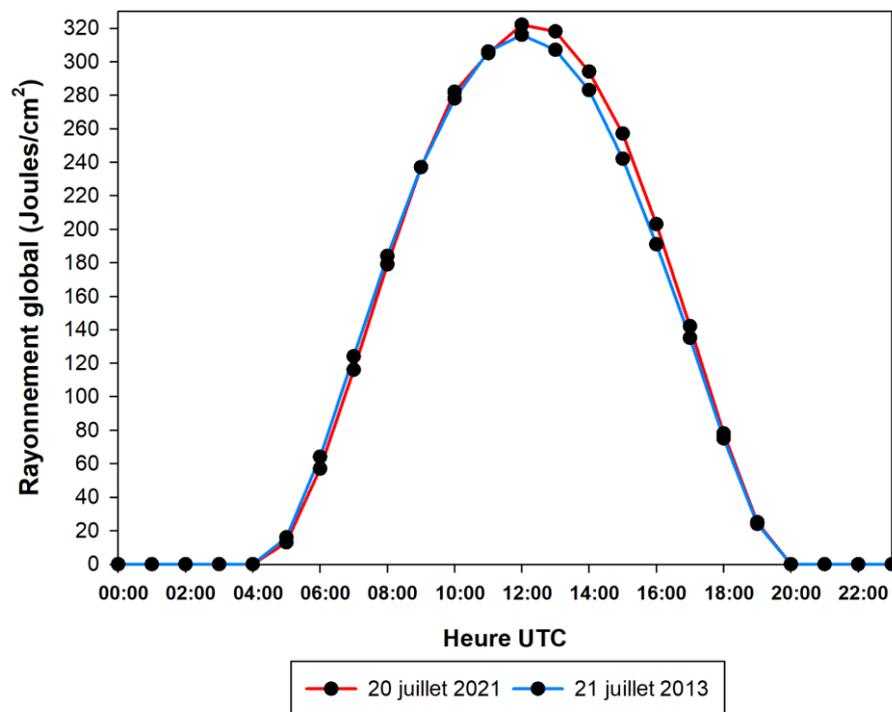


Figure 13 – Comparaison du rayonnement global relevé lors de la journée du 20 juillet 2021 avec celui mesuré pour la journée du 21 juillet 2013.

Nous avons ensuite utilisé le rayonnement direct, diffus et global mesuré à l’IPCB durant la journée du 21 juillet 2013 en tant que données de rayonnement pour le 20 juillet 2021. C’est donc cette méthode que nous avons appliquée pour obtenir l’ensemble des données de rayonnement direct, diffus et atmosphérique utilisées dans le fichier de forçage construit à partir de mesures (cf. chapitre 2.3).

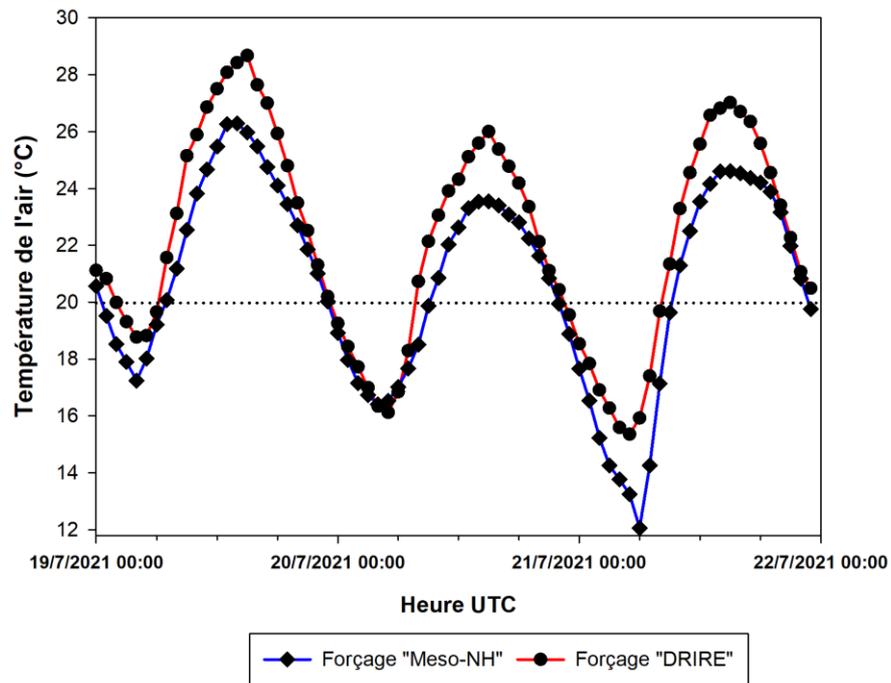


Figure 14 – Température de l'air obtenue à partir des forçages Mésos-NH/SURFEX et DRIRE sur le secteur Malraux lors de la période du 19 au 21 juillet 2021.

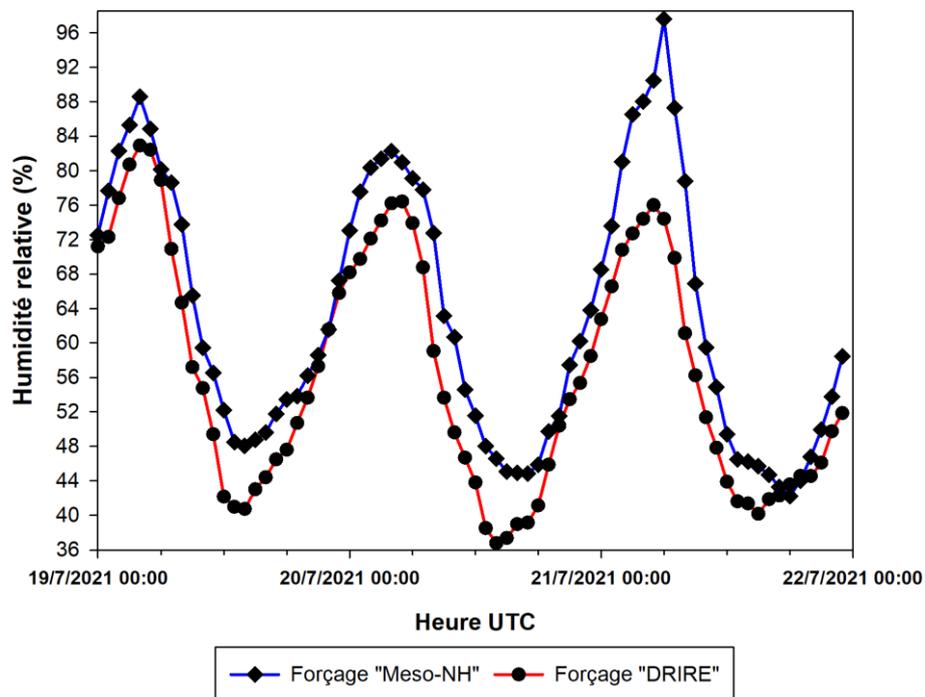


Figure 15 – Humidité relative obtenue à partir des forçages Mésos-NH/SURFEX et DRIRE sur le secteur Malraux lors de la période du 19 au 21 juillet 2021.

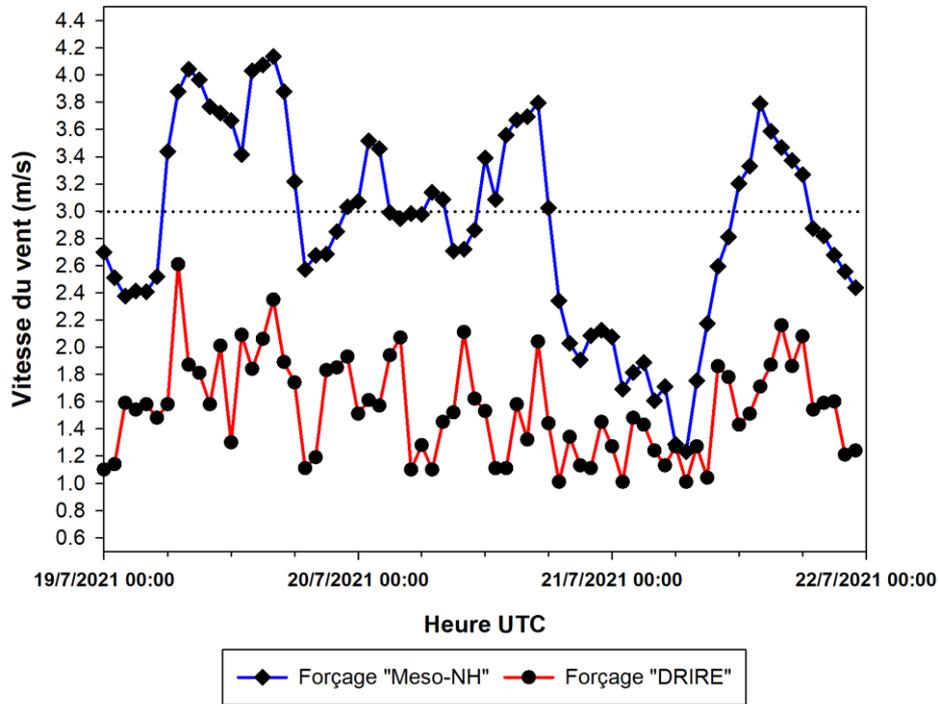


Figure 16 – Vitesse du vent obtenue à partir des forçages Méso-NH/SURFEX et DRIRE sur le secteur Malraux lors de la période du 19 au 21 juillet 2021.

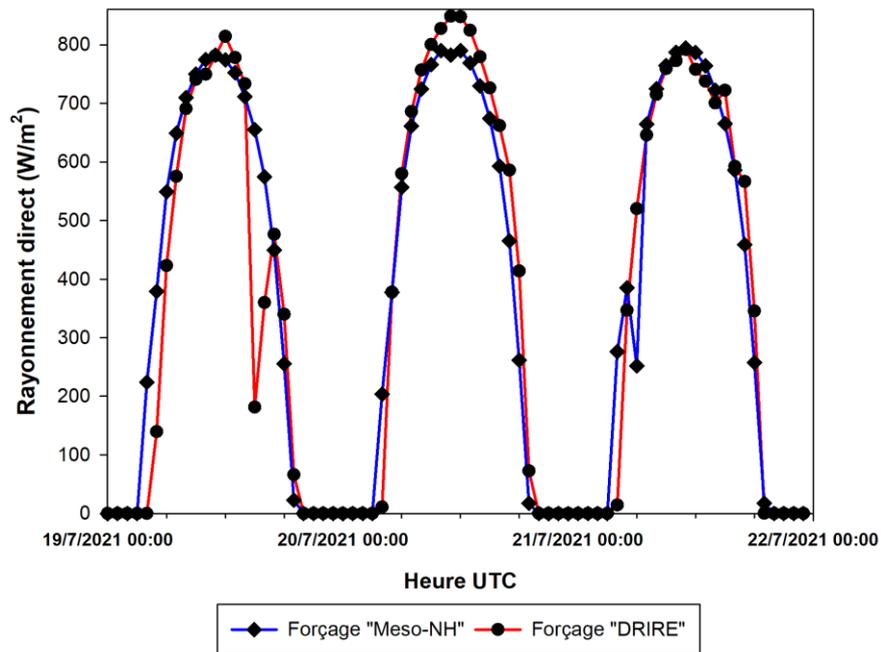


Figure 17 – Rayonnement direct obtenu à partir des forçages Méso-NH/SURFEX et DRIRE sur le secteur Malraux lors de la période du 19 au 21 juillet 2021.

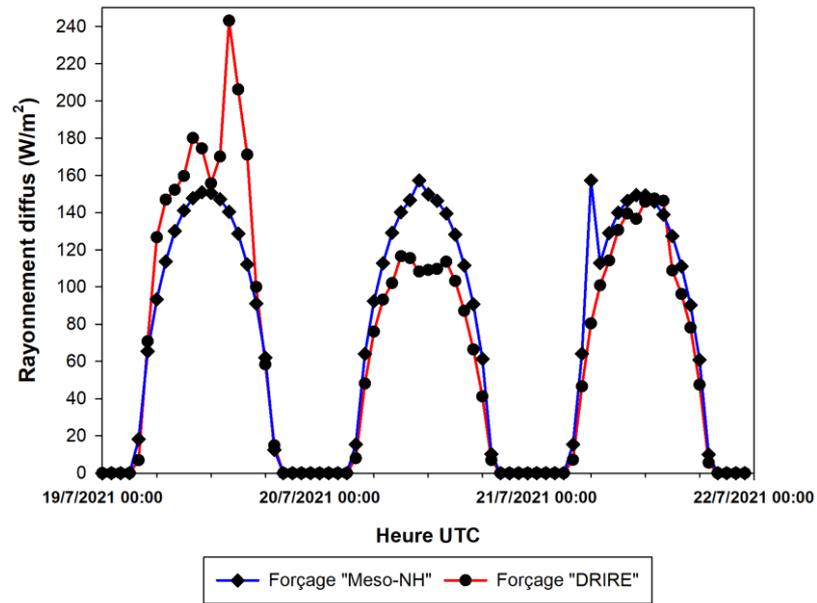


Figure 18 – Rayonnement diffus obtenu à partir des forçages Mésos-NH/SURFEX et DRIRE sur le secteur Malraux lors de la période du 19 au 21 juillet 2021.

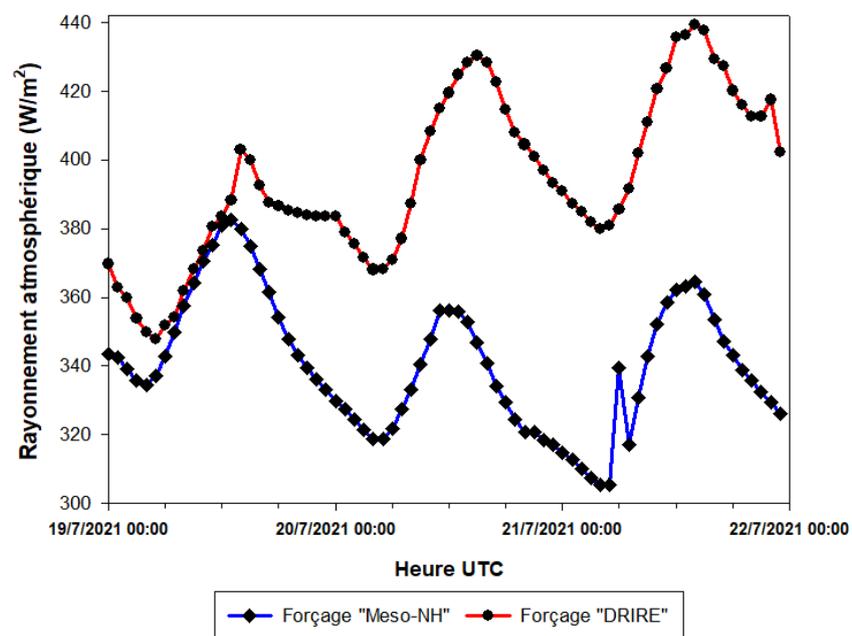


Figure 19 – Rayonnement atmosphérique obtenu à partir des forçages Mésos-NH/SURFEX et DRIRE sur le secteur Malraux lors de la période du 19 au 21 juillet 2021.

Annexe J : Comparaison du flux de chaleur sensible et latente issus du site Schiltigheim Mairie avec ceux du Jardin du Palais Universitaire

Lors du deuxième chapitre de cette thèse, les flux de chaleur sensible et latente mesurés pour le Jardin du Palais Universitaire avaient été utilisés à des fins de validation du modèle microclimatique LASER/F (cf. chapitre 2.1.3). Dans cette annexe, ils sont comparés aux flux de chaleur obtenus pour la station Schiltigheim Mairie, située sur un toit (cf. annexe A).

Le flux de chaleur sensible de Schiltigheim Mairie affiche des valeurs nettement plus élevées en journée que celui du Jardin du Palais U (Figure 1). Ces différences résultent de l'environnement propre aux deux sites : étant donné que Schiltigheim Mairie est localisé sur un toit, il est éclairé en continu dès le lever du soleil et reste exposé toute la journée au rayonnement solaire, contrairement au parc urbain où les arbres et le bâti constituent des obstacles à l'éclairement. Cela explique pourquoi le flux de chaleur sensible de Schiltigheim Mairie augmente très rapidement dès 6h TU et atteint des valeurs aussi hautes, pouvant dépasser de plus de 240 W/m² celles du Jardin du Palais U.

Les deux sites présentent des flux de chaleur sensible bien plus proches en période nocturne. Les valeurs de Schiltigheim Mairie sont tout de même légèrement plus élevées que celles relevées pour le Jardin du Palais U : ce dernier affiche même des valeurs négatives ou très proches de zéro, contrairement au flux de chaleur mesuré pour Schiltigheim qui reste positif presque toute la nuit. Cela montre que le toit continue à légèrement alimenter l'atmosphère en chaleur.

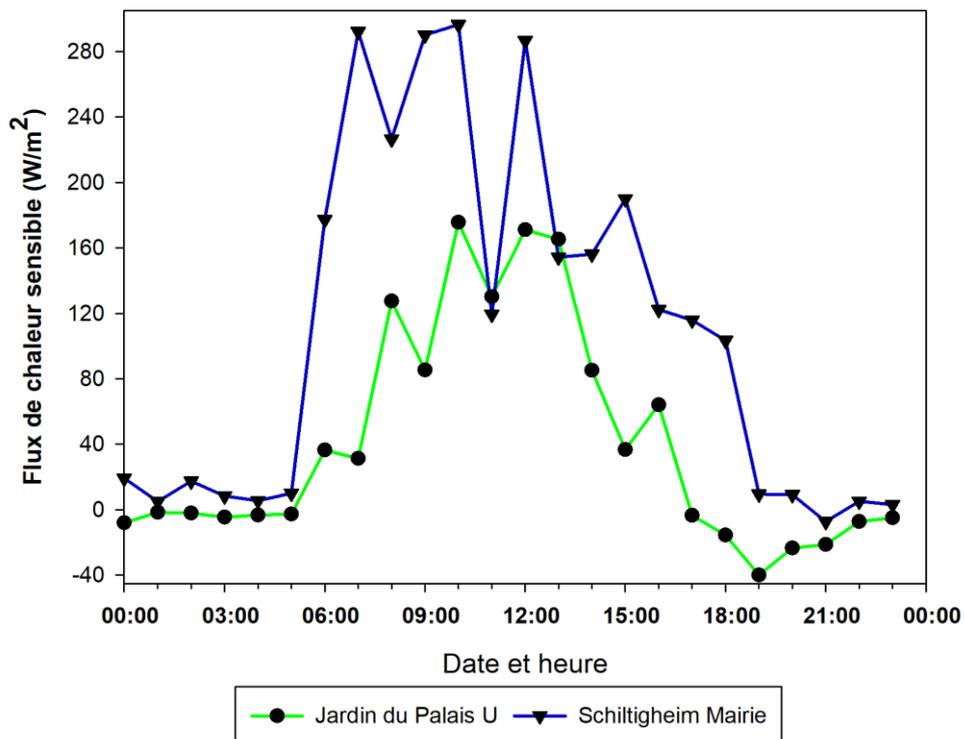


Figure 1 – Flux de chaleur sensible mesuré pour le site Schiltigheim Mairie comparé avec celui du Jardin du Palais Universitaire pour la journée du 7 juillet 2016.

Le flux de chaleur latente du Jardin du Palais U est beaucoup plus élevé que celui de Schiltigheim Mairie (Figure 2), du fait de l'importante présence de végétation au sein du parc urbain. Le site Schiltigheim Mairie étant localisé sur le toit d'un bâtiment situé dans une zone urbaine peu végétalisée (cf. annexes A et E), il n'y a donc rien d'étonnant à ce que le flux de chaleur latente y étant relevé présente des valeurs relativement faibles.

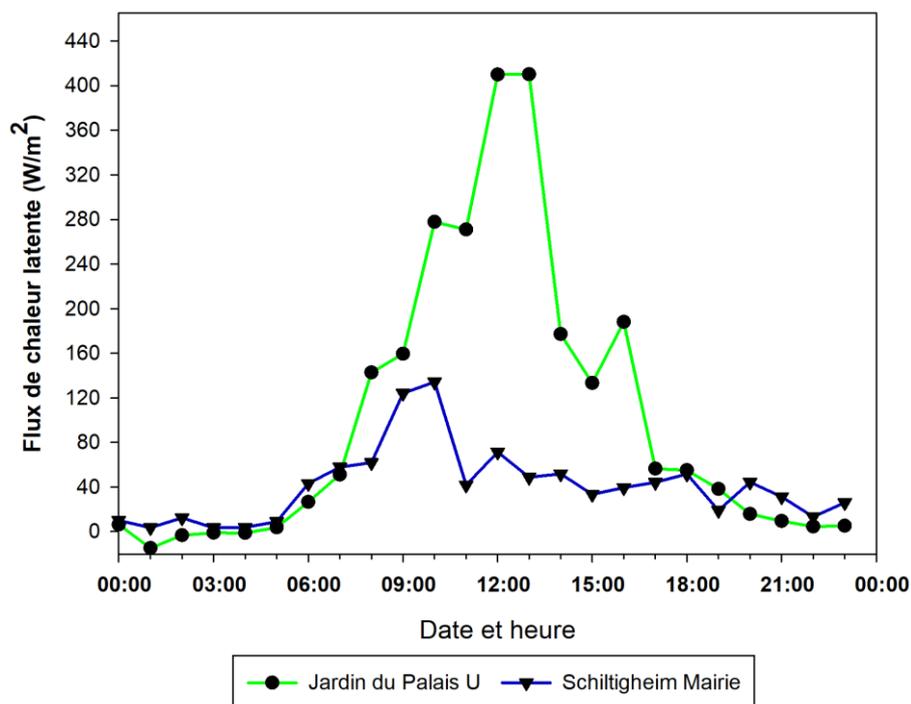


Figure 2 – Flux de chaleur latente mesuré pour le site Schiltigheim Mairie comparé avec celui du Jardin du Palais Universitaire pour la journée du 7 juillet 2016.

Annexe K : formules d'obtention de la température moyenne radiante (TMRT) (d'après Thorsson et al. (2007))

Formule utilisée pour obtenir la TMRT à l'aide d'un capteur de type globe noir

$$T_{\text{MRT globe noir}} = \left[(T_{\text{gnoir}} + 273,15)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 V_a^{0,6}}{\varepsilon D^{0,4}} \times (T_{\text{gnoir}} - T_{\text{air}}) \right]^{1/4} - 273,15$$

Avec : T_{gnoir} = température mesurée par le globe noir (en °C).

T_{air} = température de l'air (en °C).

V_a = vitesse du vent (en m/s).

ε = émissivité du globe.

D = diamètre du globe (en m).

Formule utilisée pour obtenir la TMRT à l'aide d'un capteur de type globe gris

$$T_{\text{MRT globe gris}} = \left[(T_{\text{ggris}} + 273,15)^4 + \frac{1,335 \times 10^8 V_a^{0,71}}{\varepsilon D^{0,4}} \times (T_{\text{ggris}} - T_{\text{air}}) \right]^{1/4} - 273,15$$

Avec : T_{ggris} = température mesurée par le globe gris (en °C).

T_{air} = température de l'air (en °C).

V_a = vitesse du vent (en m/s).

ε = émissivité du globe.

D = diamètre du globe (en m).

Annexe L : Échelles de sensation de l'Universal Thermal Comfort Index (UTCI) et du Physiological Equivalent Temperature (PET) (d'après Höpfe (1999) et Blazejczyk et al. (2010))

<i>Sensation thermique</i>	<i>UTCI</i>	<i>PET</i>	
Froid extrême	< - 40	< 4	
Très froid	[-40; -27 [
Froid	[-27; -13 [[4; 8 [
Frais	[-13; 0 [[8; 13 [
Assez frais	[0; 9 [[13; 18 [
Confort thermique	[9; 26 [[18; 23 [
Légèrement chaud		[23; 29 [
Modérément chaud	[26; 32 [[29; 35 [
Chaud	[32; 38 [[35; 41 [
Très chaud	[38; 46 [
Chaleur extrême	> 46	> 41	

Tableau 1. Equivalence entre indices UTCI et PET et sensations thermiques associées (d'après Höpfe, 1999 et Blazejczyk et al., 2010).

Annexe M : Adaptation des propriétés thermo-physiques de LASER/F et d'ENVI-Met à celles de Méso-NH/SURFEX

Dans le chapitre 2, nous avons cherché à démontrer que le couplage entre modèles méso et microclimatiques s'effectuait sans perte de cohérence d'une échelle à l'autre (cf. chapitre 2.2.2). Afin de pouvoir comparer les résultats des différents modèles, il a fallu avant tout adapter les caractéristiques de plusieurs revêtements et matériaux de LASER/F et d'ENVI-Met à celles spécifiées dans Méso-NH/SURFEX. Ces modifications ont concerné :

- Les murs

Caractéristiques	Paramétrage adopté
Nombre de couches	5
Épaisseur des couches (m)	0,01 (couches 1 et 5) 0,034 (couche 2 et 4) 0,046 (couche 3)
Nombre de matériaux	4
Conductivité thermique (W/m.K)	1,3 (couches 1 et 5) 0,813 (couche 2) 0,71 (couche 3) 0,755 (couche 4)
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1379 (couches 1 et 5) 1200 (couche 2) 1122 (couche 3) 1160 (couche 4)
Masse volumique (kg/m ³)	1379 (couches 1 et 5) 1200 (couche 2) 1122 (couche 3) 1160 (couche 4)
Albédo	0,3
Émissivité	0,9

Tableau 1 –Paramétrage des murs commun aux trois modèles après modification.

- Les toits

Caractéristiques	Paramétrage adopté
Nombre de couches	4

Épaisseur des couches (m)	0,01 (couche 1) 0,012 (couche 2) 0,0085 (couche 3) 0,009 (couche 4)
Nombre de matériaux	3
Conductivité thermique (W/m.K)	1 (couche 1) 0,2265 (couche 2) 0,23 (couches 3 et 4)
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1193 (couche 1) 930 (couche 2) 1139 (couche 3)
Masse volumique (kg/m³)	1193 (couche 1) 930 (couche 2) 1139 (couche 3)
Albédo	0,25
Émissivité	0,8

Tableau 2 – Paramétrage des toits commun aux trois modèles après modification.

- Les routes

Caractéristiques	Paramétrage adopté
Nombre de couches	4
Épaisseur des couches (m)	0,005 (couche 1) 0,015 (couche 2) 0,03 (couche 3) 0,05 (couche 4)
Nombre de matériaux	3
Conductivité thermique (W/m.K)	0,17 (couches 1 et 2) 0,23 (couche 3) 0,25 (couche 4)
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1000 (couches 1 et 2) 1111 (couche 3) 1131 (couche 4)
Masse volumique (kg/m³)	1000 (couches 1 et 2) 1111 (couche 3)

	1131 (couche 4)
Albédo	0,12
Émissivité	0,94

Tableau 3 – Paramétrage des routes commun aux trois modèles après modification.

- Les surfaces d'eau

Caractéristiques	Paramétrage adopté
Nombre de couches	10
Épaisseur des couches (m)	0,5 (couches 1 à 7, 10) 0,1 (couche 8) 0,3 (couche 9)
Nombre de matériaux	2
Conductivité thermique (W/m.K)	600

Tableau 4 – Paramétrage des surfaces d'eau commun aux trois modèles après modification.

Annexe N : Graphiques complémentaires issus de la partie consacrée à l'utilisation combinée de modèles emboîtés

Dans cette annexe sont présentées des analyses complémentaires à celles menées lors de l'évaluation de la faisabilité du couplage entre le système de méso-échelle Méso-NH/SURFEX et les modèles microclimatiques LASER/F et ENVI-Met (cf. chapitre 2.2.2). Elles visent notamment à apporter un complément d'informations sur l'origine de certaines divergences entre les différents modèles.

Un de ces aspects concerne le flux de chaleur sensible nocturne des routes modélisé par Méso-NH/SURFEX, qui tend en effet à le sous-estimer par rapport à celui simulé respectivement par LASER/F et ENVI-Met. L'explication pourrait provenir d'un refroidissement radiatif trop important des routes, qui se traduirait par une température de surface de la route plus basse que celle de l'air. Cela entraînerait une inversion du flux de chaleur sensible, qui présenterait par conséquent des valeurs négatives.

Nous avons donc cherché à vérifier cette hypothèse en analysant les différences entre la température de l'air et la température de surface de la route nocturnes pour chacun des trois modèles (Figure 1). En période nocturne, la température de l'air affiche systématiquement des valeurs plus élevées que celles de la température de surface de la route, et ceci quel que soit le modèle considéré. En ce qui concerne LASER/F et ENVI-Met, cette différence atteint au maximum respectivement 2,2°C et 1,1°C. En revanche, elle va jusqu'à 4,6°C pour Méso-NH/SURFEX et se maintient au-delà de 3°C durant toute la nuit : cela explique pourquoi le flux de chaleur sensible nocturne simulé par le modèle méso-climatique présente des valeurs légèrement négatives (cf. figure 50).

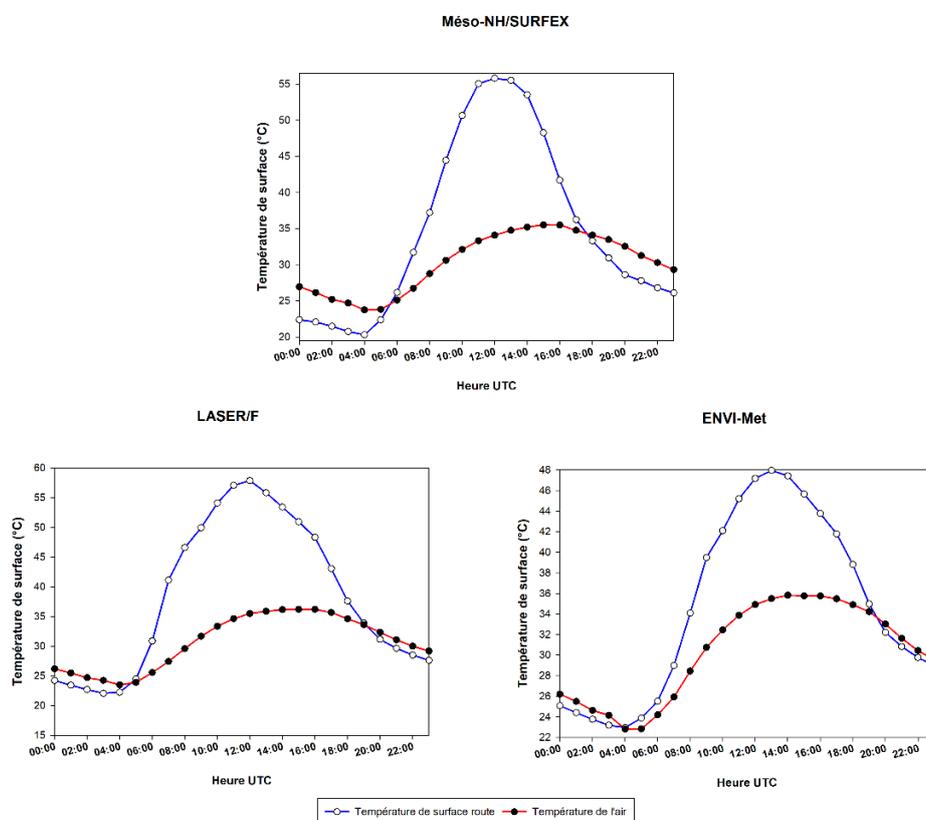


Figure 1 – Comparaison de la température de surface de la route avec la température de l'air simulées par Méso-NH/SURFEX (en haut à gauche), LASER/F (en haut à droite) et ENVI-Met (en bas) pour la maille Presqu'île lors de la période du 30 juin au 2 juillet 2015.

L'analyse des températures de surface permet aussi de mieux cerner l'origine des différences entre les flux de chaleur latente de l'eau modélisés respectivement par Méso-NH/SURFEX et LASER/F : la figure 2 indique que les températures de surface de l'eau modélisées par LASER/F sont nettement supérieures à celles simulées par le modèle mésoclimatique lors de la première journée de la période (RMSE = 1,03°C). Or il s'agit également du moment où les écarts entre les flux de chaleur latente de l'eau simulés par les deux modèles sont les plus élevés (cf. figure 52) : les plus fortes températures de surface de LASER/F entraînent en effet une évaporation plus importante qui vient alimenter le flux de chaleur latente. Cependant, au fil de la période, les valeurs de la température de surface de l'eau simulée par LASER/F finissent par se rapprocher de celles simulées par Méso-NH/SURFEX, et même par devenir plus faibles que ces dernières, ce qui réduit considérablement les écarts entre leurs flux de chaleur latente respectifs.

Comme indiqué au cours du chapitre 2, l'absence de données de terrain sur les bassins d'eau modélisés nous incite toutefois à rester prudents : pour le moment, nous ne sommes absolument pas en mesure de trancher sur le comportement de l'eau en milieu urbain, et par conséquent sur la capacité des modèles à en simuler les températures de surface ou le bilan d'énergie.

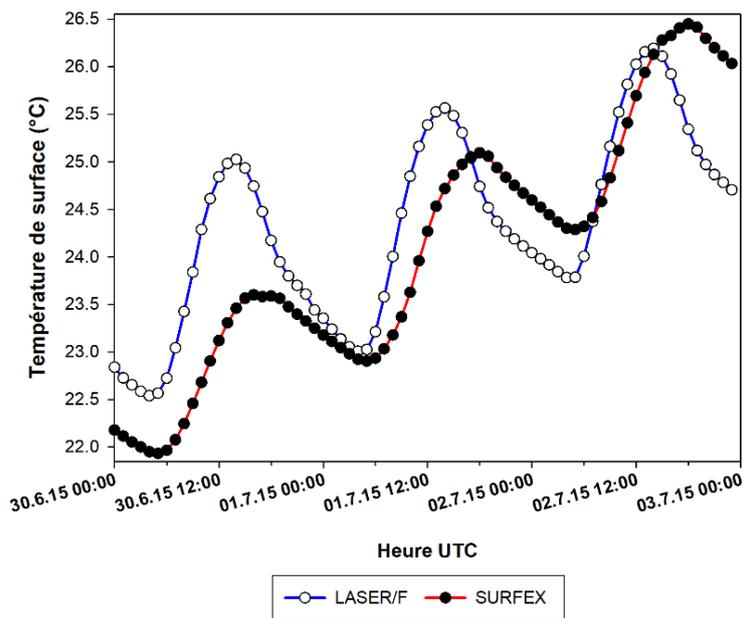


Figure 2 – Comparaison de la température de surface de l'eau simulée par LASER/F et Méso-NH/SURFEX pour la maille Presqu'Ile le 2 juillet 2015.

La figure 3 présente la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la TMRT simulées par Méso-NH/SURFEX, LASER/F et ENVI-Met à l'échelle de la maille : cette comparaison a pour objectif de déterminer la contribution de chacune de ces variables aux différences entre les UTCI simulés par les trois modèles (cf. figure 55).

La température de l'air et l'humidité relative sont simulées de manière similaire par Méso-NH/SURFEX, LASER/F et ENVI-Met (Figure 3, en haut) : la corrélation entre les valeurs est excellente ($R^2_{\text{température de l'air}} > 0,98$ et $R^2_{\text{humidité relative}} > 0,92$) et les différences inter-modèles restent faibles ($RMSE_{\text{température de l'air}} \leq 0,7^\circ\text{C}$ et $RMSE_{\text{humidité relative}} < 6,4\%$). À l'opposé, la TMRT simulée par ENVI-Met se distingue nettement de celles modélisées respectivement par Méso-NH/SURFEX ($RMSE = 9,9^\circ\text{C}$) et LASER/F ($RMSE = 9,7^\circ\text{C}$) : c'est donc bien cette sous-estimation de la TMRT diurne qui conduit à valeurs plus faibles d'UTCI en journée pour le modèle CFD (cf. figure 55). Par ailleurs, les vitesses de vent simulées par Méso-NH/SURFEX s'avèrent plus élevées que celles des modèles microclimatiques

(Figure 3, en bas à gauche) : les écarts avec LASER/F et ENVI-Met peuvent en effet atteindre jusqu'à 1,6 m/s. Néanmoins, l'impact de cette variable sur l'indice de confort semble plutôt modéré, puisque malgré des vitesses de vent plus fortes, l'UTCI nocturne de Mésos-NH/SURFEX affiche des valeurs plus élevées que celles de LASER/F (cf. figure 55). Sans surprise, c'est donc essentiellement la TMRT qui explique les différences inter-modèles en termes de simulation de l'UTCI.

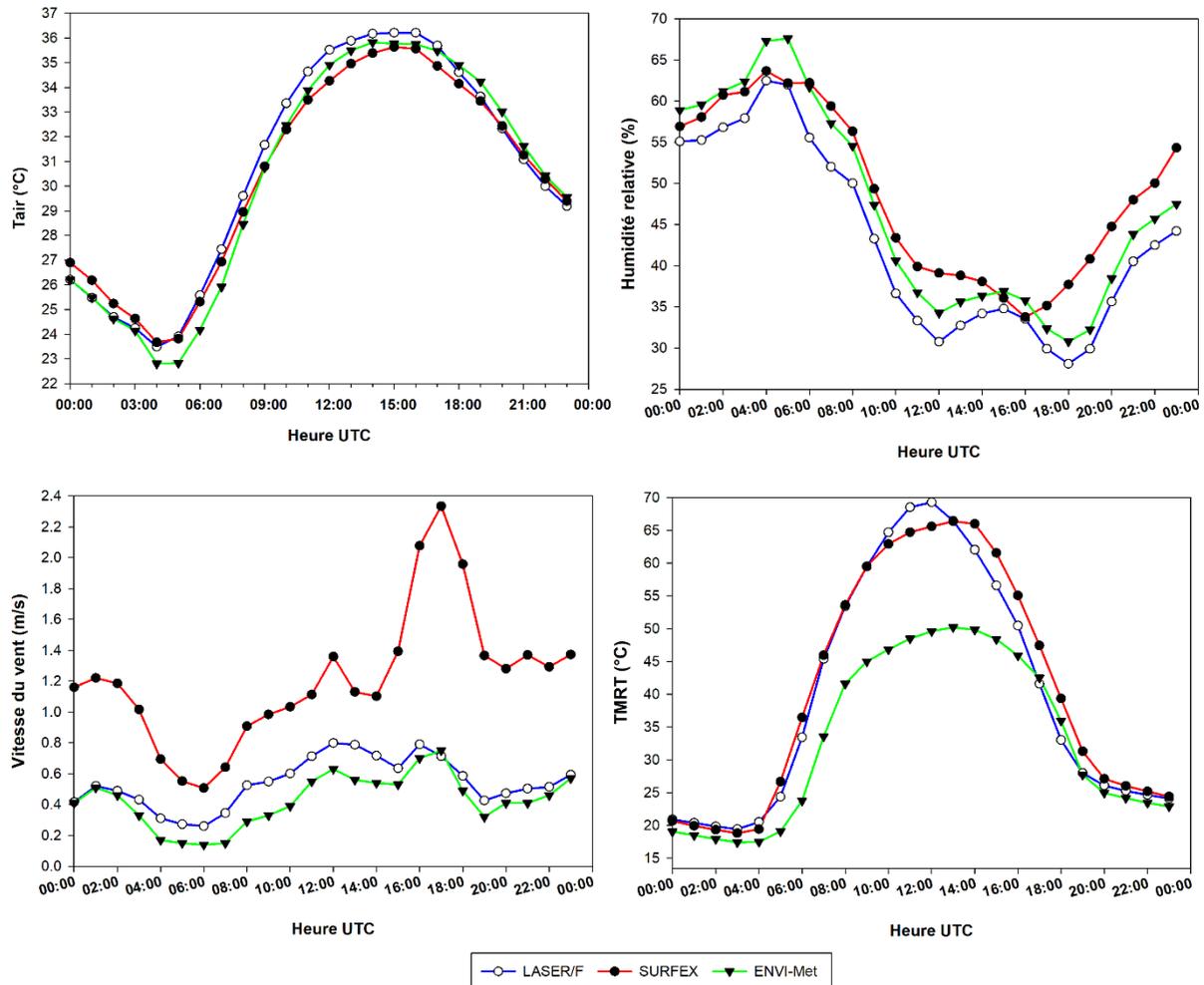


Figure 3 – Comparaison de la température de l'air (en haut à gauche), de l'humidité relative (en haut à droite), de la vitesse du vent (en bas à gauche) et de la TMRT (en bas à droite) simulés par ENVI-Met, LASER/F et Mésos-NH/SURFEX pour la maille Presqu'île le 2 juillet 2015.

Annexe O : Graphiques complémentaires concernant les résultats de la campagne de mesures Malraux (le 20 juillet 2021)

Les deux graphiques présentés dans cette annexe viennent compléter les résultats de la section consacrée à la comparaison des sorties du couplage entre méso et micro-échelles avec les données de la campagne de mesures Malraux (cf. chapitre 2.3).

La figure 1 affiche les températures de l'air mesurées par les cinq stations fixes situées dans la zone Malraux lors de la journée du 20 juillet 2021. D'emblée, il est possible de remarquer que pour l'ensemble des sites, les températures mesurées entre 6h et 9h TU sont nettement plus basses que celles relevées entre 17h et 19h TU. Elles confirment ainsi les résultats des mesures mobiles menées sur l'ensemble du secteur, qui avaient montré que les transects effectués en matinée étaient plus frais que ceux réalisés en début de soirée. Les mesures mettent également en évidence le comportement particulier des stations UGC et Cascade, aux températures diurnes bien plus basses que celles des trois autres sites. Les hypothèses concernant l'origine de ces valeurs plus faibles sont détaillées dans le chapitre 2 (cf. chapitre 2.3.2.1).

L'examen du ΔT_{ur} relevé au niveau des cinq stations fixes vient confirmer les résultats obtenus à partir de la carte de l'ICU maximal moyen (Figure 1, à droite) : les mesures comme la cartographie s'accordent ainsi sur une valeur de ΔT_{ur} max située autour de 5°C. Il semble cependant important de rappeler que ce graphique ne concerne que la seule journée du 20 juillet 2021 : elle n'est donc pas forcément représentative du comportement moyen des cinq sites Malraux lors des jours de beau temps.

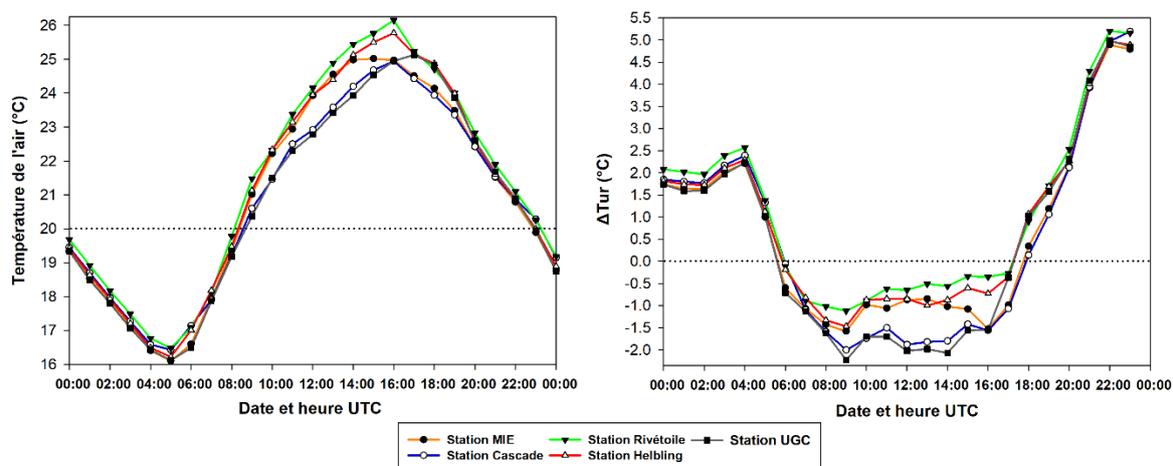


Figure 1 – Températures de l'air mesurées (à gauche) et Évolution du ΔT_{ur} horaire (à droite) pour l'ensemble des stations fixes de la zone Malraux lors de la belle journée du 20 juillet 2021.

Étude de la contribution de la végétation et de la géométrie urbaine à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg.

Mesures, modélisations et
préconisations.

Résumé

Couplé au réchauffement climatique global, l'îlot de chaleur urbain (ICU) expose les citoyens à de hauts niveaux de stress thermique. Face à ce phénomène, végétaliser les zones et agir sur la géométrie urbaine représentent les solutions d'atténuation les plus prometteuses. Il est cependant nécessaire de s'assurer qu'elles soient à la fois les plus efficaces et les plus réalistes possible. L'objectif majeur de cette thèse est donc d'évaluer la contribution de plusieurs facteurs, en particulier la végétation et la géométrie urbaine, à l'atténuation de l'ICU strasbourgeois afin d'établir des préconisations à destination des urbanistes et aménageurs. Mener à bien cette étude nécessite tout d'abord d'identifier les spécificités du phénomène à Strasbourg et de disposer d'outils fiables permettant de le mesurer et de le modéliser à différentes échelles. Des scénarios d'aménagement sont ensuite simulés afin de déterminer le potentiel de solutions de remédiation à la chaleur urbaine et d'anticiper les conséquences d'un aménagement sur l'ICU et le stress thermique.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, confort thermique, modèles climatiques, végétation, géométrie urbaine, Local Climate Zone, échelle spatiale.

Résumé en anglais

In addition to the effects of climate change, the urban heat island (UHI) increases city inhabitants' exposure to high heat stress levels. To fight this phenomenon, the greening of cities and the urban geometry design appear to be the most promising mitigation strategies. Nevertheless, these solutions have to be as effective and realistic as possible. Consequently, this thesis aims to assess the contribution of several factors, particularly vegetation and urban geometry, to the UHI mitigation in Strasbourg city. It will permit to propose recommendations for urban planners and designers. To carry out this study, the first step consists of identifying the specific characteristics of UHI in Strasbourg city. It is also necessary to have relevant tools to measure and model it at different scales. Several planning scenarios were subsequently modelled in order to determine mitigation solutions, and to investigate the impact of urban development on the UHI and the heat stress.

Keywords: urban heat island, thermal comfort, climate models, vegetation, urban geometry, Local Climate Zone, spatial scale.